

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

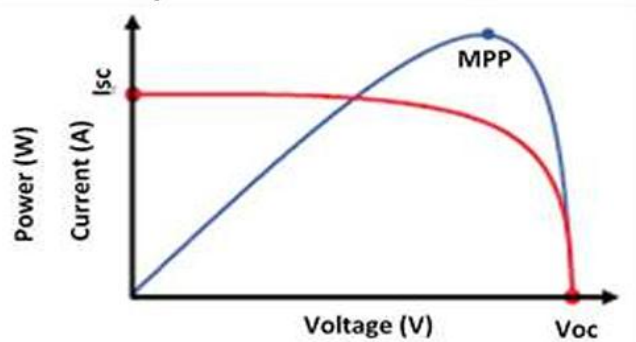
2.1 Sistem PLTS Off-Grid

Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) off-grid merupakan sistem pembangkitan listrik mandiri yang bekerja tanpa koneksi ke jaringan PLN. Energi listrik diperoleh dari modul fotovoltaik yang mengubah energi cahaya menjadi energi listrik. Daya yang dihasilkan dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari, kondisi modul, serta suhu operasional (Haqqu Makhabbah & Agung, 2018). Konfigurasi dasar PLTS off-grid terdiri atas panel surya, rangkaian pengendali, baterai penyimpanan, dan beban. Aliran energi antar komponen ditunjukkan pada Gambar 2.1, yang menggambarkan bagaimana energi dari panel dialirkan menuju pengendali, disimpan dalam baterai, dan kemudian digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban.



Gambar 2. 1 Diagram Prinsip Sistem PLTS Off-Grid
(‘Buku PLTS.pdf’, no date)

Hubungan antara tegangan dan arus yang dihasilkan panel surya membentuk karakteristik I-V dan P-V. Kurva ini penting untuk memahami performa modul fotovoltaik pada berbagai kondisi penyinaran. Ilustrasi kurva karakteristik tersebut ditampilkan pada Gambar 2.2



Gambar 2. 2 Kurva karakteristik arus-tegangan pada panel surya
(Sumber: Rois et al., 2021)

Variasi intensitas penyinaran menyebabkan daya yang masuk ke sistem berubah dari waktu ke waktu, sehingga proses pengisian baterai tidak selalu stabil. Ketidakstabilan suplai ini dapat memengaruhi kontinuitas daya yang diterima beban. Oleh karena itu, sistem PLTS off-grid memerlukan mekanisme manajemen energi untuk menjaga kestabilan operasi dan performa penyimpanan daya, termasuk melindungi baterai dari kondisi yang mempercepat degradasi.

2.2 Energi dan Daya Listrik

Daya listrik (P) merupakan laju penggunaan energi listrik yang diperoleh dari hasil kali tegangan dan arus, sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (2.1):

$$P = V \times I \quad (2.1)$$

Keterangan:

- P : Daya (watt)
- V : Tegangan (volt)
- I : Arus (ampere).

Energi listrik merupakan besarnya daya yang digunakan selama selang waktu tertentu, dengan satuan watt-hour (Wh). Energi listrik diperoleh dari hasil kali daya dengan waktu, sebagaimana dinyatakan pada Persamaan (2.2) (Aditya, Prayitno and Naibaho, 2025):

$$W = P \times t \quad (2.2)$$

Keterangan:

- W : Energi listrik (Wh),
- t : Waktu (jam)

Pada sistem yang melakukan pencatatan daya secara berkala, energi total diperoleh dengan menjumlahkan energi pada setiap interval pengukuran. Apabila daya dicatat pada interval waktu yang tetap, energi total dapat dinyatakan pada Persamaan (2.3):

$$W = \sum (P_i \times \Delta t) \quad (2.3)$$

dengan P_i adalah daya pada interval ke- i (watt) dan Δt durasi tiap interval (jam).

2.3 Baterai VRLA

Baterai Valve Regulated Lead Acid (VRLA) merupakan baterai timbal-asam tertutup (*sealed lead-acid*) yang menggunakan teknologi AGM atau gel sebagai media penyerap elektrolit. Baterai ini dirancang untuk aplikasi *deep-cycle*, memiliki tingkat kebocoran rendah, karena kemampuannya melewati siklus charge–discharge berulang. Berdasarkan datasheet baterai VRLA 12V 200Ah (*‘AccuForce 12V - 200Ah | VRLA Battery’, no date*), baterai ini memiliki tegangan nominal 12 V, kapasitas 200 Ah pada *10-hour rate*, rentang tegangan penuh sekitar 12.7–13.0 V, tegangan minimum pelepasan 10.5–10.8 V (tergantung C-rate). Karakteristik ini sangat menentukan batas aman pengoperasian baterai, terutama dalam kaitannya dengan State of Charge (SoC).



Gambar 2. 3 Baterai VRLA 12V 200Ah
(Sumber: *AccuForce 12V - 200Ah | VRLA Battery, n.d.*)

Tabel 2. 1 Karakteristik Baterai VRLA 12V 200Ah (Datasheet AF12200)

Parameter	Nilai
Tegangan nominal	12 V
Kapasitas (10-hour rate)	200 Ah
Kapasitas (20-hour rate)	210 Ah
Tegangan penuh	12.7–13.0 V
Tegangan minimum (end voltage)	10.5–10.8 V
Suhu operasi	–15°C hingga 50°C

(Sumber: *AccuForce 12V - 200Ah | VRLA Battery, n.d.*)

Tegangan minimum pelepasan 10.5–10.8 V (tergantung C-rate). Karakteristik ini sangat menentukan batas aman pengoperasian baterai. Salah satu batas aman yang penting dijaga adalah kondisi pengosongan, karena pada kondisi pengosongan berlebih (*over-discharge*) suhu dan resistansi internal baterai timbal-asam meningkat secara signifikan, sehingga mempercepat proses penuaan (*aging*) dan degradasi kapasitas baterai (Broda and Inzelt, 2018). Resistansi internal bahkan dapat meningkat hingga sekitar dua kali lipat dibanding nilai awalnya ketika potensial sel menurun tajam akibat *over-discharge*, sehingga rugi daya dalam bentuk panas (*I²R heating*) bertambah besar dan suhu baterai ikut naik. Oleh karena itu, pemantauan suhu menjadi penting sebagai indikator dini kondisi tidak aman, sekaligus berkaitan erat dengan penentuan *State of Charge* (SoC) sebagai dasar pengoperasian baterai yang aman.

2.3.1 State of Charge (SoC) pada Baterai VRLA

State of Charge (SoC) merupakan parameter yang menyatakan persentase kapasitas energi yang tersimpan dalam baterai dibandingkan dengan kapasitas penuhnya. Pada baterai Valve Regulated Lead Acid (VRLA), SoC digunakan sebagai indikator utama untuk memantau kondisi baterai, menghindari overcharge maupun overdischarge, serta memastikan proses pengisian dan pengosongan berlangsung aman. Penentuan SoC pada baterai timbal-asam dapat dilakukan melalui beberapa metode, di antaranya estimasi berbasis tegangan atau Open Circuit Voltage (OCV), Coulomb Counting, serta metode berbasis model (Farizy et al., 2016). Metode berbasis tegangan memanfaatkan hubungan antara tegangan terminal dan kapasitas baterai, sedangkan metode Coulomb Counting menghitung perubahan SoC berdasarkan akumulasi arus terhadap waktu. Pada sistem baterai yang bekerja secara dinamis, kedua metode tersebut dapat dikombinasikan agar nilai SoC awal dapat diperoleh dari tegangan baterai, kemudian diperbarui menggunakan arus charge dan discharge selama sistem beroperasi. (Triwijaya *et al.*, 2025) menjelaskan bahwa integrasi OCV dan Coulomb Counting dapat digunakan untuk estimasi SoC, dengan OCV sebagai penentu kondisi awal baterai dan Coulomb Counting sebagai metode pembaruan SoC saat baterai bekerja.

2.3.2 Metode Open Circuit Voltage (OCV)

Open Circuit Voltage (OCV) merupakan metode estimasi SoC yang menggunakan hubungan antara tegangan baterai dan kapasitas baterai yang tersisa. Pada metode ini, tegangan baterai digunakan sebagai acuan untuk memperkirakan nilai SoC. Secara umum, semakin tinggi tegangan baterai, maka semakin besar kapasitas energi yang masih tersimpan di dalam baterai. Metode OCV banyak digunakan karena sederhana dan tidak membutuhkan pengukuran arus secara terus-menerus. Namun, metode OCV lebih sesuai digunakan ketika baterai berada dalam kondisi istirahat atau tidak sedang mengalami proses pengisian maupun pengosongan. Pada kondisi baterai sedang terhubung dengan panel surya, inverter, atau beban, tegangan baterai dapat berubah akibat arus charge-discharge, suhu, serta kondisi internal baterai. Oleh karena itu, tabel OCV digunakan sebagai pendekatan awal dalam menentukan SoC, bukan sebagai nilai mutlak pada kondisi sistem aktif. PowMr menjelaskan bahwa tegangan istirahat merupakan indikator SoC yang lebih stabil pada baterai lead-acid, tetapi pengukuran sebaiknya dilakukan setelah baterai dilepaskan dari sumber pengisian dan beban agar tegangan kembali stabil.

Tabel 2. 2 Hubungan SoC dan Tegangan OCV Baterai Lead-Acid 48 V

Kapasitas / SoC	Flooded Lead Acid 48 V	Sealed Lead Acid AGM 48 V	Sealed Lead Acid Gel 48 V
100%	50,56 V	51,60 V	51,40 V
90%	50,12 V	51,00 V	50,80 V
80%	49,64 V	50,40 V	50,20 V
70%	49,16 V	49,80 V	49,60 V
60%	48,72 V	49,20 V	49,00 V
50%	48,28 V	48,60 V	48,40 V
40%	47,88 V	48,00 V	47,80 V
30%	47,48 V	47,40 V	47,20 V
20%	47,04 V	46,80 V	46,60 V
10%	46,52 V	46,20 V	46,00 V
0%	46,36 V	45,60 V	45,40 V

(Sumber: PowMr, Lead Acid Battery Voltage Chart & SOC 12V/24V/48V)

Tabel tersebut menunjukkan bahwa baterai lead-acid 48 V memiliki tegangan yang berbeda pada setiap tingkat kapasitas. Untuk baterai VRLA, kolom yang paling mendekati adalah Sealed Lead Acid, yaitu tipe AGM atau Gel, sesuai

dengan jenis baterai yang digunakan. Pada sistem ini, tabel OCV digunakan untuk menentukan estimasi awal SoC baterai. Jika tegangan baterai berada di atas batas tegangan penuh pada tabel OCV, maka nilai SoC awal dapat dibatasi pada 100% karena tegangan tersebut kemungkinan berasal dari kondisi pengisian atau efek surface charge, bukan tegangan istirahat murni.

2.3.3 Metode Coulomb Counting

Metode Coulomb Counting merupakan teknik estimasi State of Charge (SoC) yang didasarkan pada perhitungan akumulasi arus listrik yang mengalir masuk dan keluar dari baterai terhadap waktu. Metode ini berangkat dari hubungan dasar antara arus dan muatan listrik, di mana arus merupakan laju perubahan muatan terhadap waktu. Secara matematis, hubungan antara arus dan muatan listrik dinyatakan sebagai:

$$I = \frac{dQ}{dt} \rightarrow Q = \int_{t_0}^t I dt \quad (2.4)$$

Estimasi SoC menggunakan metode Coulomb Counting dapat dinyatakan sebagai:

$$SOC(t) = SOC(t_0) \pm \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^t I dt \quad (2.5)$$

Keterangan:

- Q : Muatan listrik (Coulomb)
- $SOC(t_0)$: SOC awal sebelum pengisian/pengosongan
- C_n : Kapasitas maksimum baterai (Ah)
- I : Arus listrik yang masuk atau keluar dari baterai

Tanda pada Persamaan (2.5) mengikuti arah aliran arus baterai, yaitu bertanda positif (+) saat baterai mengalami pengisian (*charge*) karena arus masuk sehingga SoC bertambah, dan bertanda negatif (-) saat baterai mengalami pengosongan (*discharge*) karena arus keluar sehingga SoC berkurang. Metode Coulomb Counting digunakan untuk menentukan nilai State of Charge (SOC) dengan cara menghitung akumulasi arus yang mengalir masuk atau keluar dari baterai terhadap waktu (Afrida and Afandi, no date).

Pada penerapannya, Coulomb Counting membutuhkan nilai SoC awal agar proses estimasi dapat dilakukan. Nilai awal tersebut dapat diperoleh melalui pendekatan OCV. Dengan demikian, OCV digunakan sebagai acuan awal, sedangkan Coulomb Counting digunakan untuk memperbarui nilai SoC berdasarkan arus baterai selama proses pengisian dan pengosongan berlangsung. Pendekatan ini sesuai untuk sistem PLTS off-grid karena baterai bekerja secara dinamis dan nilai SoC perlu diperbarui secara real-time.

2.4 Komponen Elektronika pada Sistem

Komponen elektronika berperan penting dalam proses pemantauan, pengendalian, dan pengaturan energi pada sistem PLTS off-grid. Pada penelitian ini, beberapa komponen digunakan untuk memastikan sistem dapat membaca parameter energi secara akurat dan menjalankan logika kendali secara real time. Komponen-komponen tersebut dijelaskan sebagai berikut.

2.4.1 ESP32

ESP32 merupakan mikrokontroler yang dikembangkan oleh Espressif Systems dengan arsitektur *dual-core* Xtensa 32-bit dan kecepatan operasi hingga 240 MHz. Mikrokontroler ini memiliki jumlah GPIO yang cukup banyak, serta mendukung antarmuka seperti UART, SPI, I2C, dan ADC bawaan. Selain unit pemrosesan, ESP32 telah terintegrasi dengan modul *Wi-Fi* dan *Bluetooth Low Energy (BLE)* sehingga mampu mendukung komunikasi nirkabel tanpa perangkat tambahan (Systems, 2016). Gambar 2.4 menunjukkan bentuk modul mikrokontroler ESP32.



Gambar 2. 4 ESP32
(Sumber: Ruslianto et al., 2023)

2.4.2 PZEM-017 (DC Power Meter)

PZEM-017 merupakan modul pengukuran daya DC yang dirancang untuk memonitor beberapa parameter listrik, yaitu tegangan, arus, daya, dan energi pada sistem arus searah. Modul ini menggunakan shunt resistor eksternal sebagai elemen pengukur arus, di mana penurunan tegangan pada shunt dijadikan dasar untuk menentukan besarnya arus yang mengalir (Li, 1880). Besaran tegangan kemudian diproses bersama nilai arus untuk memperoleh nilai daya DC melalui perhitungan internal modul. PZEM-017 menggunakan komunikasi RS-485 sebagai antarmuka data, yang memungkinkan komunikasi jarak jauh dan mendukung konfigurasi multipoint. Modul ini bersifat pasif dalam pengukuran sehingga memerlukan catu daya eksternal untuk operasionalnya.

Secara umum, prinsip pengukuran daya DC pada modul ini mengacu pada persamaan dasar:

$$P = V \times I \quad (2.6)$$

di mana modul membaca tegangan dan arus secara simultan kemudian menghitung daya serta energi secara otomatis. Kemampuan ini menjadikan PZEM-017 banyak digunakan dalam sistem monitoring dan akuisisi data yang memerlukan pengukuran parameter listrik DC secara praktis.



Gambar 2. 5 PZEM-017 dan Shunt Resistor 100A

2.4.3 Sensor PZEM-004T

Sensor PZEM-004T merupakan modul pengukuran daya AC yang mampu membaca tegangan, arus, daya aktif, energi, frekuensi, dan faktor daya secara real-time. Modul ini banyak digunakan pada sistem monitoring karena pengukuran dilakukan secara digital dan hasilnya dapat diakses melalui komunikasi

UART/RS485. PZEM-004T tersedia dalam dua versi, yaitu tipe 10 A dengan *built-in shunt* dan tipe 100 A yang menggunakan *current transformer* eksternal. Dalam penggunaannya pada sistem monitoring energi, PZEM-004T bekerja dengan membaca parameter listrik dari beban, kemudian mengonversinya menjadi data digital yang dapat diterima mikrokontroler seperti ESP8266/ESP32. Keunggulan modul ini adalah akurasi pengukuran yang tinggi ($\pm 0,5\%$), resolusi data yang baik, serta kemampuan membaca energi sampai 9999.99 kWh (Elektro *et al.*, 2024). Gambar 2.6 menunjukkan bentuk fisik modul PZEM-004T beserta CT (current transformer) yang digunakan untuk pengukuran arus non-invasif.



Gambar 2. 6 Sensor PZEM-004T
(Sumber: Elektro *et al.*, 2024)

2.4.4 Sensor Suhu DS18B20

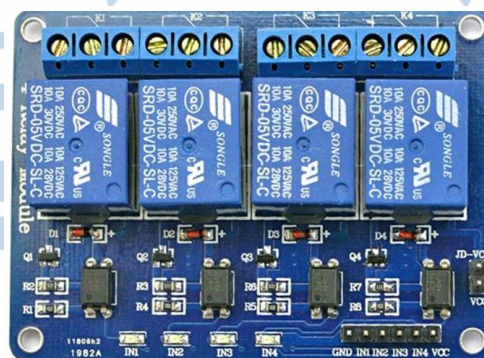
Sensor suhu DS18B20 merupakan sensor digital yang menggunakan protokol komunikasi one-wire, sehingga hanya membutuhkan satu jalur data untuk mengirimkan informasi suhu. Menurut Yakuni and Islamiyah, (2025), sensor ini memiliki akurasi yang baik, mendukung resolusi hingga 12-bit, dan mampu menghasilkan pembacaan suhu yang stabil karena data dikirimkan dalam bentuk digital sehingga tidak terpengaruh noise. DS18B20 tersedia dalam beberapa bentuk kemasan, seperti tipe TO-92 dan probe tahan air, yang memungkinkan penyesuaian penggunaan sesuai kebutuhan monitoring suhu. Sifatnya yang praktis, tahan gangguan, dan mudah diintegrasikan menjadikan sensor ini banyak digunakan dalam berbagai penelitian berbasis mikrokontroler.



Gambar 2. 7 Sensor Suhu DS18B20 TO-92 dan Probe Tahan Air

2.4.5 Relay Modul

Relay merupakan komponen elektronika yang berfungsi sebagai sakelar listrik yang dikendalikan oleh arus bertegangan rendah. Relay bekerja berdasarkan prinsip elektromagnetik, yaitu ketika kumparan dialiri arus, medan magnet akan menarik kontak sehingga rangkaian dapat terbuka atau tertutup. Dengan prinsip tersebut, relay dapat digunakan untuk menghubungkan sistem kendali berdaya rendah dengan beban yang memiliki daya lebih besar. Pada sistem PLTS off-grid, relay digunakan sebagai komponen switching untuk mengatur penyalan dan pemutusan beban sesuai keputusan sistem manajemen energi. Prinsip kerja ini sejalan dengan (Daniel Alexander Octavianus Turang, 2015), yang menyatakan bahwa relay bekerja sebagai sakelar elektronik berbasis elektromagnetik untuk membuka dan menutup kontak rangkaian.



Gambar 2. 8 Relay Module TS0011
(Sumber: Level et al., n.d.)

2.4.6 Power Supply

Power supply merupakan rangkaian elektronika yang berfungsi untuk mengubah arus listrik bolak-balik (AC) menjadi arus listrik searah (DC). Tegangan keluaran dari power supply digunakan sebagai sumber daya untuk mengoperasikan berbagai perangkat elektronika. Dalam suatu sistem elektronika, power supply memiliki peran penting karena berfungsi sebagai penyedia energi listrik agar komponen atau rangkaian dapat bekerja dengan baik. Beberapa komponen yang umumnya digunakan dalam rangkaian power supply antara lain resistor, LED, transistor TIP2955, diode bridge, IC 7805, fuse 250 V, dan trafo 1 A (Saodah & Ramdani, 2020).



Gambar 2. 9 Adaptor Power Supply

2.5 Komponen Kelistrikan Pada Sistem

Komponen kelistrikan berperan penting dalam menjaga keamanan, keandalan, dan kestabilan distribusi daya pada sistem PLTS off-grid. Selain komponen elektronika yang digunakan untuk pemantauan dan pengendalian, sistem ini juga membutuhkan komponen kelistrikan sebagai proteksi dan penghubung daya antara inverter, baterai, dan beban. Pada penelitian ini, beberapa komponen kelistrikan digunakan untuk melindungi sistem dari gangguan seperti arus lebih, hubung singkat, serta untuk mengatur penyambungan dan pemutusan beban secara aman. Komponen-komponen tersebut meliputi Miniature Circuit Breaker (MCB), dan kontaktor, yang dijelaskan pada subbab berikut.

2.5.1 Kontaktor

Kontaktor merupakan sakelar elektromagnetik yang digunakan untuk mengendalikan aliran listrik ke motor, baik untuk keperluan pengoperasian maupun sebagai bagian dari sistem proteksi. Dengan menggunakan kontaktor, sistem pengaman dapat dirancang untuk memutus arus listrik secara otomatis ketika terjadi kondisi abnormal, seperti arus berlebih atau korsleting, sehingga motor tetap berada dalam kondisi aman. Secara prinsip kerja, kontaktor terdiri dari kumparan (coil) dan kontak utama. Ketika arus listrik mengalir melalui kumparan, inti besi pada kumparan akan berubah sifat menjadi magnet. Gaya tarik magnet ini digunakan untuk menarik angker sehingga kontak utama dapat menutup atau membuka rangkaian listrik. Mekanisme tersebut memungkinkan pengendalian beban berdaya besar menggunakan sinyal kendali berdaya kecil, sehingga meningkatkan keselamatan dan keandalan sistem kelistrikan (Khaldan *et al.*, 2024).



Gambar 2. 10 Kontaktor

2.5.2 Miniature Circuit Breaker (MCB)

Miniature Circuit Breaker (MCB) merupakan komponen proteksi listrik yang berfungsi untuk memutus aliran listrik ketika terjadi arus lebih pada rangkaian. Arus lebih tersebut dapat disebabkan oleh beban lebih maupun hubung singkat. Pada kondisi beban lebih, MCB bekerja melalui strip bimetal yang akan melengkung ketika arus melebihi nilai nominalnya, sehingga aliran listrik terputus. Pada kondisi hubung singkat, MCB bekerja melalui prinsip elektromagnetik untuk menggerakkan mekanisme pemutus secara cepat.

Semakin besar arus gangguan yang terjadi, maka waktu pemutusan atau trip pada MCB akan semakin cepat. Hal ini bertujuan untuk melindungi instalasi dan beban dari kerusakan, serta mengurangi risiko percikan api akibat arus hubung singkat (Akhir and Kunci, 2023). Pada sistem ini, MCB digunakan sebagai proteksi utama pada jalur keluaran inverter dan jalur distribusi beban. Penggunaan MCB bertujuan untuk memutus rangkaian apabila terjadi arus lebih atau gangguan hubung singkat pada sistem kelistrikan.



Gambar 2. 11 Miniature Circuit Breaker (MCB)

2.6 Prinsip Dasar Manajemen Energi

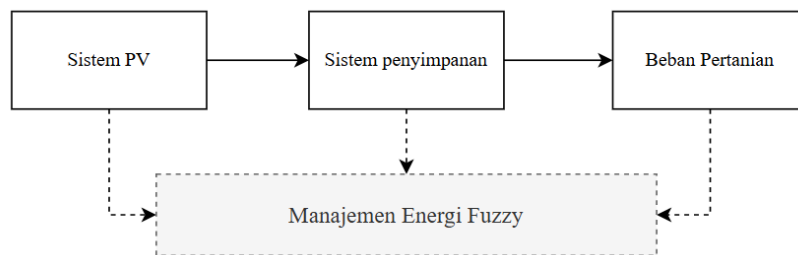
Manajemen energi (Energy Management System/EMS) merupakan suatu sistem yang berfungsi mengatur distribusi dan penggunaan energi agar ketersediaan daya dari sumber energi dapat memenuhi kebutuhan beban secara optimal. Pada sistem PLTS *off-grid*, EMS berperan dalam mengelola aliran energi antara panel surya, baterai, dan beban sehingga dapat mencegah kondisi *overload*, mengurangi risiko *over-discharge* pada baterai, serta menjaga kontinuitas suplai daya sesuai kondisi energi yang tersedia. Manajemen energi (Energy Management System / EMS) bertujuan menjaga keseimbangan antara produksi energi oleh PV, penyimpanan dalam baterai, dan konsumsi daya oleh beban. Hubungan umumnya dapat dinyatakan sebagai

$$P_{PV} = P_{load} + P_{batt} \quad (2.7)$$

Apabila $P_{PV} > P_{load}$, maka kelebihan energi dialirkan untuk mengisi baterai, sedangkan apabila $P_{PV} < P_{load}$, energi tambahan diambil dari baterai untuk menjaga kontinuitas suplai. Besaran turunan yang sering digunakan adalah selisih daya El Zerk and Ouassaid, (2023) menjelaskan konsep tersebut pada sistem hibrida PV–Wind–Battery melalui formulasi daya bersih yang memperhitungkan kontribusi masing-masing sumber energi. Namun karena penelitian ini hanya menggunakan panel surya sebagai sumber tunggal, formulasi tersebut disesuaikan sehingga hanya melibatkan daya keluaran PV dan kebutuhan daya beban. Dengan demikian, persamaan yang digunakan dalam penelitian ini direduksi menjadi:

$$P_{selisih} = P_{PV} - P_{load} \quad (2.8)$$

Persamaan tersebut merepresentasikan perbedaan antara daya yang dihasilkan panel surya dan daya yang diperlukan oleh beban, serta menjadi dasar dalam menentukan mode operasi sistem manajemen energi pada PLTS off-grid.

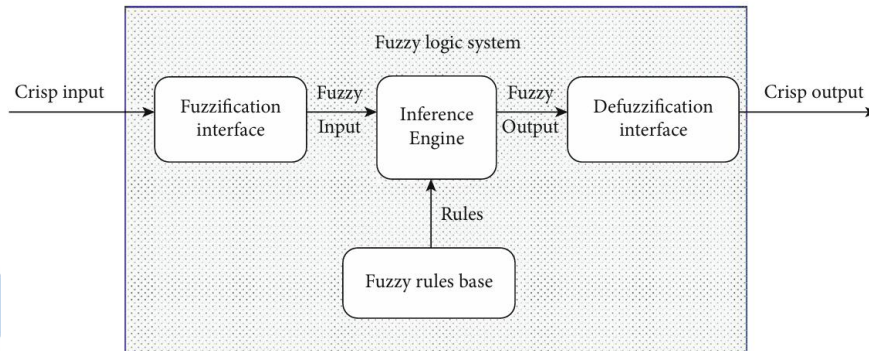


Gambar 2. 12 Blok diagram EMS berbasis fuzzy pada PLTS off-grid.
(Sumber: Penulis).

Gambar 2.13 menunjukkan hubungan antara sistem PV, sistem penyimpanan (baterai), dan beban pertanian. Aliran energi utama mengalir dari panel surya menuju baterai dan beban, sementara sistem manajemen energi menerima informasi dari panel surya, baterai, dan beban untuk menentukan kondisi operasi serta level beban aktif. Mode operasi ditentukan berdasarkan keseimbangan daya, sedangkan level beban aktif ditentukan menggunakan Fuzzy Logic Controller, seperti *charging*, *discharging*, atau *idle*. Pendekatan ini memungkinkan pengaturan daya secara adaptif terhadap kondisi iradiasi matahari dan tingkat pengisian baterai.

2.7 Fuzzy Logic Control (FLC)

Fuzzy Logic Control (FLC) merupakan metode kontrol berbasis logika linguistik yang diperkenalkan oleh Lotfi Zadeh pada tahun 1965. FLC memungkinkan pengambilan keputusan yang fleksibel dan adaptif dalam kondisi sistem yang tidak pasti atau tidak dapat dimodelkan secara matematis secara presisi (Zadeh, 1965).



Gambar 2. 13 Struktur umum sistem kontrol fuzzy.
(Sumber: Samavat et al., 2023)

Secara umum, struktur FLC terdiri dari empat tahapan utama, yaitu fuzzifikasi, basis aturan (rule base), inferensi, dan defuzzifikasi, sebagaimana dijelaskan berikut.

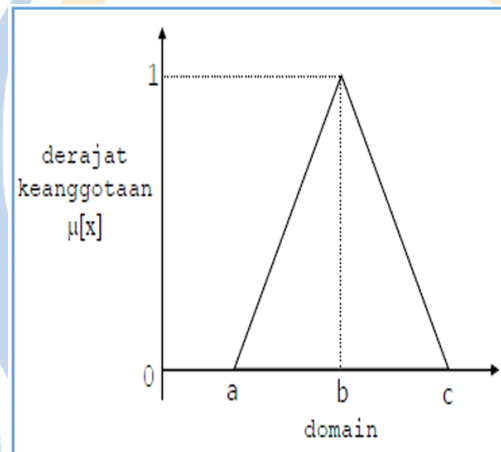
2.7.1 Fuzzifikasi

Fuzzifikasi adalah tahap pertama dalam sistem fuzzy yang bertujuan mengubah nilai input crisp menjadi nilai fuzzy melalui fungsi keanggotaan (*membership function*). Dua jenis fungsi keanggotaan yang sering digunakan dalam sistem energi adalah fungsi segitiga (triangular) dan fungsi trapesium (trapezoidal) karena keduanya memiliki bentuk sederhana dan mampu menghasilkan transisi nilai yang halus. Bentuk matematis fungsi keanggotaan segitiga dinyatakan sebagai:

$$\mu(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b < x < c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (2.9)$$

(Langi, 2019)

Fungsi segitiga pada dasarnya merupakan gabungan antara dua kurva linear, yaitu linear naik dan linear turun. Disebut segitiga karena bentuk grafiknya membentuk bidang segitiga. Fungsi ini sering digunakan karena mampu merepresentasikan perubahan variabel yang halus dan kontinu, seperti perubahan State of Charge (SoC) atau intensitas iradiasi matahari.



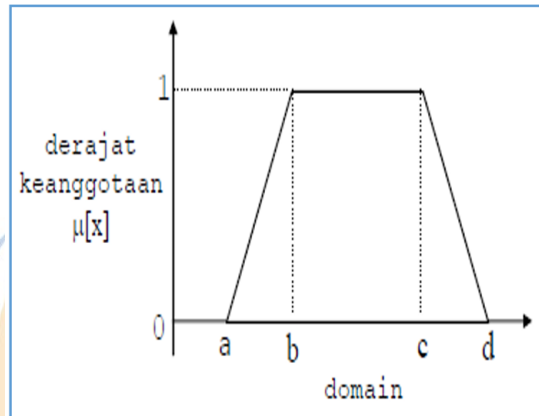
Gambar 2. 14 Kurva fungsi keanggotaan segitiga
(Sumber: Langi, 2019)

Sedangkan fungsi keanggotaan trapesium dituliskan sebagai:

$$\mu(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x \leq b \\ 1, & b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c < x < d \\ 0, & x \geq d \end{cases} \quad (2.10)$$

(Langi, 2019)

Fungsi trapesium memiliki dua sisi linear dan dua sisi datar, membentuk bidang seperti trapesium. Fungsi ini cocok digunakan untuk merepresentasikan kondisi yang memiliki nilai konstan pada rentang tertentu, misalnya ketika variabel dianggap stabil pada interval nilai menengah.



Gambar 2. 15 Kurva fungsi keanggotaan trapesium
(Sumber: Langi, 2019)

2.7.2 Basis Aturan (Rule Base)

Tahap kedua adalah pembentukan basis aturan yang terdiri dari sekumpulan aturan *if-then* yang mendeskripsikan hubungan antara variabel input dan output. Aturan ini dibentuk berdasarkan pengetahuan pakar, hasil observasi, atau penelitian terdahulu. Bentuk umum dari aturan fuzzy ditulis sebagai:

$$\text{IF } X_1 \text{ is } A_1 \text{ AND } X_2 \text{ is } A_2 \text{ THEN } Y \text{ is } B \quad (2.11)$$

(Langi, 2019)

di mana X_1 dan X_2 adalah variabel input dengan himpunan fuzzy A_1 dan A_2 , sedangkan Y adalah variabel output dengan himpunan fuzzy B .

2.7.3 Inferensi Fuzzy

Inferensi fuzzy merupakan proses utama dalam sistem logika fuzzy yang berfungsi menentukan keluaran berdasarkan aturan-aturan *if-then* yang telah didefinisikan. Proses ini melibatkan dua tahap utama, yaitu implikasi dan agregasi (Langi, 2019). Pada tahap implikasi, nilai keanggotaan hasil evaluasi premis (*antecedent*) dipadankan dengan konsekuen menggunakan operator MIN. Nilai minimum diambil sebagai derajat kebenaran dari aturan yang aktif, sebagaimana ditunjukkan oleh persamaan:

$$\mu_{A_i \rightarrow B_i}(y) = \min[\mu_{A_i}(x), \mu_{B_i}(y)] \quad (2.12)$$

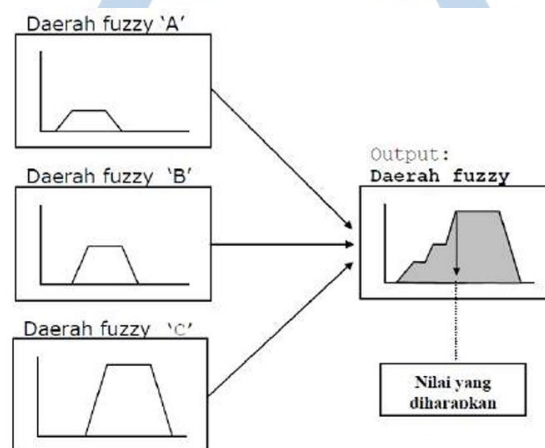
Selanjutnya, pada tahap agregasi, seluruh hasil implikasi dari aturan-aturan yang aktif digabung menggunakan operator MAX untuk membentuk keluaran gabungan (*aggregated fuzzy output*):

$$\mu_{output}(y) = \max_i[\mu_{A_i \rightarrow B_i}(y)] \quad (2.13)$$

Metode inferensi MIN–MAX ini banyak digunakan pada sistem Mamdani karena sederhana, intuitif, dan mampu menghasilkan respon yang halus terhadap perubahan masukan (Langi, 2019).

2.7.4 Defuzzifikasi

Defuzzifikasi merupakan tahap akhir dalam sistem inferensi fuzzy yang berfungsi untuk mengubah keluaran berupa himpunan fuzzy menjadi nilai crisp. Proses ini diperlukan karena hasil inferensi fuzzy biasanya berupa kurva keanggotaan yang menggambarkan distribusi kemungkinan nilai output, sementara sistem fisik memerlukan satu nilai numerik tunggal untuk dieksekusi. Menurut (Langi, 2019), defuzzifikasi dilakukan terhadap hasil komposisi aturan fuzzy pada sistem Mamdani untuk memperoleh nilai representatif dari suatu himpunan fuzzy.



Gambar 2. 16 Ilustrasi proses defuzzifikasi pada sistem Mamdani
(Sumber: Langi, 2019)

Salah satu metode defuzzifikasi yang paling banyak digunakan adalah metode Centroid (Composite Moment), yaitu metode yang menentukan nilai crisp z^* berdasarkan titik pusat massa (center of gravity) dari area fuzzy. Metode ini

mempertimbangkan seluruh bentuk kurva keanggotaan sehingga memberikan hasil yang seimbang.

Rumus umum metode centroid dituliskan sebagai:

$$z^* = \frac{\int z \mu(z) dz}{\int \mu(z) dz} \quad (2.14)$$

atau dalam bentuk diskrit:

$$z^* = \frac{\sum_{j=1}^n z_j \mu(z_j)}{\sum_{j=1}^n \mu(z_j)} \quad (2.15)$$

2.8 Penelitian Terdahulu

Penelitian tugas akhir ini memiliki keterkaitan dengan penelitian-penelitian sebelumnya. Penelitian terdahulu yang relevan dengan penelitian ini terlampir dalam Tabel 2.3.

Tabel 2. 3 Penelitian Terdahulu

No.	Peneliti	Hasil
1	Samavat dkk., 2023	Teknologi: Fuzzy Logic Controller Mamdani & Sugeno, sistem energi terbarukan. Fitur/Metode Utama: Studi komparatif untuk menganalisis perbedaan respons kedua metode fuzzy pada sistem energi nonlinier. Hasilnya menunjukkan Mamdani lebih stabil untuk kondisi iradiasi bervariasi, sedangkan Sugeno lebih cepat secara komputasi.
2	El Zerk & Ouassaid, 2023	Teknologi: Hybrid EMS berbasis fuzzy, sistem PV–baterai. Fitur/Metode Utama: Merancang skema pengaturan energi menggunakan fuzzy untuk menstabilkan tegangan dan mengatur aliran daya pada kondisi cuaca berubah. Pendekatan ini meningkatkan keandalan suplai daya dan kinerja penyimpanan baterai.

No.	Peneliti	Hasil
3	Mursid, 2024	Teknologi: NodeMCU IoT, sensor tegangan & arus, kontrol PLTS. Fitur/Metode Utama: Sistem kontrol PLTS berbasis IoT yang memantau kondisi baterai dan proteksi beban secara real-time. Penelitian menunjukkan akurasi pembacaan sensor meningkat, namun kontrol berbasis rule-based masih kurang adaptif terhadap fluktuasi beban.
4	Nayebare dkk., 2025	Teknologi: Smart load control, IoT energy gateway, renewable energy management. Fitur/Metode Utama: Mengembangkan pengendalian beban adaptif berbasis IoT pada hybrid PV–battery–grid. Sistem mampu mengatur prioritas beban secara otomatis sehingga meningkatkan efisiensi penggunaan energi terbarukan.
5	Jurnal Energi Indonesia, 2025	Teknologi: PLTS off-grid, IoT-based monitoring, manajemen daya. Fitur/Metode Utama: Merancang sistem monitoring dan kendali PLTS untuk aplikasi lapangan. Hasil penelitian menunjukkan kestabilan suplai meningkat ketika PV, baterai, dan beban dikelola dengan pengukuran real-time dan strategi pengendalian otomatis.