BAB II

TINJUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

2.1.1 PLTS

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atau sering disebut sebagai Sistem Fotovoltaik (PV) merupakan sistem pembangkit listrik yang memanfaatkan energi radiasi sinar matahari untuk diubah menjadi energi listrik. Menjadi sebuah solusi untuk menghadapi tantangan krisis energi dan perubahan iklim global karena sifatnya yang bersih, bebas emisi, dan sumber energinya melimpah (Wirawan, et al., 2021).

Menurut (Rachmi, 2020) Sistem PLTS bekerja dengan memanfaatkan sinar matahari sebagai sumber energi primer, yang kemudian dikonversi menjadi energi listrik melalui sel fotovoltaik. Melalui prinsip efek fotovoltaik, sistem ini mengubah sinar matahari menjadi daya listrik. Listrik yang dibangkitkan oleh sistem panel surya akan meningkat seiring dengan meningkatnya intensitas radiasi matahari yang diterima oleh sel fotovoltaik.



Gambar 2.1 Sistem Pembangkit Tenaga Surya
Sumber (https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)

Berdasarkan jenis teknologi yang digunakan, sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) diklasifikasikan menjadi dua tipe utama, yaitu sistem *gridconnected* dan *off-grid (standalone*). Sistem *grid-connected* merupakan PLTS yang terintegrasi langsung dengan jaringan listrik milik PLN, sehingga memungkinkan suplai daya dari dan ke jaringan. Sebaliknya, sistem *off-grid* adalah PLTS yang beroperasi secara independen tanpa koneksi ke jaringan listrik utama, dan dirancang untuk memenuhi kebutuhan energi secara mandiri. Umumnya, tipe ini digunakan di daerah-daerah terpencil yang belum memperoleh akses listrik dari jaringan konvensional.

2.1.2 Jenis-Jenis Sistem PLTS

a. Sistem On-Grid

Sistem PLTS *on-grid* adalah sistem yang terhubung langsung ke jaringan listrik PLN. Energi listrik dari panel dapat langsung digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban, dan kelebihan energi dapat disalurkan kembali ke jaringan listrik melalui mekanisme ekspor-impor energi (Julianto, 2020). Sistem ini tidak memerlukan baterai, sehingga biaya investasinya cenderung lebih rendah.

b. Sistem Off-Grid

Sistem PLTS *off-grid* merupakan sistem yang berdiri sendiri tanpa terhubung ke jaringan PLN. Seluruh energi listrik disimpan dalam baterai dan digunakan untuk memenuhi kebutuhan beban secara mandiri. Sistem ini banyak diterapkan di daerah terpencil atau wilayah yang belum mendapat akses listrik dari PLN (Rahim, 2019). Ketersediaan baterai menjadi faktor penting untuk menjamin keberlanjutan suplai listrik.

c. Sistem Hybrid

Sistem *hybrid* adalah kombinasi PLTS dengan sumber energi lain seperti PLN, genset, atau turbin angin. Sistem ini memberikan tingkat keandalan yang lebih tinggi dibandingkan sistem tunggal, karena mampu mengombinasikan daya dari beberapa sumber ketika beban meningkat atau ketika produksi dari panel surya menurun (Setiawan, 2021). Sistem hybrid banyak digunakan pada fasilitas vital seperti rumah sakit atau industri.

2.1.3 Komponen Utama PLTS

Sistem PLTS terdiri dari beberapa komponen utama yang bekerja saling terintegrasi untuk menghasilkan, mengatur, menyimpan, dan menyalurkan energi listrik.

a. Panel Surya (Solar Panel)

Panel surya merupakan komponen yang bertugas mengonversi energi cahaya matahari menjadi energi listrik arus searah (DC). Panel ini tersusun atas sel-sel fotovoltaik berbahan semikonduktor seperti silikon monokristalin atau polikristalin (Angel, 2019). Efisiensi panel sangat dipengaruhi oleh faktor intensitas radiasi matahari, suhu lingkungan, posisi dan orientasi panel, serta kebersihan permukaan panel (Prasetyo, 2020). Dalam konteks wilayah tropis, penentuan sudut kemiringan panel sangat penting untuk memaksimalkan penyerapan cahaya matahari.

b. Charge Controller

Charge controller berfungsi mengatur proses pengisian daya dari panel surya menuju baterai, sehingga mencegah terjadinya kelebihan pengisian

(*overcharging)* maupun pengosongan berlebih (*over-discharging*). Kedua kondisi tersebut dapat memperpendek usia baterai (Santoso, 2021). Terdapat dua teknologi utama dalam *charge controller*, yaitu PWM *(Pulse Width Modulation*) dan MPPT (*Maximum Power Point Tracking*), dimana MPPT lebih optimal dalam memaksimalkan daya keluaran panel (Wijaya, 2020*).*

c. Baterai (Battery)

Baterai berfungsi menyimpan energi listrik untuk digunakan saat malam hari atau ketika cuaca tidak mendukung. Jenis baterai yang umum digunakan dalam sistem PLTS meliputi *Lead Acid*, AGM, GEL, dan *Lithium-Ion.* Masing-masing jenis memiliki karakteristik terkait densitas energi, umur pakai, dan kebutuhan pemeliharaan (Hutagalung, 2019). Kapasitas baterai menjadi faktor penting untuk menjamin kontinuitas suplai energi terutama pada sistem PLTS *off-grid.*

d. Inverter

Inverter adalah alat yang mengonversi arus DC dari panel surya atau baterai menjadi arus AC agar dapat digunakan oleh perangkat-perangkat listrik rumah tangga maupun industri. Efisiensi inverter menentukan seberapa besar energi yang benar-benar dapat dimanfaatkan oleh beban (Gunawan, 2021). Inverter modern dilengkapi sistem proteksi seperti *anti-islanding, overvoltage, dan short circuit.*

e. Sistem Distribusi dan Proteksi

Sistem distribusi mencakup kabel, fuse, MCB, grounding, dan perangkat proteksi lain yang bertugas menyalurkan listrik dari PLTS ke beban dengan

aman. Proteksi sangat penting untuk mencegah risiko kebakaran, korsleting, dan kerusakan perangkat akibat lonjakan arus maupun tegangan (Siregar, 2018). Bagi wilayah tropis yang memiliki intensitas petir tinggi, proteksi *grounding* dan *lighthing* arrester sangat diperlukan.

2.1 Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

2.2.1 Kinerja PLTS

Kinerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan ukuran sejauh mana sistem fotovoltaik mampu mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik yang dapat digunakan secara efektif dan stabil. Dalam literatur energi terbarukan, kinerja PLTS tidak hanya dilihat dari besarnya energi yang dihasilkan, tetapi juga bagaimana sistem tersebut mempertahankan performa dalam kondisi lingkungan yang dinamis serta beban listrik yang berubah-ubah (Wicaksono, A, 2019).

Dengan demikian, pengukuran kinerja PLTS membutuhkan pendekatan multidimensional yang mencakup aspek teknis (komponen sistem), aspek operasional (perawatan, pola beban), dan aspek lingkungan (radiasi, temperatur, kelembaban). Menurut Wicaksono, kinerja PLTS yang optimal ditandai oleh kontribusi energi yang stabil, rasio performa yang tinggi, serta minimnya rugi-rugi energi pada setiap titik konversi (Wicaksono, A, 2019)

2.2.2 Parameter Kinerja PLTS

a. Daya Output (*Power Output*)

Daya output merupakan nilai instan energi listrik yang dihasilkan modul surya dalam satuan watt. Besarnya daya output sangat dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari, sudut datang cahaya, kondisi permukaan panel, dan

temperatur modul (Kementrian ESDM, 2018). Daya *output* yang fluktuatif menunjukkan bahwa sistem sangat bergantung pada kondisi cuaca, sehingga diperlukan sistem pemantauan *real-time* untuk menjaga kontinuitas distribusi energi.

b. Energi yang Dihasilkan (*Energy Production*)

Energi produksi merujuk pada total energi listrik yang dihasilkan PLTS dalam rentang waktu tertentu, biasanya dalam skala harian, bulanan, atau tahunan. Parameter ini digunakan untuk menilai unjuk kerja jangka panjang dan menjadi indikator utama kelayakan investasi PLTS. Hidayat menjelaskan bahwa energi produksi berhubungan langsung dengan rating daya panel, potensi radiasi lokasi, serta kualitas inverter (Hidayat, M (2020).

c. Efisiensi Sistem (*System Efficiency*)

Efisiensi sistem menggambarkan persentase energi matahari yang berhasil dikonversi menjadi energi listrik. Efisiensi yang rendah dapat disebabkan oleh kerugian resistif pada kabel, penurunan kualitas modul akibat temperatur tinggi, serta inefisiensi inverter. Oleh karena itu, desain sistem yang baik harus memperhatikan jarak antar komponen dan kualitas material agar rugi-rugi dapat diminimalkan (Dirjen EBTKE (2020).

d. *Capacity Factor* (CF)

Capacity Factor merupakan rasio antara energi aktual yang dihasilkan terhadap energi maksimum yang seharusnya dihasilkan jika PLTS bekerja pada kapasitas penuhnya selama 24 jam. Nilai CF menunjukkan kualitas pemanfaatan sumber energi matahari suatu wilayah. Di Indonesia, CF rata-rata

berada pada rentang 17–20% karena keterbatasan paparan matahari pada malam hari dan pengaruh kondisi cuaca (Salsabila R; & Hartono, D. (2020). Semakin tinggi CF, semakin baik sistem memanfaatkan potensi energi surya.

e. *Performance Ratio* (PR)

Performance Ratio adalah indikator kualitas sistem yang menunjukkan seberapa baik PLTS bekerja dibandingkan kondisi ideal. PR memperhitungkan rugi-rugi konversi, temperatur, shading, dan degradasi modul. Dalam penelitian Suryanto, nilai PR yang baik berada pada kisaran 0,75–0,85, menunjukkan bahwa hanya 75–85% energi teoritis yang dapat dimanfaatkan secara nyata (Suryanto, D (2021). PR sangat penting untuk mengevaluasi kualitas instalasi dan menentukan kebutuhan perawatan.

f. *State of Charge* (SoC) Baterai

State of Charge menggambarkan kapasitas energi tersisa pada baterai. Nilai SoC sangat berpengaruh terhadap kontinuitas suplai energi terutama pada sistem *off-grid.* Manajemen *SoC* melalui charge controller berfungsi mencegah overcharging dan deep discharging, karena kedua kondisi tersebut dapat memperpendek umur baterai secara signifikan (Prasetyo, B, 2020).

2.2.3 Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Kinerja PLTS

a. Faktor Lingkungan

Radiasi matahari merupakan faktor utama yang memengaruhi performa PLTS. Variasi radiasi yang disebabkan oleh awan, hujan, kabut, dan perubahan musim mengakibatkan fluktuasi produksi energi. Selain itu, temperatur panel yang tinggi dapat menurunkan efisiensi hingga 0,45% per °C, sehingga

diperlukan ventilasi atau jarak panel yang memadai dari permukaan atap (Nugraha, F (2019). Debu dan kotoran juga dapat menghambat penyerapan cahaya hingga 20% apabila tidak dibersihkan secara berkala (Widodo, Y (2018).

b. Faktor Teknis

Kualitas panel surya, inverter, baterai, dan kabel sangat menentukan stabilitas sistem. Instalasi yang tidak sesuai standar, seperti penggunaan kabel dengan ukuran tidak memadai atau sambungan longgar, dapat menyebabkan rugi-rugi energi yang tinggi (Dirjen EBTKE, 2020). Selain itu, umur komponen juga mempengaruhi kinerja; modul surya umumnya mengalami degradasi 0,5–1% per tahun.

c. Faktor Operasional

Operasional sistem berkaitan dengan pemeliharaan rutin, pengaturan beban, serta pemantauan kinerja. PLTS yang tidak dipelihara secara berkala akan mengalami penurunan performa yang signifikan dari waktu ke waktu (Rahardian, Y. (2020). Penggunaan sistem monitoring berbasis IoT terbukti dapat meningkatkan efisiensi karena memungkinkan operator mendeteksi gangguan sejak dini.

2.3 Radiasi Matahari dan Potensi Energi Surya

2.3.1 Konsep Radiasi Matahari

Radiasi matahari adalah energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik yang dipancarkan oleh matahari dan diterima permukaan bumi. Radiasi ini terdiri dari radiasi langsung (*direct radiation*), radiasi difus (*diffuse radiation*), dan radiasi

global (*global radiation*). (Nugroho,A 2018) Panel surya memanfaatkan radiasi global, sehingga pemahaman terhadap karakteristik radiasi sangat penting dalam menentukan orientasi panel, sudut kemiringan, dan kapasitas PLTS.

2.3.2 Potensi Energi Surya di Indonesia

Indonesia memiliki potensi energi surya yang tinggi karena berada di garis khatulistiwa. Dengan rata-rata intensitas radiasi 4–5,4 kWh/m²/hari, hampir seluruh wilayah Indonesia layak untuk pengembangan PLTS skala rumah tangga maupun skala industri.(Kementerian ESDM. 2021) Kawasan timur Indonesia seperti Nusa Tenggara Timur dan Sulawesi Selatan memiliki nilai harian tertinggi dan sangat cocok untuk PLTS skala besar.

2.3.3 Variasi Radiasi Matahari terhadap Waktu

Radiasi bervariasi secara harian dan musiman. Pada siang hari antara pukul 11.00–14.00, radiasi mencapai puncak karena posisi matahari berada pada titik zenit. Sementara itu, musim hujan dapat menurunkan intensitas radiasi secara signifikan sehingga produksi energi pada bulan-bulan tertentu menurun. (BMKG 2020) Pemahaman terhadap variasi ini penting untuk merancang kapasitas baterai serta strategi manajemen beban.

Untuk mengetahui besarnya radiasi matahari yang diterima oleh permukaan panel surya secara akurat, idealnya digunakan alat ukur radiometrik seperti pyranometer yang menghasilkan satuan iradiasi (W/m²) secara langsung. Namun, pada penelitian dengan skala kecil atau keterbatasan instrumen, pengukuran radiasi matahari sering kali didekati melalui pengukuran intensitas cahaya (lux) menggunakan lux meter, yang kemudian dikonversi menjadi nilai iradiasi matahari.

2.3.4 Konversi Intensitas Cahaya (Lux) Menjadi Iradiasi Matahari (W/m^2)

Intensitas cahaya (lux) merupakan satuan fotometrik yang menyatakan tingkat pencahayaan berdasarkan persepsi mata manusia terhadap cahaya tampak, sedangkan iradiasi matahari (W/m^2) merupakan satuan radiometrik yang menyatakan besarnya energi radiasi matahari yang diterima per satuan luas permukaan. Karena kedua besaran ini memiliki basis pengukuran yang berbeda, diperlukan faktor konversi untuk mengubah nilai lux menjadi nilai iradiasi matahari.

Hubungan antara intensitas cahaya dan iradiasi matahari dapat dinyatakan dengan persamaan berikut:

$$\mathbf{G = E \times K}$$

Keterangan:

- G = Iradiasi matahari (W/m^2)
- E = Intensitas cahaya hasil pengukuran (lux)
- K = Faktor konversi lux ke W/m^2 (konstanta empiris)

Nilai faktor konversi (K) yang digunakan dalam penelitian ini adalah **0,0083**, yang diperoleh berdasarkan pendekatan konversi fotometri-radiometri untuk sumber cahaya matahari (Ilra, P. H., Faisal, A., & Juliangga, R., 2026). Nilai ini menunjukkan bahwa setiap 1 lux intensitas cahaya yang terukur setara dengan sekitar 0,0083 W/m^2 iradiasi matahari. Pendekatan konversi ini banyak digunakan pada penelitian PLTS skala kecil ketika pyranometer tidak tersedia, sehingga lux meter dapat dimanfaatkan sebagai alat ukur alternatif untuk memperkirakan besarnya iradiasi matahari secara praktis di lapangan.

2.4 Beban Listrik (*Electrical Load*)

2.4.1 Beban Listrik

Beban listrik merupakan perangkat yang mengubah energi listrik menjadi energi mekanik, panas, cahaya, atau bentuk energi lain. Dalam perencanaan PLTS, analisis beban dilakukan untuk menentukan kebutuhan kapasitas inverter, ukuran panel surya, dan kapasitas baterai sehingga produksi dan konsumsi energi dapat berlangsung secara seimbang (Jannah, Styana, Kurniawan, & Hindarti, 2023).

2.4.2 Jenis-Jenis Beban Listrik

a. Beban Resistif

Beban ini mengubah energi listrik menjadi panas, seperti lampu pijar dan pemanas air. Beban resistif lebih mudah dikelola karena tidak memiliki komponen reaktif.

b. Beban Induktif

Menghasilkan medan magnet saat dialiri listrik, seperti motor listrik, kipas angin, dan kulkas. Beban induktif memiliki arus awal besar (*starting current)* sehingga memerlukan inverter dengan kapasitas lebih tinggi dari daya nominal perangkat.

c. Beban Kapasitif

Beban dengan komponen kapasitor seperti komputer dan perangkat elektronik lainnya. Beban ini dapat menimbulkan distorsi daya apabila tidak ditangani dengan koreksi faktor daya yang tepat.

2.4.3 Pola Beban Listrik

a. Beban Dasar (*Base Load*)

Beban yang bekerja secara kontinyu seperti kulkas atau modem internet. Beban dasar harus dihitung secara akurat karena mempengaruhi kebutuhan baterai.

b. Beban Puncak (*Peak Load*)

Beban tinggi pada jam-jam tertentu, biasanya pada malam hari. Beban puncak menentukan kapasitas inverter dan jumlah panel surya yang dibutuhkan.

c. Beban Lembah (*Off-Peak Load*)

Beban rendah pada jam-jam siang atau tengah malam. Pola ini dapat dimanfaatkan untuk mengoptimalkan charging baterai.

2.4.4 Kurva Beban (*Load Curve*)

Kurva beban menggambarkan variasi konsumsi listrik dalam satuan waktu tertentu dan digunakan untuk menentukan desain kapasitas PLTS. (Rahardian,Y.2020)Kurva ini penting untuk menilai apakah energi surya yang diproduksi mampu menyuplai kebutuhan listrik pada waktu puncak dan waktu dasar.

2.5 Pengukuran Per Jam (*Hourly Measurement*)

2.5.1 Konsep Pengukuran Per Jam

Pengukuran per jam (*hourly measurement*) adalah proses pencatatan parameter operasi PLTS secara berkala setiap satu jam untuk mengetahui dinamika produksi energi, kondisi komponen, dan pola konsumsi beban secara real-time. Pengukuran ini memberikan gambaran detail tentang variasi radiasi matahari, daya

keluaran, dan kondisi baterai pada setiap periode waktu (Wibowo, 2019). Pendekatan ini jauh lebih informatif dibanding pengukuran harian karena mampu menampilkan fluktuasi energi akibat perubahan cuaca dan pola aktivitas pengguna.

2.5.2 Pentingnya Pengukuran Per Jam dalam Evaluasi PLTS

Pengukuran per jam sangat penting dalam analisis kinerja PLTS karena sistem ini sangat dipengaruhi oleh intensitas cahaya matahari yang berubah sepanjang hari. Monitoring per jam memungkinkan peneliti mengidentifikasi saat-saat kritis ketika energi yang dihasilkan tidak mencukupi beban, serta menganalisis performa baterai dalam menyimpan dan menyalurkan energi (Hidayat, 2020). Selain itu, data per jam membantu mendeteksi degradasi panel, kerugian inverter, dan efisiensi distribusi.

2.5.3 Metode dan Instrumen Pengukuran

a. Pengukuran Manual

Metode ini dilakukan menggunakan multimeter atau clamp meter, tetapi kurang efektif karena tidak dapat merekam data secara kontinu (Yuliana, 2019).

2.5.4 Parameter yang Diukur Per Jam

Parameter yang umum diukur meliputi:

a. Intensitas Cahaya (Lux)
b. Intensitas radiasi matahari
c. Temperatur Panel
d. Tegangan dan arus panel
e. Tegangan dan arus ke SCC ke baterai
f. Temperatur

2.6 Keseimbangan Energi (*Energy Balance*)

2.6.1 Konsep Keseimbangan Energi pada PLTS

Keseimbangan energi adalah kondisi ketika jumlah energi yang dihasilkan PLTS dibandingkan dengan energi yang dikonsumsi beban berada pada keadaan seimbang. Keseimbangan ini penting untuk memastikan PLTS dapat memenuhi kebutuhan energi secara terus-menerus tanpa terjadi pemadaman (Mustofa, 2020).

2.6.2 Skenario Keseimbangan Energi

a. Surplus Energi

Terjadi ketika produksi energi melebihi konsumsi sehingga kelebihan energi disimpan dalam baterai (Ardiansyah, 2021).

b. Defisit Energi

Terjadi ketika beban lebih besar dibandingkan energi yang tersedia sehingga menyebabkan penurunan kapasitas baterai atau gangguan suplai (Nugraha, 2022).

c. Keseimbangan Harian

Kondisi ketika energi yang dihasilkan selama satu hari mampu memenuhi total kebutuhan beban harian (Putri, 2021).

2.6.3 Perhitungan Kapasitas Baterai dan Autonomy Days

Autonomy days adalah jumlah hari PLTS dapat menyediakan energi tanpa sinar matahari. Perhitungan ini sangat penting untuk PLTS *off-grid* di daerah terpencil (Sasmita, 2019). Kapasitas baterai ditentukan berdasarkan kebutuhan beban harian, depth of discharge (DoD), dan efisiensi penyimpanan.

2.7 Evaluasi Kinerja PLTS terhadap Pemakaian Beban

2.7.1 Kerangka Evaluasi Kinerja

Evaluasi kinerja PLTS dilakukan untuk menilai sejauh mana PLTS mampu memenuhi kebutuhan energi berdasarkan pola konsumsi beban. Analisis biasanya mencakup perbandingan antara energi yang tersedia dan energi yang digunakan tiap jam (Kurniawan, 2020).

2.7.2 Metode Analisis Data Per Jam

Beberapa teknik analisis meliputi:

a. Grafik daya dan beban per jam
b. Analisis deficit-surplus energi
c. Evaluasi PR (*Performance Ratio*) harian
d. Analisis State of Charge (SoC) baterai
e. Energy balance mapping (Rohman, 2022)

2.7.3 Indikator Kesesuaian Sistem dengan Beban

a. Energy Matching Index

Mengukur tingkat kesesuaian antara energi yang dihasilkan dan energi yang dikonsumsi (Setiawan, 2020).

b. Supply Reliability

Menilai keandalan PLTS dalam memenuhi beban tanpa gangguan (Maulana, 2021).

c. Loss of Load Probability (LOLP)

Menggambarkan probabilitas terjadinya kegagalan suplai energi (Halim, 2020).

2.7.4 Optimasi Sistem PLTS Berbasis Pola Beban

Optimasi dilakukan dengan menyesuaikan konfigurasi panel, kapasitas baterai, dan penggunaan inverter agar lebih efisien terhadap pola beban. Metode optimasi yang sering digunakan meliputi simulasi HOMER, trial–error, dan pendekatan *hybrid* teknis–ekonomis (Dharma, 2021).

2.8 Penelitian Terdahulu

Tabel 2.1 Penelitian Terdahulu

No	Nama Peneliti	Judul Penelitian	Tahun	Hasil Penelitian
1	Putra & Wijaya	Analisis Kinerja PLTS Atap pada Gedung Perkantoran	2019	PLTS menghasilkan energi harian stabil, PR 78%, dipengaruhi suhu panel dan radiasi.
2	Sari, N.	Evaluasi Efisiensi Sistem PLTS dengan Variasi Beban Rumah Tangga	2020	Beban puncak menyebabkan defisit; efisiensi meningkat bila pola beban disesuaikan.
3	Hidayat et al.	Pengukuran Radiasi Matahari Per Jam untuk Optimasi PLTS	2021	Radiasi rata-rata 5,2 kWh/m²/hari; variasi per jam signifikan untuk desain kapasitas.
4	Anggraini & Yusuf	Analisis Keseimbangan Energi pada Sistem PLTS Off-Grid	2018	Defisit pada musim hujan; butuh baterai autonomy ≥ 2 hari.
5	Kurniawan	Studi Performance Ratio PLTS 1 kWp	2022	PR 70–82%; dipengaruhi shading, efisiensi inverter, kebersihan panel.
6	Lestari & Rano	Pengaruh Variasi Radiasi terhadap Daya Output PLTS	2017	Korelasi kuat antara GHI dan output; +100 W/m² meningkatkan daya ±15–20%.

7	Pratama	Analisis Beban Listrik dan Energy Matching PLTS	2021	Matching index 65% → 85% setelah penyesuaian waktu operasi.
8	Dewi et al.	Studi Kinerja Baterai pada PLTS Hybrid	2019	SoC dipengaruhi siklus; hybrid meningkatkan keandalan 30%.
9	Rasyid	Evaluasi PLTS On-Grid dengan Smart Meter IoT	2023	Monitoring real-time meningkatkan akurasi dan manajemen energi.
10	Ahmad & Nurhayati	Optimasi Kapasitas PLTS Berbasis Data Per Jam	2020	Optimasi mengurangi oversizing 12% dan meningkatkan stabilitas 18%.