

BAB II DASAR TEORI

2.1 Penelitian terdahulu

Penelitian sebelumnya mengevaluasi kinerja operasional PLTS on-grid yang diterapkan pada gedung komersial, tepatnya di BPR BKK Mandiraja Cabang Wanayasa Banjarnegara dengan kapasitas 3×400 Wp. Melalui analisis profil beban harian sebesar 9.619 Wh pada hari kerja, ditemukan bahwa pasokan energi yang diimpor dari jala - jala PLN masih 7 hingga 10 kali lebih besar dibandingkan dengan porsi energi ekspor yang dihasilkan oleh solar panel. Penemuan ini mengindikasikan perlunya perancangan sistem manajemen energi yang lebih cerdas untuk menekan dominasi daya PLN dan memaksimalkan pemanfaatan daya surya secara mandiri [8].

Penelitian sebelumnya mengkaji penerapan metode *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) berbasis *Fuzzy Logic* Controller dan Zeta Converter untuk mengoptimalkan daya keluaran panel surya. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode *Fuzzy Logic* mampu meningkatkan akurasi pelacakan titik daya maksimum sehingga efisiensi sistem dapat ditingkatkan. Namun, penelitian tersebut masih menggunakan pendekatan simulasi sehingga belum merepresentasikan kondisi operasional sistem secara aktual di lapangan [4].

Penelitian sebelumnya melakukan pemetaan potensi PLTS *rooftop* di area kampus Universitas Mataram menggunakan parameter *Global Horizontal Irradiation* (GHI) dari basis data *Global Solar Atlas*, di mana hasil konversi energinya membuktikan bahwa platform tersebut sangat andal untuk menghitung estimasi produksi daya tahunan skala fasilitas gedung secara akurat [9].

Penelitian lainnya mengembangkan sistem manajemen energi pada PLTS berbasis Internet of Things (IoT) yang memanfaatkan NodeMCU ESP8266, sensor INA219, dan aplikasi Blynk untuk melakukan monitoring serta pengendalian sistem secara jarak jauh. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penerapan teknologi IoT mampu meningkatkan efektivitas proses pemantauan dan pengelolaan energi pada sistem PLTS melalui komunikasi berbasis internet. Namun, penelitian tersebut belum menerapkan metode

Fuzzy Logic sebagai pendekatan dalam proses pengambilan keputusan manajemen energi [10].

Penelitian lainnya mengembangkan sistem pemantauan panel surya berbasis *Internet of Things* (IoT) untuk memperoleh data operasional secara real-time. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem mampu mengirimkan informasi tegangan, arus, dan daya sehingga mendukung pengawasan kinerja PLTS secara lebih efektif. Namun, data hasil monitoring tersebut belum dimanfaatkan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam Energy Management System (EMS) [6].

Penelitian sebelumnya dari Murdianto dkk. (2025) mengembangkan prototipe *smart microgrid* terintegrasi yang dilengkapi dengan sistem manajemen energi (*Energy Management System* - EMS) berbasis *Fuzzy Logic*, di mana hasil pengujian membuktikan bahwa penerapan EMS tersebut berhasil memantau fluktuasi daya serta mengatur aliran pembagian energi antara solar panel dan media penyimpanan baterai secara mandiri [7].

Berdasarkan penelitian terdahulu, dapat diketahui bahwa penelitian mengenai *Energy Management System* (EMS) berbasis *Fuzzy Logic* untuk optimalisasi pemanfaatan energi PLTS terhubung jaringan (*on-grid*) telah banyak dikembangkan, baik dalam hal pemetaan potensi iradiasi menggunakan *Global Solar Atlas* (GSA), pelacakan daya maksimum MPPT, hingga pemantauan beban berbasis *Internet of Things* (IoT). Namun, sebagian besar riset terdahulu masih berfokus pada pemodelan simulasi murni tanpa menyinkronkan spesifikasi kapasitas fisik riil, atau sistem pemantauan IoT yang belum terintegrasi dengan algoritma pembuat keputusan cerdas untuk pembagian daya multidomain. Oleh karena itu, penelitian ini hadir untuk mengisi *research gap* tersebut dengan mengintegrasikan karakteristik data elektrikal makro hasil konversi iradiasi Surabaya dari GSA, profil fluktuasi beban dinamis Kantin Sehat Universitas Muhammadiyah Surabaya, dan kecerdasan *Fuzzy Logic* Mamdani sebagai otak pengontrol EMS guna mengoptimalkan manajemen pembagian daya paralel (*load sharing*) antara PLTS dan *grid* PLN secara langsung, serta menekan ketergantungan suplai daya dari PLN secara optimal.

2.2 Dasar Teori

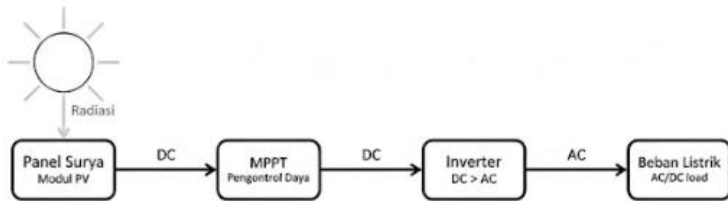
Pada era transisi energi saat ini, pemanfaatan energi terbarukan menjadi salah satu solusi krusial untuk mewujudkan konsep kampus hijau (*green campus*) sekaligus mengurangi ketergantungan terhadap energi fosil konvensional. Salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi melimpah di wilayah Kota Surabaya adalah energi surya yang dimanfaatkan melalui sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS). Penggunaan PLTS terus dikembangkan secara nyata, salah satunya melalui implementasi sistem PLTS terhubung jaringan (*grid-connected / on-grid*) berkapasitas 4.500 Wp yang telah terpasang di Laboratorium Terpadu Universitas Muhammadiyah Surabaya untuk menyuplai langsung kebutuhan listrik operasional Kantin Sehat secara paralel dengan jaringan utama.

Namun, daya keluaran spesifik dari PLTS sangat dipengaruhi oleh fluktuasi kondisi lingkungan makro seperti intensitas iradiasi matahari harian dan temperatur sel fotovoltaik yang berubah secara dinamis. Oleh karena itu, diperlukan integrasi teknologi pengondisi daya berupa *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk melacak titik daya maksimum panel surya secara seketika. Parameter elektrik makro hasil keluaran MPPT (Tegangan, Arus, dan Daya) yang diperoleh dari konversi data potensi *Global Solar Atlas* (GSA) ini kemudian dijadikan sebagai basis data primer dalam perancangan sistem pembuat keputusan.

Akurasi data operasional elektrik tersebut dimanfaatkan sebagai dasar pengambilan keputusan dalam *Energy Management System* (EMS) untuk mengatur regulasi aliran daya langsung (*direct consumption*) dan penetrasi energi antara PLTS dan jala-jala utama PLN menuju beban. Metode *Fuzzy Logic* tipe Mamdani dipilih sebagai algoritma pengontrol pada EMS karena keandalannya dalam menangani ketidakpastian (*uncertainty*) cuaca serta fluktuasi dinamis beban riil Kantin Sehat Universitas Muhammadiyah Surabaya berdasarkan klasifikasi empat periode waktu pengamatan (Pagi, Siang, Sore, dan Malam). Oleh karena itu, pemahaman mendalam mengenai prinsip kerja PLTS *on-grid*, komponen MPPT, pemodelan data berbasis GSA, arsitektur EMS, dan perancangan kontroler *Fuzzy Logic* Mamdani menjadi landasan teoritis yang sangat penting dan saling mengikat dalam penelitian ini.

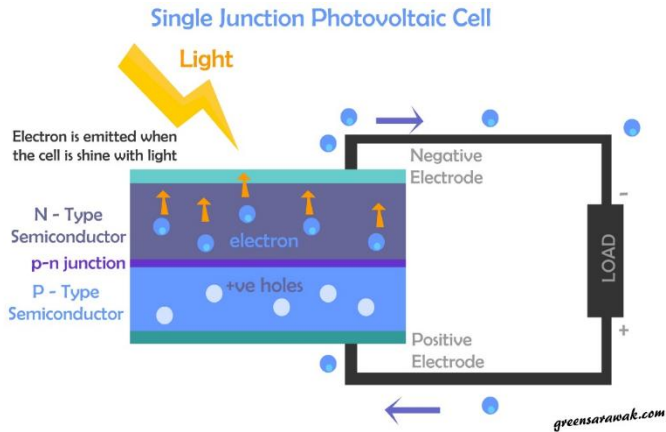
2.2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem pembangkit listrik yang mengubah energi radiasi matahari menjadi energi listrik melalui teknologi fotovoltaik. Pemanfaatan PLTS terus berkembang seiring meningkatnya kebutuhan energi dan upaya pengurangan penggunaan bahan bakar fosil. Sistem PLTS memiliki keunggulan berupa sumber energi yang melimpah, ramah lingkungan, serta dapat diterapkan pada berbagai skala kebutuhan, mulai dari rumah tangga hingga fasilitas publik. Dalam implementasinya, kinerja PLTS dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti intensitas radiasi matahari, temperatur lingkungan, spesifikasi modul surya, dan konfigurasi sistem yang digunakan. Oleh karena itu, perancangan dan pengoperasian PLTS yang tepat sangat diperlukan untuk memperoleh energi listrik yang optimal [11].



Gambar 2. 1 Skema Sistem PLTS

Berdasarkan diagram blok pada Gambar 2.1, aliran daya dari sistem PLTS terhubung langsung ke beban tanpa melalui media penyimpanan energi (baterai). Radiasi matahari yang diterima oleh Panel Surya dikonversi menjadi arus searah (DC), yang kemudian dioptimalkan daya keluarannya oleh komponen MPPT (*Maximum Power Point Tracking*). Selanjutnya, daya DC tersebut dialirkan menuju Inverter untuk diubah menjadi arus bolak-balik (AC) guna menyuplai Beban Listrik secara paralel bersama jaringan utilitas utama (Grid PLN).



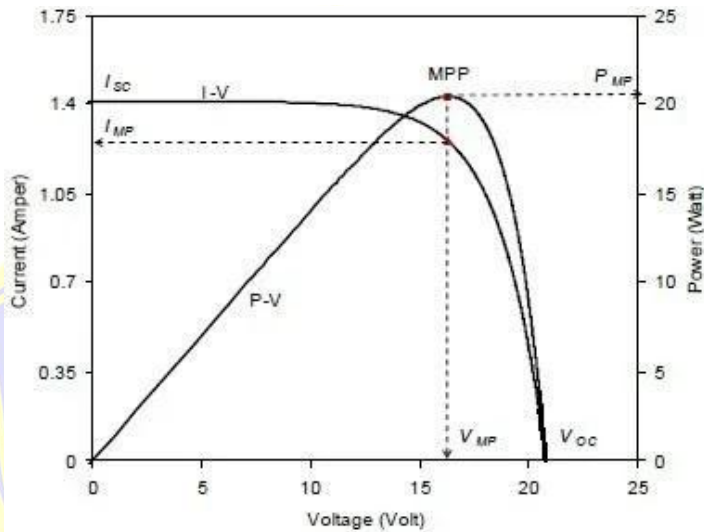
Gambar 2. 2 Proses konversi energi pada sel surya melalui efek fotovoltaiik
(Sumber : <https://greensarawak.com/photovoltaic-harvesting-the-power-of-the-sun/>)

Proses ini menunjukkan bahwa arus listrik pada sel surya merupakan hasil interaksi antara foton dan material semikonduktor yang kemudian menghasilkan gaya gerak listrik (tegangan) pada terminal sel. Dengan demikian, PLTS bekerja melalui konversi energi radiasi matahari menjadi energi listrik yang sangat dipengaruhi oleh karakteristik material semikonduktor dan desain sambungan p-n [12].

Kinerja panel surya dapat dianalisis melalui karakteristik arus-tegangan (*I-V Curve*) dan daya-tegangan (*P-V Curve*). Kurva I-V menunjukkan hubungan antara arus keluaran terhadap tegangan panel surya, sedangkan kurva P-V menunjukkan hubungan antara daya keluaran terhadap tegangan panel surya. Besarnya daya keluaran panel surya diperoleh dari hasil perkalian antara tegangan dan arus yang dihasilkan, yang secara matematis dirumuskan sebagai:

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

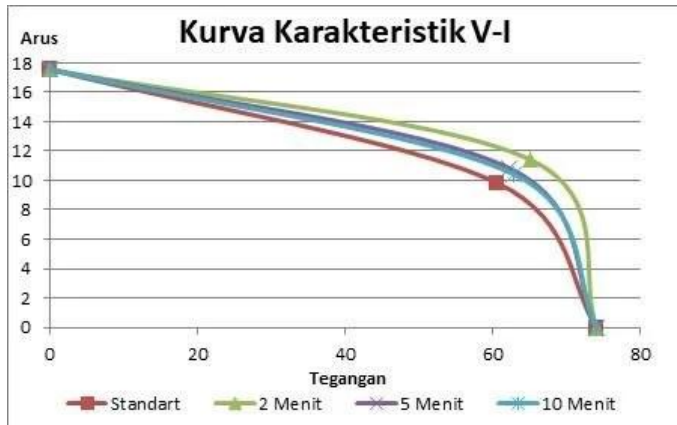
dengan P merupakan daya keluaran (W), V adalah tegangan (V), dan I adalah arus (A). Berdasarkan hubungan tersebut, perubahan nilai tegangan maupun arus akan memengaruhi daya yang dihasilkan panel surya. Pada kurva P - V terdapat titik operasi optimum yang disebut *Maximum Power Point* (MPP), yaitu kondisi ketika panel surya menghasilkan daya maksimum pada kondisi lingkungan tertentu [13].



Gambar 2.3 Karakteristik kurva I - V dan P - V panel surya beserta titik MPP

(Sumber : https://www.researchgate.net/figure/Typical-I-V-and-P-V-curves-for-PV-module-6_fig5_325885967)

Selain dipengaruhi oleh karakteristik Listrik panel, daya keluaran Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) tidak hanya dipengaruhi oleh karakteristik listrik dari panel surya, tetapi juga sangat bergantung pada intensitas radiasi matahari (irradiance) yang diterima oleh permukaan modul. Semakin besar energi radiasi matahari yang mengenai permukaan panel, maka semakin besar pula energi listrik yang dapat dihasilkan karena proses konversi fotovoltaik berlangsung lebih optimal.



Gambar 2. 4 Pengaruh intensitas radiasi matahari terhadap kurva I-V panel surya

(Sumber : https://www.researchgate.net/figure/Gambar-5-Grafik-Perbandingan-Kurva-Karakteristik-V-I-B-Analisis-Suhu-Modul-Panel-Surya_fig1_355026983)

Hubungan antara daya keluaran panel surya, efisiensi panel, luas permukaan panel, dan intensitas radiasi matahari secara umum dapat dinyatakan melalui persamaan :

$$P_{out} = \eta GA \dots \dots \dots (2.2)$$

dengan P_{out} merupakan daya keluaran panel surya (W), η adalah efisiensi panel, G adalah intensitas radiasi matahari (W/m^2), dan A adalah luas permukaan panel (m^2). Persamaan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan nilai irradiance akan meningkatkan daya keluaran panel surya apabila efisiensi dan luas permukaan panel dianggap tetap, sebagaimana juga dijelaskan dalam studi pemodelan performa sistem fotovoltaik pada jurnal *Renewable Energy*, yang menyatakan bahwa output daya PV berbanding lurus dengan irradiance yang diterima modul dan luas area aktif panel [14].

Selain dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari, temperatur permukaan panel surya juga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap performa sistem fotovoltaik. Peningkatan temperatur kerja panel surya umumnya menyebabkan penurunan tegangan keluaran, sehingga daya maksimum yang dihasilkan menjadi lebih kecil.

Hal ini dikarenakan karakteristik semikonduktor pada sel surya sangat sensitif terhadap perubahan suhu operasi. Berdasarkan persamaan :

$$P_T = P_{ref} [1 - \beta (T - T_{ref})] \dots\dots\dots(2.3)$$

dengan P_T merupakan daya pada temperatur aktual, P_{ref} adalah daya pada kondisi referensi, β adalah koefisien temperatur panel, T merupakan temperatur aktual panel, dan T_{ref} adalah temperatur referensi. Berdasarkan persamaan tersebut dapat diketahui bahwa kenaikan temperatur panel surya akan menyebabkan penurunan daya keluaran. Oleh karena itu, perubahan iradiasi dan temperatur menyebabkan posisi *Maximum Power Point* (MPP) selalu berubah sehingga diperlukan sistem *Maximum Power Point Tracking* (MPPT) untuk mempertahankan operasi panel surya pada titik daya maksimum [13].

energi listrik total yang dihasilkan panel surya selama selang waktu tertentu dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$E = P \times t \dots\dots\dots(2.4)$$

dengan E adalah energi listrik (Wh), P adalah daya keluaran (W), dan t adalah waktu operasi (jam). Kedua persamaan tersebut menjadi dasar dalam menghitung potensi dan kinerja sistem PLTS secara keseluruhan [15].

Dalam praktiknya, daya keluaran aktual sistem PLTS di lapangan hampir selalu lebih rendah dibandingkan kapasitas *nameplate*-nya yang diukur pada *Standard Test Condition* (STC). Hal ini terjadi karena adanya berbagai jenis kehilangan daya (*power losses*) yang terakumulasi sepanjang rantai konversi energi, mulai dari sisi panel surya hingga sisi keluaran sistem. Beberapa komponen rugi-rugi utama yang umum diperhitungkan antara lain kehilangan akibat kenaikan suhu permukaan modul di atas kondisi STC (*temperature loss*), penumpukan debu dan kotoran pada permukaan panel

yang menghalangi penyerapan cahaya (*soiling loss*), serta bayangan dari objek sekitar seperti pohon maupun bangunan yang menutupi sebagian permukaan modul (*shading loss*).

Studi kinerja PLTS berkapasitas 26,4 kWp pada sistem *smart microgrid* menunjukkan bahwa selisih antara produksi energi hasil simulasi dan produksi energi riil di lapangan disebabkan oleh kombinasi faktor bayangan, tingkat kebersihan modul surya, dan orientasi pemasangan panel, yang secara langsung menurunkan nilai keluaran aktual sistem dibandingkan potensi teoritisnya [36]. Sejalan dengan hal tersebut, studi kinerja PLTS *on-grid* 50 kWp turut mengonfirmasi bahwa faktor bayangan (*shading*) menjadi salah satu penyebab dominan turunnya nilai keluaran pada larik panel surya tertentu dibandingkan hasil simulasi awal, sehingga variabel ini perlu dimasukkan sebagai salah satu komponen faktor rugi-rugi dalam perhitungan kapasitas riil sistem PLTS [16].

Seluruh komponen kehilangan daya tersebut, ditambah dengan rugi-rugi pada sisi pengkabelan dan konektor, secara kumulatif direpresentasikan ke dalam satu nilai faktor rugi-rugi gabungan (F_k) agar perhitungan kapasitas dan validasi daya sistem PLTS lebih mendekati kondisi operasional aktual, sebagaimana dirumuskan pada Persamaan (2.5) dan (2.6).

$$P_{dc} = G \times A \times \eta \times F_k \dots \dots \dots (2.5)$$

Dengan P_{dc} merupakan daya keluaran searah dari panel surya menuju input MPPT (W), G adalah nilai intensitas iradiasi matahari (W/m^2), A adalah luas total permukaan panel surya (m^2), η adalah efisiensi elektrik nominal modul fotovoltaik (%), dan F_k adalah faktor rugi-rugi gabungan (*combined derating factor*) yang merepresentasikan seluruh kehilangan daya tersebut. Untuk memvalidasi kapasitas puncak sistem terhadap spesifikasi *nameplate* pada kondisi STC ($G_{stc} = 1000 W/m^2$), persamaan tersebut dinyatakan sebagai:

$$P_{mp_total} = G_{stc} \times \eta \times F_k \dots \dots \dots (2.6)$$

2.2.2 Maximum Power Point Tracking (MPPT)

Maximum Power Point Tracking (MPPT) merupakan suatu metode atau sistem yang digunakan untuk mengoptimalkan pengoperasian panel surya agar selalu bekerja pada titik daya maksimum (*Maximum Power Point*) yang terdapat pada kurva karakteristik daya terhadap tegangan ($P-V$). Peran Maximum Power Point Tracking (MPPT) pada sistem panel surya adalah mengatur titik kerja modul agar selalu berada pada kondisi daya maksimum (*Maximum Power Point*), sehingga proses penyaluran daya dari panel dapat dioptimalkan. Dengan menjaga operasi pada titik tersebut, energi yang dihasilkan dari modul fotovoltaik dapat dimanfaatkan secara lebih maksimal dan pada akhirnya meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem panel surya [17].

Maximum Power Point Tracking (MPPT) digunakan untuk menentukan titik daya maksimum dari kurva karakteristik $P-V$ pada panel surya dengan memanfaatkan konverter daya sebagai pengatur kondisi kerja sistem. Dengan cara ini, MPPT mampu menyesuaikan tegangan dan arus kerja panel surya agar selalu berada pada titik operasi optimal, sehingga energi yang dihasilkan dapat dimaksimalkan sesuai dengan perubahan kondisi lingkungan [18]. Hal ini diperlukan karena perubahan intensitas penyinaran matahari dan temperatur permukaan panel surya menyebabkan karakteristik keluaran daya menjadi tidak stabil dan terus berubah sesuai kondisi lingkungan. Perubahan tersebut dapat memengaruhi titik kerja panel surya sehingga daya yang dihasilkan tidak selalu berada pada kondisi maksimum. Oleh karena itu, diperlukan metode Maximum Power Point Tracking (MPPT) untuk mengatur titik operasi panel surya agar tetap berada pada kondisi optimal, sehingga daya keluaran dapat dimaksimalkan secara berkelanjutan [19].

Kondisi sel surya dipengaruhi oleh perubahan suhu dan intensitas radiasi matahari yang bersifat dinamis, sehingga menyebabkan nilai tegangan dan arus tidak dapat dipertahankan pada kondisi optimal secara simultan. Berdasarkan karakteristik kurva daya–tegangan, terdapat satu titik operasi yang menghasilkan daya keluaran maksimum pada kondisi tertentu. Titik tersebut dapat diidentifikasi melalui metode *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Pengaturan *duty cycle* pada sinyal Pulse Width Modulation (PWM) melalui konverter DC-DC digunakan untuk mengatur titik kerja modul surya agar senantiasa berada pada kondisi daya maksimum [20].

Dalam sistem MPPT, terdapat beberapa parameter utama yang dipantau secara real-time. Parameter tersebut meliputi tegangan panel surya (*PV Voltage*) dalam satuan Volt (V), arus panel surya (*PV Current*) dalam satuan Ampere (A), daya panel surya (*PV Power*) dalam satuan Watt (W) yang diperoleh dari perkalian *PV Voltage* dan *PV Current* sebagaimana telah dijelaskan pada persamaan sebelumnya, serta tegangan baterai (*Battery Voltage*) dalam satuan Volt (V) yang menentukan tahapan pengisian baterai pada sistem PLTS [21].

2.2.3 Pemetaan Potensi Energi Surya Berbasis GSA

Global Solar Atlas (GSA) merupakan sebuah platform berbasis sistem informasi geografis (GIS) penyedia data meteorologi energi surya global terpercaya yang dipublikasikan oleh Bank Dunia dan difasilitasi oleh Solargis. Platform ini menyediakan parameter data intensitas radiasi matahari jangka panjang yang sangat valid, seperti *Global Horizontal Irradiation* (GHI), *Direct Normal Irradiation* (DNI), dan *Diffused Horizontal Irradiation* (DHI). Dalam perencanaan sistem fotovoltaik, GSA berfungsi sebagai penyedia data sekunder makro historis yang andal untuk memproyeksikan potensi sebaran energi surya di suatu koordinat wilayah tanpa harus melakukan pengukuran manual di lapangan dalam jangka waktu tahunan [16].

Proses pemerolehan data potensi pada platform GSA dilakukan dengan memasukkan spesifikasi koordinat garis lintang (*latitude*) dan garis bujur (*longitude*) dari lokasi objek studi secara presisi. Data iradiasi harian maupun bulanan yang diunduh dari pangkalan data spasial ini kemudian dikonversikan secara matematis berdasarkan luasan dan efisiensi spesifikasi teknis komponen panel surya yang digunakan. Pendekatan konversi parameter meteorologi makro dari GSA ini terbukti efektif dan memiliki tingkat akurasi yang tinggi serta nilai penyimpangan (*error*) yang sangat rendah terhadap hasil pengukuran fisik alat ukur solarimeter di lapangan [22].

Dalam pengembangan *Energy Management System* (EMS), pemodelan karakteristik elektrik makro harian berupa estimasi profil arus (*I*), tegangan (*V*), dan daya (*P*) keluaran MPPT PLTS sepanjang tahun bersumber dari data iradiasi historis GSA ini. Data potensi energi tahunan yang terpetakan secara terstruktur kemudian disinkronkan dengan fluktuasi profil kebutuhan beban dinamis untuk dijadikan basis aturan (*rule base*) bagi algoritma pembuat keputusan. Dengan memanfaatkan pemetaan data sekunder yang valid dari GSA, sistem kontrol EMS dapat dirancang dan

disimulasikan secara komprehensif untuk menguji kelayakan serta persentase optimalisasi pembagian energi kelistrikan hibrida [23].

2.2.4 Energy Management System (EMS)

Energy Management System (EMS) merupakan suatu sistem yang digunakan untuk melakukan pengukuran dan pemantauan konsumsi energi pada suatu sistem atau fasilitas, sekaligus memberikan umpan balik untuk mendukung penggunaan energi yang lebih efisien. EMS juga berperan dalam mengoptimalkan pemanfaatan energi melalui pengelolaan yang lebih terstruktur, sehingga dapat membantu menurunkan biaya operasional. Selain itu, penerapan EMS turut berkontribusi dalam upaya meminimalkan dampak lingkungan akibat penggunaan energi yang tidak efisien. Dalam konteks sistem PLTS, EMS bertujuan untuk mengoptimalkan penggunaan energi surya dan penjadwalan *energy management system* yang disesuaikan dengan letak geografis dan cuaca setempat yang disandingkan dengan generator set. Dengan perhitungan *economic dispatch* diperoleh nilai penjadwalan pembangkitan yang optimal, di mana nilai optimal pembangkitan tiap bulannya berbeda-beda sesuai dengan parameter PLTS dan daya yang dibutuhkan [24].

EMS berperan penting dalam proses evaluasi pemanfaatan energi dengan memanfaatkan teknologi Internet of Things (IoT) dan berbagai sensor untuk melakukan pemantauan serta pengumpulan data konsumsi energi secara *real-time*. Melalui data yang diperoleh, sistem dapat menganalisis pola penggunaan energi serta mendeteksi adanya anomali atau ketidaksesuaian dalam konsumsi daya. Informasi tersebut kemudian digunakan sebagai dasar dalam pengambilan keputusan yang lebih tepat serta penyusunan strategi manajemen energi yang bersifat proaktif, sehingga penggunaan energi listrik dapat dioptimalkan sekaligus mengurangi dampak negatif terhadap lingkungan [25].

2.2.5 Fuzzy Logic

Himpunan fuzzy merupakan pengembangan dari himpunan tegas (*crisp set*) yang dirancang untuk mengatasi keterbatasan dalam merepresentasikan ketidakpastian. Pada himpunan tegas, keanggotaan suatu elemen dinyatakan secara biner, yaitu hanya bernilai 0 atau 1. Sebaliknya, pada himpunan fuzzy, derajat keanggotaan suatu elemen dinyatakan dalam bentuk bilangan real pada rentang $[0, 1]$, sehingga suatu elemen dapat memiliki tingkat keanggotaan parsial atau “sebagian anggota” dalam suatu himpunan. Pendekatan ini memungkinkan representasi yang lebih fleksibel terhadap fenomena yang bersifat tidak pasti atau tidak tegas dalam sistem nyata. Sistem fuzzy terdiri dari empat komponen utama, yaitu fuzzifikasi, pembentukan aturan (rules) fuzzy, mesin inferensi fuzzy, dan defuzzifikasi, yang seluruhnya didasarkan pada logika fuzzy dengan pengetahuan para pakar untuk menentukan aturan-aturannya [26].

Fungsi keanggotaan (membership function) adalah suatu fungsi yang memasangkan setiap anggota himpunan dengan tepat satu nilai keanggotaan pada rentang $\mu(x) \in [0, 1]$, di mana nilai 0 berarti tidak menjadi anggota himpunan dan nilai 1 berarti menjadi anggota penuh [26].

Fungsi keanggotaan kurva segitiga (triangular) dengan parameter (a, b, c) dinyatakan dengan persamaan:

$$\mu_C [x] = \begin{cases} 0 ; x \leq a \vee x \geq c \\ \frac{(x-a)}{(b-a)} ; a < x < b \\ 1 ; x = b \\ \frac{(c-x)}{(c-b)} ; b < x < c \end{cases} \dots\dots\dots(2.7)$$

Keterangan:

- **a** = nilai batas bawah, yaitu titik pada sumbu x saat derajat keanggotaan mulai naik dari 0.
- **b** = nilai puncak (titik tengah), yaitu titik pada sumbu x saat derajat keanggotaan mencapai nilai maksimum $\mu(x) = 1$.
- **c** = nilai batas atas, yaitu titik pada sumbu x saat derajat keanggotaan turun kembali menjadi 0.

Kurva segitiga merupakan konstruksi dari kurva linier naik (dari a ke b) dan kurva linier turun (dari b ke c). Jika parameter $a = 1$, $b = 3$, $c = 6$, dan nilai $x = 0,5$ (kurang dari a), maka $\mu[X] = 0$, artinya elemen tersebut tidak termasuk dalam himpunan fuzzy tersebut [26].

Fungsi keanggotaan kurva Trapezium (trapezoidal) dengan parameter (a, b, c, d) dinyatakan dengan persamaan:

$$\mu [x] = \begin{cases} 0, & x \leq a \text{ atau } x \geq d \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \end{cases} \dots\dots\dots(2.8)$$

Keterangan :

- **a** = nilai batas bawah, yaitu titik pada sumbu x saat derajat keanggotaan mulai naik dari 0.
- **b** = nilai awal *plateau* (dataran puncak), yaitu titik pada sumbu x saat derajat keanggotaan pertama kali mencapai nilai maksimum $\mu(x) = 1$.
- **c** = nilai akhir *plateau*, yaitu titik pada sumbu x saat derajat keanggotaan masih bernilai 1 sebelum mulai turun.
- **d** = nilai batas atas, yaitu titik pada sumbu x saat derajat keanggotaan turun kembali menjadi 0.

Berbeda dengan kurva segitiga yang hanya memiliki satu titik puncak (b), kurva trapesium memiliki rentang nilai puncak berupa *plateau* datar antara titik b dan c, di mana derajat keanggotaan bernilai penuh ($\mu(x) = 1$).

Fungsi keanggotaan pada himpunan fuzzy dapat dibentuk menggunakan beberapa jenis fungsi, seperti fungsi segitiga (*triangular*), fungsi trapesium (*trapezoidal*), maupun fungsi Gaussian (*gauss*). Masing-masing bentuk fungsi tersebut memiliki karakteristik yang berbeda dan dipilih berdasarkan kebutuhan serta sifat yang dimodelkan. Pemilihan fungsi keanggotaan yang tepat sangat penting karena akan memengaruhi representasi dan akurasi dalam menggambarkan kondisi suatu sistem pada logika fuzzy [27].

Melalui fungsi keanggotaan tersebut, proses fuzzifikasi dilakukan dengan memetakan nilai *crisp* (numerik) ke dalam himpunan fuzzy untuk menentukan derajat keanggotaan setiap nilai input terhadap himpunan yang telah didefinisikan. Fuzzifikasi merupakan tahap awal dalam 21system pengendali logika fuzzy sebelum dilanjutkan ke proses inferensi dan defuzzifikasi.

Secara matematis, proses fuzzifikasi menghasilkan nilai derajat keanggotaan $\mu(x)$ dari setiap nilai input x terhadap setiap himpunan fuzzy yang ada, misalnya untuk kurva linier naik berlaku:

$$\mu [x] = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & x \geq b \end{cases} \dots\dots\dots (2.9)$$

Keterangan :

- **a** = nilai batas bawah, titik saat derajat keanggotaan bernilai 0 (belum menjadi anggota himpunan).
- **b** = nilai batas atas, titik saat derajat keanggotaan mencapai nilai maksimum $\mu(x) = 1$ dan tetap bernilai 1 untuk $x \geq b$.

Berbeda dengan kurva segitiga dan trapesium yang memiliki titik turun kembali ke 0, kurva linear naik bersifat monoton — begitu mencapai nilai b , derajat keanggotaan tetap bernilai 1 meskipun nilai x terus bertambah. Kurva ini umumnya digunakan untuk merepresentasikan himpunan fuzzy pada sisi ekstrem atas dari suatu variabel, seperti kategori "Tinggi" atau "Sangat Optimal" [27].

Fuzzifikasi merupakan tahap awal dalam sistem pengendali logika fuzzy sebelum dilanjutkan ke proses inferensi dan defuzzifikasi. Salah satu metode inferensi yang paling banyak digunakan adalah metode Mamdani, yang sering dikenal sebagai metode Max-Min dan pertama kali diperkenalkan oleh Ebrahim Mamdani pada tahun 1975. Dalam menghasilkan keluaran sistem, metode ini melalui empat tahapan utama, yaitu pembentukan himpunan fuzzy, penerapan fungsi implikasi, komposisi aturan (*rule composition*), dan proses defuzzifikasi untuk mengubah keluaran fuzzy menjadi nilai tegas (*crisp*) [28].

Fungsi implikasi dalam metode Mamdani yang diterapkan adalah nilai minimum (Min), sedangkan metode yang diterapkan dalam inferensi sistem fuzzy untuk komposisi aturan adalah metode Max (maximum), di mana himpunan fuzzy diperoleh dengan mengambil nilai maksimum dari aturan yang ada, lalu diterapkan pada output menggunakan operator OR (union) [29].

Secara formal, nilai alpha-predikat (α) tiap rule dengan operator AND dihitung sebagai:

$$\alpha = \min(\mu A_1(x_1), \mu A_2(x_2), \dots, \mu A_n(X_n)) \dots \dots \dots (2.10)$$

Dan komposisi seluruh aturan dilakukan dengan :

$$\mu_{output}(z) = \max(a_1, a_2, \dots, a_n) \dots \dots \dots (2.11)$$

Pada tahap inferensi dan komposisi aturan, metode Mamdani menggunakan operator min dan max. Fungsi min digunakan untuk menentukan nilai minimum dari setiap aturan (*rule*) yang aktif sebagai representasi kekuatan aturan terhadap keluaran. Selanjutnya, fungsi max digunakan untuk menggabungkan hasil dari seluruh aturan dengan memilih nilai *alpha-predikat* tertinggi. Melalui proses tersebut diperoleh himpunan fuzzy keluaran yang merupakan hasil agregasi dari seluruh aturan yang aktif dalam sistem [30].

Aturan fuzzy (fuzzy rule) untuk metode Mamdani menggunakan operasi logika AND pada aturan IF-THEN, sehingga apabila terpenuhi beberapa aturan, inferensi diperoleh berdasarkan kumpulan serta korelasi antar rule yang sudah tersedia. Bentuk umum aturan fuzzy dinyatakan sebagai: [31].

$$IF (x_1 \text{ is } A_1) AND (x_2 \text{ is } A_2) AND \dots AND (x_n \text{ is } A_n) THEN (\psi \text{ is } B) (2.12)$$

Pembentukan aturan dihasilkan dari kombinasi setiap himpunan pada variabel input, di mana setiap aturan terdiri dari anteseden dan konsekuen. Jumlah total aturan yang dapat terbentuk adalah hasil perkalian jumlah himpunan fuzzy dari setiap variabel input, yaitu apabila terdapat k variabel input dengan masing-masing n himpunan, maka jumlah rule = n^k [32].

Proses fuzzifikasi, inferensi menggunakan metode Mamdani, dan defuzzifikasi centroid dilakukan secara sistematis, di mana rule fuzzy dibangun berdasarkan jumlah masing-masing variabel, misalnya: Rule 1: IF (A is rendah) AND (B is rendah) THEN (output is rendah) [33].

Pada proses defuzzifikasi, output dari komposisi aturan yang berbentuk himpunan fuzzy diubah menjadi suatu nilai crisp. Terdapat 5 metode defuzzifikasi pada metode Mamdani, yaitu centroid of area, bisector, mean of maximum, largest of maximum, dan smallest of maximum [31]. Metode centroid disebut juga Center of Area (CoA) atau Center of Gravity (CoG) dan merupakan metode yang paling lazim digunakan. Solusi crisp diperoleh dengan cara mengambil titik pusat (z^*) daerah fuzzy.

$$Z^* = \frac{\int \mu(z).z \, dz}{\int \mu(z) \, dz} \dots\dots\dots(2.13)$$

di mana z^* adalah nilai hasil defuzzifikasi (titik pusat), $\mu(z)$ adalah nilai derajat keanggotaan output fuzzy, dan z adalah nilai pada domain output.

Dalam persamaan tersebut, z^* adalah nilai hasil defuzzifikasi atau titik pusat daerah fuzzy, sedangkan $\mu_x(z)$ adalah nilai keanggotaan yang diperoleh dari hasil komposisi seluruh aturan fuzzy yang aktif [34].

Metode defuzzifikasi centroid terbukti lebih unggul dibandingkan metode lain, seperti pada penelitian penentuan kerentanan banjir di Kota Medan yang menunjukkan tingkat keberhasilan sistem mencapai 76% dengan metode centroid, dibandingkan dengan metode Mean of Maximum (MOM) yang hanya 48% [35].

2.2.6 Rasio Kontribusi Daya PLTS terhadap Beban

Selain ditinjau dari besaran daya dan energi absolut, kinerja suatu sistem PLTS *on-grid* juga dapat dievaluasi melalui tingkat pemenuhannya terhadap kebutuhan beban, yang lazim disebut sebagai *solar fraction* atau rasio kontribusi energi surya. Parameter ini menggambarkan seberapa besar porsi kebutuhan daya beban yang mampu dipenuhi langsung oleh keluaran PLTS dibandingkan dengan pasokan dari jaringan PLN, di mana rasio ini dihitung dari perbandingan antara energi yang digunakan langsung dari PV dengan total kebutuhan beban pada system [36]. Secara matematis, rasio kontribusi daya PLTS terhadap beban dirumuskan sebagai:

$$R = \frac{P_{PLTS}}{P_{Beban}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.14)$$

dengan R merupakan persentase pemenuhan beban oleh PLTS (%), P_{PLTS} adalah daya keluaran MPPT PLTS (W), dan P_{Beban} adalah daya beban Kantin Sehat (W). Semakin tinggi nilai R , semakin besar pula kemandirian sistem terhadap pasokan PLN, sehingga parameter ini menjadi salah satu indikator utama dalam mengevaluasi efektivitas manajemen energi pada EMS.

2.2.7 Konversi Daya Inverter (DC ke AC)

Daya searah (DC) hasil optimasi MPPT tidak dapat langsung digunakan oleh beban listrik AC, sehingga diperlukan komponen inverter untuk mengubah arus searah menjadi arus bolak-balik yang sinkron dengan tegangan dan frekuensi jaringan PLN. Dalam proses konversi tersebut selalu terjadi rugi-rugi daya akibat komponen elektronika daya di dalam inverter, sehingga daya keluaran AC selalu lebih kecil dibandingkan daya masukan DC-nya, sebagaimana ditunjukkan pada hasil evaluasi kinerja inverter yang memiliki efisiensi rata-rata sebesar 97,12% dengan nilai efisiensi tertinggi 97,67% dan terendah 97,00%, yang relatif sama dengan efisiensi pada *datasheet* inverter yaitu 97,1% [37]. Hubungan antara daya keluaran AC, daya masukan DC, dan efisiensi inverter dirumuskan sebagai:

$$P_{ac} = P_{dc} \times \eta_{inv} \dots \dots \dots (2.15)$$

dengan P_{ac} merupakan daya keluaran bolak-balik (AC) inverter yang menyuplai beban (W), P_{dc} adalah daya keluaran searah (DC) hasil optimasi MPPT, dan η_{inv} adalah efisiensi konversi inverter. Nilai arus AC pada setiap waktu pengamatan dapat diturunkan dari Persamaan (2.1), yaitu $I_{ac} = P_{ac}/V_{ac}$.

2.2.8 Analisis Biaya dan Penghematan Listrik

Salah satu manfaat utama penerapan sistem PLTS *on-grid* adalah kemampuannya untuk menekan biaya konsumsi energi listrik dari PLN, karena sebagian kebutuhan beban telah dipenuhi secara langsung oleh daya keluaran PLTS, di mana besarnya biaya tagihan listrik akhir saat PLTS beroperasi bersamaan dengan PLN diperoleh dari selisih antara biaya tagihan listrik PLN dengan nilai energi yang disuplai PLTS dikalikan tarif dasar listrik yang berlaku [38]. Secara matematis, biaya listrik yang dibayarkan kepada PLN setelah beroperasinya PLTS dirumuskan sebagai:

$$C_{PLN} = E_{PLN} \times T \dots \dots \dots (2.16)$$

dengan C_{PLN} merupakan biaya listrik yang dibayarkan kepada PLN setelah ada PLTS (Rp), E_{PLN} adalah energi yang tetap disuplai oleh PLN (kWh), dan T adalah tarif tenaga listrik yang berlaku (Rp/kWh).

Sebagai pembandingan, biaya listrik total tanpa keberadaan PLTS (seluruh kebutuhan beban dipasok oleh PLN) dirumuskan sebagai:

$$C_{Tanpa\ PLTS} = E_{Beban} \times T \dots\dots\dots (2.17)$$

dengan E_{Beban} adalah total energi kebutuhan beban (kWh). Selisih antara kedua kondisi tersebut menghasilkan besaran penghematan biaya listrik yang dicapai melalui penerapan sistem PLTS, dirumuskan sebagai:

$$S = C_{Tanpa\ PLTS} - C_{PLN} \dots\dots\dots (2.18)$$

dengan S merupakan besarnya penghematan biaya listrik (Rp) yang diperoleh dari selisih biaya operasional sebelum dan sesudah penerapan sistem PLTS.

Payback Period (PP) merupakan metode yang digunakan untuk mengetahui lama waktu yang dibutuhkan agar investasi awal dapat kembali melalui penghematan biaya listrik yang dihasilkan oleh sistem PLTS. Perhitungan Payback Period dirumuskan sebagai berikut.

$$PP = \frac{I_{total}}{S_{tahunan}} \dots\dots\dots (2.19)$$

Keterangan:

PP = Payback Period (tahun)

I_{total} = Total biaya investasi sistem PLTS (Rp)

$S_{tahunan}$ = Penghematan biaya listrik per tahun (Rp/tahun)

Semakin kecil nilai Payback Period, maka semakin cepat investasi sistem PLTS dapat kembali, sehingga tingkat kelayakan ekonominya semakin baik.