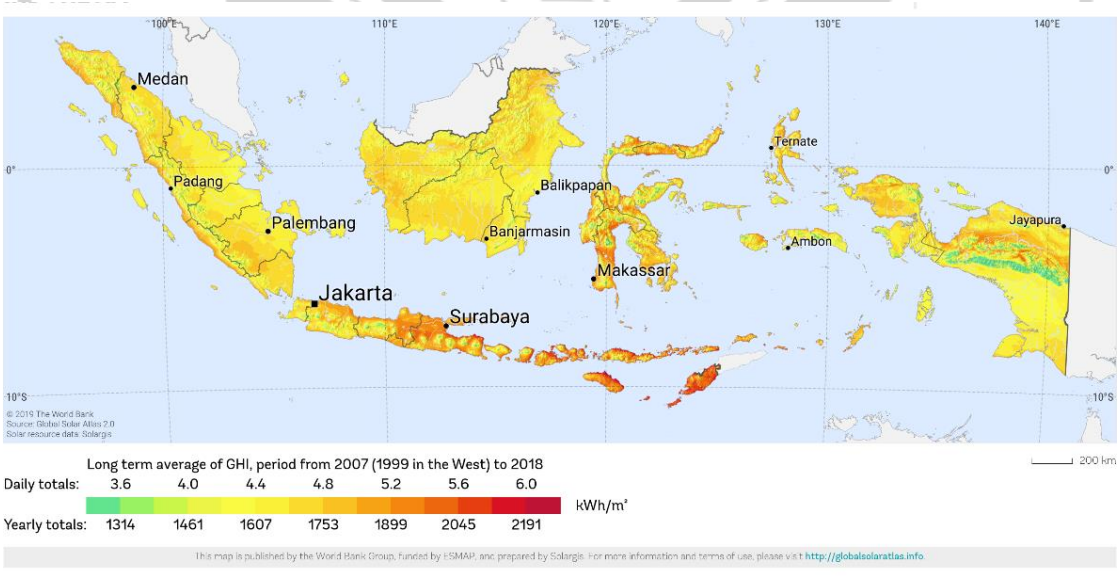
BAB II
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Energi Surya dan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

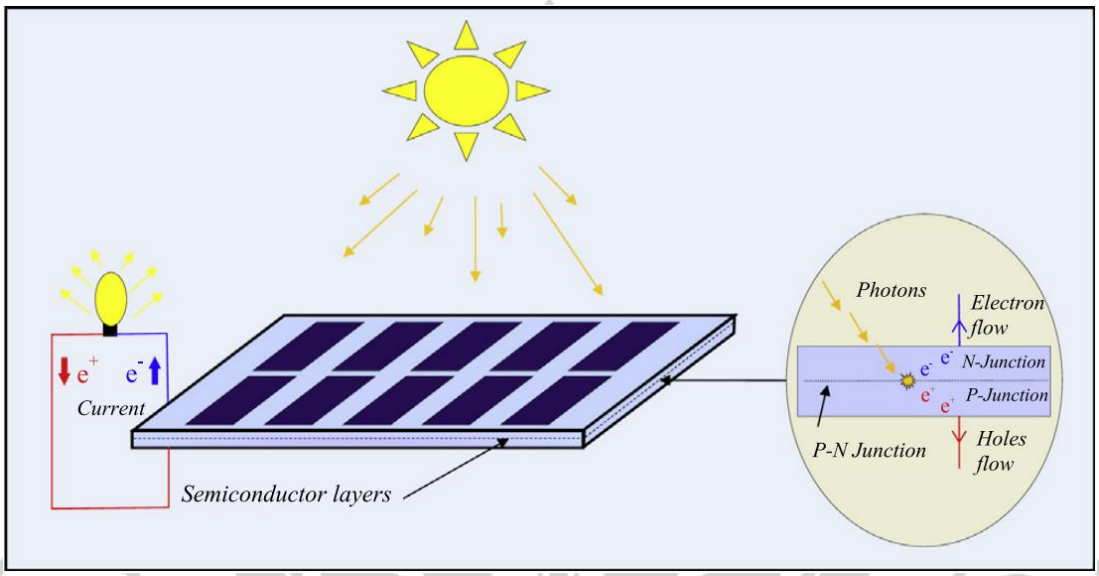
Energi surya merupakan salah satu sumber energi baru dan terbarukan yang memiliki potensi sangat besar di Indonesia. Berdasarkan data Direktorat Jenderal Energi Baru dan Terbarukan Kementerian ESDM, intensitas radiasi matahari di Indonesia rata-rata berkisar antara 4,5 hingga 6 kWh/m²/hari (Gambar 2.1). Dengan potensi teknis yang diperkirakan mencapai 3.294,4 GWp, lima provinsi dengan potensi terbesar antara lain Nusa Tenggara Timur (370 GWp), Riau (290 GWp), Sumatera Selatan (285 GWp), Papua (252 GWp), dan Jawa Tengah (186 GWp). Realisasi pemanfaatan energi surya di Indonesia masih sangat rendah. Hingga 2023, kapasitas terpasang PLTS nasional baru mencapai 444 MW, atau sekitar 0,01% dari total potensi yang ada. Kondisi ini turut menghambat pencapaian target bauran Energi Baru dan Terbarukan (EBT) nasional yang baru mencapai 13,09% pada 2023, masih jauh dari target 23% pada 2025 sesuai Peraturan Pemerintah No. 79 Tahun 2014 (Dewan Energi Nasional, 2023).



Gambar 2. 1 Peta Global Horizontal Irradiation (GHI) Indonesia
(Solargis & World Bank Group, 2020)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan sistem konversi energi yang mengubah radiasi matahari menjadi energi listrik melalui proses fotovoltaik. Proses ini

terjadi ketika sel surya yang umumnya berbahan dasar silikon monokristalin atau polikristalin, menyerap cahaya matahari dan memicu pergerakan elektron, menghasilkan arus listrik searah (DC) yang kemudian diubah menjadi arus bolak-balik (AC) oleh inverter (Wibowo et al., 2024). Gambar 2.2 menunjukkan sistem kerja sel surya.



Gambar 2. 2 Sistem Kerja Sel Surya

Sumber: (Akrouch et al., 2025)

Efisiensi konversi energi pada sel surya dipengaruhi oleh berbagai faktor, antara lain karakteristik material fotovoltaik, intensitas radiasi matahari, suhu lingkungan, serta luas permukaan modul yang terpapar secara langsung (Akrouch et al., 2025). Semakin luas permukaan modul yang menerima radiasi surya, semakin besar pula potensi listrik yang dapat dihasilkan. Kebutuhan lahan untuk PLTS sering bersaing dengan keperluan lain seperti pertanian, perkebunan, industri, dan pemukiman. Kondisi ini menjadi hambatan dalam pengembangan energi surya terutama di wilayah padat penduduk atau kebutuhan lahan produktif. Inovasi dalam bentuk pemanfaatan ruang non-konvensional seperti PLTS terapung (*floating PV*) di atas waduk dan danau, serta PLTS atap (*rooftop PV*) pada bangunan perkantoran, industri, dan fasilitas publik, menjadi solusi terkait keterbatasan lahan pengembangan PLTS. Pemanfaatan teknologi sel surya dapat dilaksanakan tanpa mengganggu fungsi lahan yang telah ada dan meningkatkan efisiensi pemanfaatan ruang (Yin et al., 2024).

2.2 Input Produksi Energi PLTS

Dalam proses perancangan sistem PLTS atap terdapat sejumlah variabel input yang berperan penting dalam menentukan kinerja sistem secara keseluruhan. Menurut diagram instalasi PLTS Atap dalam Permen ESDM No.2 Tahun 2024, komponen atau variabel internal sistem terdiri atas modul fotovoltaik (PV modul) dan inverter. Variabel teknis dalam instalasi PLTS ini relatif mudah dikontrol karena dalam perencanaannya setiap komponen ini dapat di sesuaikan dengan kebutuhan atau beban energi yang diperlukan. Namun, ada variabel eksternal yang berkaitan dengan lingkungan yang mempengaruhi kinerja PLTS atap yang dampaknya sulit dikontrol.

2.2.1 Variabel Lingkungan

Produksi listrik tidak hanya ditentukan oleh jenis dan kualitas modul PV yang digunakan, tetapi juga dipengaruhi oleh keterbatasan luas dan kondisi atap, pola cuaca terhadap intensitas radiasi matahari, serta temperatur lingkungan. Faktor-faktor ini memengaruhi tingkat iradiasi efektif yang diterima modul PV dan efisiensi konversi energi listrik, sehingga perlu diperhitungkan sejak tahap perancangan untuk memastikan kinerja sistem optimal (Tawalbeh et al., 2021).

- **Luas dan Kondisi Atap**

Produksi listrik dari PLTS atap sangat dipengaruhi oleh ketersediaan luas atap yang dapat dimanfaatkan secara efektif. Luas atap potensial didefinisikan sebagai total permukaan atap yang tersedia, namun hanya sebagian yang memenuhi syarat teknis sebagai luas atap efektif. Luas area efektif bergantung pada jarak antar baris modul PV, yang disesuaikan dengan dimensi fisik modul dan akses pemeliharaan. Khan (2024), telah merumuskan jarak antar baris PV modul untuk menghindari bayangan antar modul PV. Berdasaran penelitiannya jarak antar modul PV dirumuskan seperti pada Persamaan 1.

$$d = \frac{w\ .sinsin\ \beta}{tantan\ \gamma} \tag{1}$$

Dimana:

d = jarak antar pv modul (m)

w = panjang modul (m)

β = sudut kemiringan pv modul (tilt), dan

γ = sudut datang cahaya matahari yang dapat dihitung dengan persamaan:

$\gamma = 90^o - tilt^o - 23{,}45^o$. Nilai 23,45° merupakan sudut deklinasi maksimum matahari akibat kemiringan sumbu rotasi bumi terhadap bidang orbitnya

Penelitian sebelumnya menunjukan satu PV panel monokristallin membutuhkan luas area sekitar 2 x m2 untuk pemasangan optimal (Pramadya & Kim, 2024). Selain faktor teknis tersebut, perencanaan PLTS atap juga perlu memperhatikan prinsip keselamatan dan operasional, termasuk alokasi ruang servis pada bangunan eksisting (Pramadya & Kim, 2024). Dengan demikian, estimasi kapasitas terpasang PLTS atap harus mempertimbangkan tidak hanya luas atap total tetapi juga keterbatasan teknis dan operasional pada lokasi instalasi.

- **Intensitas Radiasi Matahari**

Kinerja PLTS sangat dipengaruhi oleh tingkat atau intensitas penyinaran sinar matahari yang diterima modul surya. Ketika jumlah radiasi matahari yang diterima PV modul berkurang maka arus yang dihasilkan modul juga berkurang secara proporsional. Total Energi yang diterima PV modul dari intensitas radiasi matahari disebut dengan daya input PLTS. Daya input dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 2 sebagai berikut:

$$Pin = E \times A \qquad (2)$$

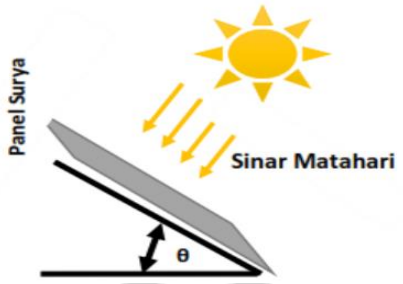
Dimana :

Pin = Daya input panel surya (Watt)

E = Intensitas radiasi matahari (W/m^2)

A = Luas permukaan modul surya (m^2)

Untuk memaksimalkan daya input pada PV modul perlu dipasang dengan orientasi yang sesuai terhadap posisi matahari. Umumnya matahari berada di dekat garis katulistiwa atau equator, oleh karena itu pemasangan PLTS umumnya mengarah ke equator (0° atau 180°). Semakin jauh lokasi lintang suatu lokasi,sudut tilt modul akan semakin besar. Sedangkan untuk lokasi yang dekat equator sudut tilt akan rendah karena posisi matahari lurus diatas atap.



Gambar 2. 3 Tilt modul PV

Daya input yang diterima tidak seluruhnya dapat dikonversi menjadi energi listrik karena adanya rugi-rugi efisiensi. Daya output dari PV modul dipengaruhi oleh tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), arus hubung singkat (I_{sc}) dan faktor pengisisn (FF). Tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) merupakan tegangan maksimum yang dihasilkan modul saat tidak terhubung dengan beban (arus nol), sedangkan arus hubung singkat (I_{sc}) adalah arus maksimum yang terjadi ketika terminal modul dihubung-singkatkan (tegangan nol). Adapun faktor pengisian (fill factor) merupakan parameter yang menunjukkan kualitas kurva karakteristik arus-tegangan (I-V) modul, yang didefinisikan sebagai rasio antara daya maksimum terhadap hasil perkalian V_{oc} dan I_{sc}. Rumus perhitungan Daya output PV modul dihitung dengan Persamaan 3:

$$Pm = V_{oc} \text{ x } I_{sc} \text{x FF} \qquad (3)$$

Dimana :

Pm = Daya output maksimum (watt)

V_{oc} = Tegangan rangkaian terbuka (V)

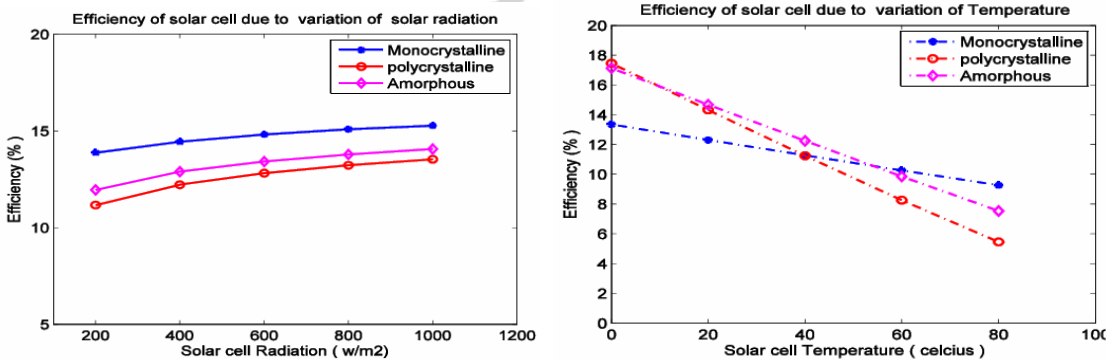
I_{sc} = Arus hubungan singkat (A)

- Temperatur Lingkungan

Radiasi matahari berperan penting dalam meningkatkan produksi listrik panel surya. Namun, di sisi lain, panas yang dihasilkan radiasi juga meningkatkan suhu lingkungan yang berdampak negatif terhadap efisiensi modul PV. Penurunan efisiensi ini terjadi karena suhu tinggi memengaruhi karakteristik listrik panel melalui peningkatan resistansi internal dan efek panas pada material semikonduktor.

Penelitian oleh Nayan et al. (2016) menunjukkan bahwa efisiensi panel surya sangat dipengaruhi oleh dua faktor lingkungan utama, yaitu intensitas radiasi matahari dan suhu operasi (Gambar 2.4). Dalam studi tersebut, kinerja tiga jenis modul dibandingkan:

mono-crystalline, poly-crystalline, dan *amorphous silicon*. Hasilnya, panel monocrystalline memiliki efisiensi tertinggi pada kondisi radiasi standar 1000 W/m², yaitu sebesar 15,27%. Namun, ketika suhu lingkungan meningkat hingga 80 °C, efisiensinya turun signifikan menjadi sekitar 9,25%. Temuan ini mengonfirmasi bahwa suhu tinggi menurunkan efisiensi modul PV.



Gambar 2. 4 Pengaruh Radiasi dan Temperatur terhadap Efisiensi PV Modul

2.2.2 Variabel Teknis

- **Modul PV**

Pemilihan jenis modul PV sangat penting karena setiap jenis PV memiliki karakteristik dan efisiensi yang berbeda. Efisiensi modul PV dapat didefinisikan sebagai perbandingan daya listrik keluaran terhadap daya radiasi matahari yang diterima modul. Semakin tinggi efisiensi modul, semakin besar energi listrik yang dapat dihasilkan dari luas atap yang tersedia. Efisiensi modul pv dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 4.

$$\eta = \frac{Pm}{Pin} \times 100\% \qquad (4)$$

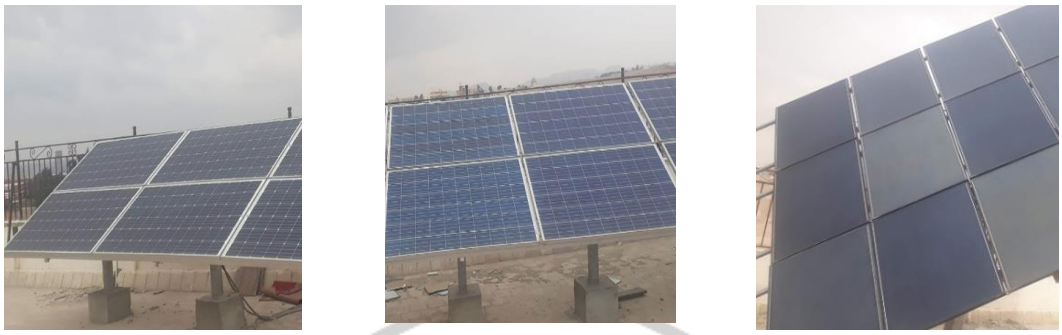
Dimana :

η = efisiensi modul pv (%)

Pm = daya output maksimum (watt)

Pin = daya input modul surya (watt)

Berdasarkan jenis dan susunan kristal silikon, terdapat tiga tipe modul PV yang umum digunakan, yaitu: *Monocrystalline, Polycrystalline,* dan *Thin-film*. Perbedaan ketiga jenis modul ini dapat dilihat pada Gambar 2.5.



(a) (b) (c)

Gambar 2. 5 (a) Monocrystalline, (b) Polycrystalline, (c) Thin-film Modul PV
sumber: (Hassaan et al., 2022)

Monocrystalline terbuat dari silikon murni dengan susunan kristal tunggal, sehingga memiliki efisiensi konversi energi paling tinggi, yaitu sekitar 15–17%. Namun, proses produksinya membutuhkan teknologi tinggi dan biaya yang lebih mahal dibanding jenis lain. Sementara itu, polycrystalline lebih ekonomis tetapi sedikit lebih rendah efisiensinya, sedangkan thin-film memiliki biaya produksi paling rendah dan fleksibel dalam pemasangan, namun dengan efisiensi yang jauh lebih rendah sehingga memerlukan area atap yang lebih luas (Ballif et al., 2022). Detail perbedaan ketiga jenis PV modul tersebut disajikan dalam Tabel 3.1.

Tabel 3. 1 Perbedaan Karakteristik PV Modul

Parameter	Monokristalin	Polikristalin	Thin Film
Bahan Dasar	silikon berstruktur kristal tunggal (single crystal) utuh.	silikon berstruktur multi-kristal (gabungan banyak butiran kristal kecil).	lapisan tipis mikrokristal-silicon dan Amorphous, atau chromium telluride, atau Gu selenium
Efisiensi Konversi	12% - 17%	10% - 15%	6% - 8%
Masa Pakai	15 - 20 tahun	15 - 20 tahun	5 - 20 tahun
Harga	Mahal	Cukup mahal	Lebih murah
Stabilitas	Baik	Baik	Kurang (terdegradasi
Warna	Hitam	Biru Dongker	Cokelat
Kelebihan	Efisiensi lebih tinggi reliabilitas tinggi, biaya relatif tinggi.	Stabil, andal, biaya rendah, banyak digunakan, namun efisiensi standar	Harga murah, efisiensi konversi terendah.

Sumber: (Li et al., 2021); (Ballif et al., 2022)

- **Kapasitas Inverter**

Inverter berfungsi untuk mengubah arus searah (DC) yang dihasilkan oleh modul PV menjadi arus bolak-balik (AC) yang dapat digunakan oleh peralatan listrik dan disalurkan ke jaringan listrik. Pemilihan kapasitas inverter disesuaikan dengan total kapasitas daya modul yang terpasang untuk menghindari kerugian daya. Daya DC yang dihasilkan modul harus sebanding dengan kapasitas maksimum AC pada inverter, perbandingan daya DC dengan AC ini disebut *Inverter Loading Ratio* (ILR). Beberapa efek dari perbandingan nilai ILR diantraranya yaitu:

a) Rasio > 1: PV panel memiliki kapasitas lebih besar. Ini bisa meningkatkan produksi energi, terutama saat iradiasi matahari tinggi. Namun, inverter mungkin tidak bisa mengoptimalkan seluruh energi yang dihasilkan (Ledmaoui et al., 2023).
b) Rasio = 1: PV panel dan inverter memiliki kapasitas yang sama. Ini adalah rasio yang paling sederhana dan efisien untuk sebagian besar kondisi pencahayaan.
c) Rasio < 1: Inverter memiliki kapasitas lebih besar. Ini bisa digunakan dalam sistem dengan kebutuhan energi yang lebih tinggi atau untuk memanfaatkan energi yang lebih banyak pada saat pencahayaan matahari normal.

- **Sistem PLTS Atap**

Sistem PLTS atap terbagi dalam dua kategori, yaitu *stand-alone system* atau *Off-Grid* dan *grid-connected system* atau *On-grid* (Kadang & Windarta, 2021). Sistem *Off-Grid* menghasilkan listrik secara mandiri tanpa terhubung ke jaringan PLN, umumnya digunakan di daerah terpencil dan dilengkapi baterai untuk menjaga suplai saat produksi panel kurang optimal terutama saat cuaca mendung. PLTS atap dengan *On-grid* terhubung langsung ke jaringan PLN, sistem ini terbagi lagi menjadi tanpa baterai dan dengan baterai (Permen ESDM No. 2 Tahun 2024, 2024)

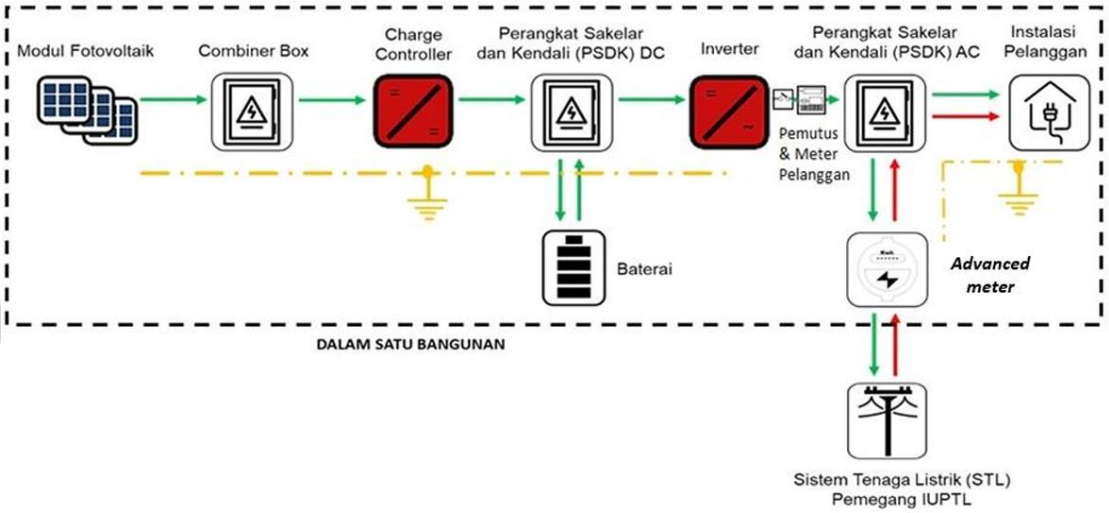
a. Sistem on-grid tanpa baterai, yaitu sistem yang sepenuhnya terhubung ke jaringan listrik tanpa menggunakan baterai. Sistem ini memanfaatkan jaringan sebagai cadangan energi ketika produksi PLTS tidak mencukupi. Gambar 2.6 menunjukan diagram komponen PLTS Atap sistem on-grid.



Gambar 2. 6 Diagram komponen PLTS Atap tanpa baterai

Sumber: (Permen ESDM No. 2 Tahun 2024, 2024)

b. Sistem On-grid dengan baterai (hybrid), yaitu sistem yang terhubung ke jaringan PLN namun juga dilengkapi dengan penyimpanan energi (baterai) untuk meningkatkan keandalan suplai listrik, terutama saat terjadi gangguan jaringan dan pemadaman PLN. Gambar 2.7 menunjugan diagram komponen PLTS Atap sistem on-grid dengan baterai.



Gambar 2. 7 Diagram Sistem PLTS Atap dengan Baterai

Sumber: (Permen ESDM No. 2 Tahun 2024, 2024)

- **Konfigurasi Rangakaian PLTS Atap**

Dalam pemilihan jenis konfigurasi rangkaian PLTS harus mempertimbangkan tegangan masukan maksimum dan minimum dari inverter jaringan. Tegangan dalam rangkaian PV panel tidak boleh melebihi rating tegangan atau tegangan maksimum dari perangkat lainnya. Konfigurasi rangkaian seri akan meningkatkan level tegangan dan mempertahankan nilai arusnya, sedangkan rangkaian paralel PV panel dapat meningkatkan arus tetapi tegangan tetap (Yusof & Baharuddin, 2020). Untuk mencapai kondisi tegangan dan arus yang dibutuhkan, kombinasi dari rangkaian seri dan paralel digunakan dalam instalasi PLTS atap.

Konfigurasi rangkaian seri akan meningkatkan level tegangan (V) dan mempertahankan nilai arusnya (I) . Tegangan total yang dihasilkan adalah penjumlahan dari tegangan yang dihasilkan oleh tiap PV panel (V1 + V2), yang sesuai dengan Hukum Kirchoft. Hubungan seri PV panel diperoleh dengan menghubungkan terminal positif (+) PV panel pertama dengan terminal negatif (-) PV panel berikutnya (Anibta et al., 2019). Persamaan tegangan dan arus seperti yang tertulis sebagai berikut:

$$V_{tot} = V_{sel1} + V_{sel2} + V_{sel(n)} \quad (5)$$

$$I_{tot} = I_{sel1} = I_{sel2} = I_{sel(n)} \quad (6)$$

Rangkaian susunan paralel PV panel dapat meningkatkan arus tetapi tegangan tetap. Arus total yang dihasilkan adalah jumlah dari arus yang dihasilkan pada masing-masing PV panel (I1 + I2), hal ini merujuk pada Hukum Kirchoft. Rangkaian paralel PV panel diperoleh dengan menghubungkan terminal positif (+) PV panel pertama dengan terminal positif (+) PV panel berikutnya, demikian juga dengan terminal negatif (-) PV panel pertama dengan terminal negatif (-) PV panel berikutnya (Anibta et al., 2019). Persamaan tegangan dan arus rangakaian paralel disajikan sebagai berikut:

$$V_{tot} = V_{sel1} = V_{sel2} = V_{sel(n)} \quad (7)$$

$$I_{tot} = I_{sel1} + I_{sel2} + I_{sel(n)} \quad (8)$$

Apabila dua buah PV panel dengan karakteristik yang sama, dirangkai seri atau paralel, maka daya (P) yang dihasilkan adalah sama. Hal ini karena, persamaan daya merupakan perkalian dari arus dan tegangan.

$$P = I. V \quad (9)$$

2.3 Simulasi dan Kinerja PLTS Atap

Kinerja PLTS atap umumnya dievaluasi melalui simulasi berbasis perangkat lunak untuk memperkirakan kinerja atau produksi energi listrik dari PLTS atap yang dirancang.. Berdapat beberapa jenis perangkat lunak untuk mensimulasikan rancangan PLTS atap diantaranya ada PVsyst, PVSOL, dan HelioScop. Studi Kurniawan et al. (2023) membandingkan ketiganya dan menyimpulkan bahwa PVsyst dan PVSOL memiliki fitur lebih lengkap daripada HelioScope, khususnya untuk analisis teknis dan finansial. Perangkat lunak PVsyst direkomendasikan untuk simulasi sistem on-grid, standalone, dan pumping. Simulasi ini membantu dalam menentukan kapasitas optimal, potensi output energi tahunan, serta memperkirakan performance ratio dan losses diagram secara detail (Putra et al., 2024).

Studi wilayah Manipur, India, menggunakan PVsyst versi 7.3 dan membandingkan prediksi dengan data lapangan antara Juli 2018–Juni 2023, menunjukkan kesesuaian PR, final yield, dan reference yield dalam rentang toleransi sekitar 1–2% (Singh et al., 2025). Beberapa parameter ukur hasil simulasi yang dapat menggambarkan kinerja PLTS atap diantaranya yaitu:

a. Energi Akhir / Final Yield (YF)

Merupakan total energi listrik (AC) yang dihasilkan sistem per satuan kapasitas panel, setelah dikurangi rugi-rugi sistem. Energi ini menjadi acuan untuk analisis ekonomi atau kelayakan invertasi. Nilai YF dapat dihitung menggunakan rumus:

$$YF = \frac{Epv}{Po} \quad (10)$$

Dimana :

YF = Energi akhir (kWh/kWp)

Epv = Energi yang dihasilkan PLTS (kWh)

Po = Daya PLTS yang terpasang (kWp)

b. Performance Ratio (PR)

PR adalah parameter efisiensi utama yang menggambarkan perbandingan antara output aktual sistem terhadap output teoritis berdasarkan radiasi matahari yang diterima. Semakin besar nilai PR menunjukan kinerja PLTS yang baik. Menurut

Skoplaki & Palyvos (2009), nilai PR berkisar antara 70–85% tergolong baik. Nilai PR dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$PR = \frac{YF}{YR} \quad x\ 100\% \tag{11}$$

Dimana :

PR = Performance Ratio atau rasio kinerja (%)

YF = Final yield atau hasil akhir

YR = Reference yield atau hasil acuan

Nilai YR atau hasil referensi ditentukan dengan membagi total radiasi matahari harian yang diterima pada bidang miring modul dengan radiasi matahari acuan pada kondisi *Standard Test Conditions* (STC) sebesar 1.000 W/m2.

c. Inverter Loading Ratio (ILR)

ILR adalah rasio kapasitas total modul PV terhadap kapasitas inverter. Nilai ideal ILR berkisar antara 1.1–1.3 untuk memaksimalkan pemanfaatan inverter tanpa overloading (Chandel et al., 2017). Rumus perhitungan ILR yaitu sebagai berikut:

$$ILR = \frac{P\ DC}{P\ AC} \tag{12}$$

PR = Inverter Loading Ratio

P DC = Daya pada modul PV arus DC

P AC = Kapasitas daya inverter arus AC

d. System Losses

PVsyst mengidentifikasi berbagai sumber rugi-rugi, seperti shading, mismatch antar modul, suhu tinggi, rugi konversi inverter, rugi kabel, dan kotoran pada modul. Semakin besar nilai system losses maka kinerja PLTS dianggap kurang baik atau tidak efisien.

2.4 Implementasi PLTS atap pada Fasilitas Gardu Induk

Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap telah menjadi salah satu strategi transisi energi yang umum diterapkan di berbagai sektor, dengan tujuan utama untuk mengurangi tagihan listrik, memanfaatkan sumber energi terbarukan, serta menurunkan emisi gas rumah kaca (GRK). Salah satu studi menunjukkan bahwa sistem PLTS atap berkapasitas 3 kWp yang dipasang pada pelanggan rumah tangga

dengan daya terpasang 1300 VA ke atas mampu menurunkan tagihan listrik hingga 95,7% per bulan, dengan konsumsi rata-rata 329,1 kWh/bulan dan estimasi pengembalian investasi dalam waktu sekitar 8,5 tahun (Prasetio, 2025).

Selain pada sektor rumah tangga, penerapan PLTS atap mampu meningkatkan efisiensi energi di sektor infrastruktur ketenagalistrikan, seperti pada fasilitas gardu induk. PLTS atap yang dapat menyuplai sebagian beban internal, termasuk untuk sistem pendingin, pencahayaan, serta perangkat kontrol dan proteksi, sehingga secara signifikan mengurangi ketergantungan terhadap suplai listrik dari jaringan utama (PLN) (Yang et al., 2020).

Penelitian oleh Huda et al. (2024) mengkaji pengaruh integrasi PLTS terhadap jaringan distribusi 20 kV di wilayah Ampenan. Hasilnya menunjukkan penurunan rugi daya dari 407,2 kW menjadi 233,2 kW atau sekitar 43%, serta peningkatan tegangan minimum sistem dari 0,9505 p.u. menjadi 0,9871 p.u., yang mencerminkan perbaikan kualitas daya. Dampak positif ini terjadi karena pembangkitan lokal dari PLTS dapat mengurangi arus beban pada saluran distribusi serta memperbaiki profil tegangan di titik-titik kritis sistem.

Penelitian oleh Prayogi et al. (2023) menegaskan pentingnya pengurangan beban terhadap peningkatan efisiensi sistem kelistrikan. Studi ini menunjukkan bahwa efisiensi transformator daya 60 MVA meningkat dari 98,20% menjadi 98,80% saat beban dikurangi sebesar 20% dari kapasitas nominal. Temuan ini memperkuat argumen bahwa pemasangan PLTS atap pada gardu induk tidak hanya berfungsi sebagai sumber energi alternatif, tetapi juga berkontribusi terhadap peningkatan efisiensi operasional transformator dan keandalan sistem distribusi.

2.5 Analisis Kelayakan Ekonomi Instalasi PLTS Atap

Analisis kelayakan ekonomi merupakan tahap krusial dalam perencanaan dan pengembangan sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) atap, guna memastikan bahwa investasi yang dilakukan dapat memberikan manfaat finansial jangka panjang. Beberapa indikator yang umum digunakan meliputi:

a. *Net Present Value* (NPV): Mengukur selisih antara nilai sekarang dari arus kas masuk dan arus kas keluar. NPV positif menunjukkan proyek layak secara ekonomi. NPV dihitung menggunakan Persamaan 13:

$$\text{Net Present Value (NPV)} = \sum_{t=0}^{n} \quad \frac{Bt - Ct}{(1+i)^t} \tag{13}$$

Keterangan:

- Bt : Benefit atau penerimaan usaha pada tahun t
- Ct : Cost/ Biaya pada tahun t
- t : Tahun kegiatan usaha (0, 1, 2, 3, ...n) tahun awal dari tahun 0
- i : Tingkat suku bunga yang berlaku (%)

b. *Internal Rate of Return* (IRR): Menunjukkan tingkat pengembalian investasi internal proyek. Jika IRR melebihi suku bunga acuan, maka proyek dianggap menguntungkan. Nilai IRR dihitung menggunakan Persamaan 14:

$$\text{Internal Rate of Return (IRR)} = i_1 + \frac{NPV_1}{NPV_{1-NPV_2}} - (i_2 - i_{1)} \tag{14}$$

Keterangan:

- i_1 : Discount rate yang menghasilkan NPV Positif
- i_2 : Discount rate yang menghasilkan NPV Negatif
- NPV_1 : NPV positif
- NPV_2 : NPV negatif

c. *Payback Period* (PBP): Waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan total biaya investasi awal dari penghematan yang diperoleh. Semakin pendek periode, semakin baik. Nilai PBP dihitung dengan Persamaan 15:

$$\textit{Payback Period}\ \text{(PBP)} = \frac{Cf}{A} \tag{15}$$

Keterangan :

- Cf : Biaya Investasi Awal
- A : Arus kas pertahun

Simulasi berbasis perangkat lunak sPVsyst memungkinkan analisis kelayakan ekonomi PLTS atap dengan memasukkan sejumlah parameter penting, seperti biaya investasi awal (CAPEX), biaya operasional dan pemeliharaan (O&M), tingkat diskonto, inflasi tahunan, serta degradasi performa modul surya. Parameter ini diperlukan untuk menghitung indikator ekonomi. Asumsi ekonomi yang umum digunakan dalam perhitungan kelayakan PLTS atap dirangkum dalam Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Asumsi ekonomi dalam investasi PLTS atap

Komponen	Keterangan	Nilai Asumsi/Contoh
Biaya Modul PV	Biaya pengadaan panel surya utama	USD 350,77/kWp
Biaya Balance of System (BOS)	Biaya struktur, kabel, proteksi, dan instalasi	40% dari total CAPEX
Umur sistem / projek	Lama proyek untuk analisis arus kas dan depresiasi	20 tahun
Diskonto	Minimum *attractive rate of return* (MARR), digunakan untuk perhitungan NPV	5%–10%
Biaya operasional tahunan	Biaya operasional dan pemeliharaan tahunan	2% dari CAPEX/tahun

Sumber: (Tarigan, 2023)

2.6 Kelayakan Lingkungan

Kelayakan lingkungan pada sistem energi terbarukan ditentukan melalui analisis emisi neto sepanjang siklus hidup sistem tersebut. Perhitungan ini membandingkan antara total potensi reduksi emisi yang diperoleh dari penggantian bahan bakar fosil dengan beban emisi yang dihasilkan selama proses produksi, distribusi, hingga instalasi perangkat. Pada sistem PLTS Atap, manfaat lingkungan utama bersumber dari kemampuannya menggantikan konsumsi listrik berbasis fosil dari jaringan nasional. Besarnya emisi yang dihindari dihitung berdasarkan total energi yang dihasilkan sistem (*E_Grid*) dikalikan dengan faktor emisi jaringan listrik (*Grid GHG Emission Factor*). Sistem kelistrikan di Indonesia masih didominasi oleh pembangkit berbasis fosil, khususnya batubara, yang memiliki intensitas emisi karbon tinggi. Berdasarkan pedoman Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), faktor emisi listrik dihitung berdasarkan jenis bahan bakar (*fuel-based*), di mana pembangkit berbahan bakar batubara memiliki faktor emisi sekitar 94,6 $kgCO_2/GJ$ atau ekuivalen dengan ±0,94 $kgCO_2/kWh$, sedangkan gas alam berkisar 56,1 $kgCO_2/GJ$.

Untuk memperoleh nilai kelayakan lingkungan, total emisi yang dihindari tersebut harus dikurangi dengan beban emisi produksi perangkat (System Life Cycle Emissions). Perhitungan kelayakan lingkungan dilakukan dengan Persamaan 16.

$$NE_{dihindari} = (E_{Grid} \times FE) - LCE_{sistem} \quad (16)$$

Keterangan :

$NE_{dihindari}$: Total penurunan emisi ($KgCO_2$)

E_{Grid} : Energi listrik yang disalurkan (kWh)

FE: Faktor emisi jaringan listrik nasional ($KgCO_2$/kWh)

LCE_{sistem}: Total emisi siklus hidup perangkat ($KgCO_2$)

Nilai LCE_{sistem} pada penelitian ini diperoleh dari hasil simulasi menggunakan PVsyst, yang secara otomatis menghitung emisi dari komponen utama seperti modul, inverter, dan struktur pendukung. Apabila nilai $NE_{dihindari}$ bernilai positif, maka sistem PLTS atap dinyatakan layak secara lingkungan karena memberikan pengurangan emisi karbon secara neto selama masa operasionalnya (Bernal-Agustín & Dufo-López, 2006).

2.7 Dukungan Regulasi

Dalam rangka mendukung target Net Zero Emission (NZE), pemerintah Indonesia menetapkan kebijakan percepatan pengembangan Energi Baru dan Terbarukan (EBT) melalui Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional (KEN), dengan target awal bauran EBT sebesar 23% pada tahun 2025. Namun, target tersebut belum tercapai sehingga dilakukan penyesuaian melalui Peraturan Pemerintah Nomor 40 Tahun 2025, yang menetapkan bauran EBT sebesar 19–23% pada tahun 2030 dan meningkat hingga 70–72% pada tahun 2060. Dalam kebijakan ini, energi surya menjadi salah satu prioritas utama dengan target bauran yang meningkat signifikan dari 1,3–1,6% pada tahun 2030 hingga mencapai 29–32% pada tahun 2060. Detail data target bauran EBT dalam KEN 2025 disajikan dalam Tabel 2.2. Tingginya target pengembangan energi surya tersebut menunjukkan bahwa PLTS, khususnya PLTS atap, memiliki peran strategis dalam mendukung pencapaian bauran EBT nasional.

Tabel 2. 2 Target Kontribusi Energi Terbarukan menurut Sumber Energi

Jenis EBT	2030		2040		2050		2060	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Hidro (%)	1,8	2,3	3,6	3,8	4,6	4,9	4,9	5,1
Surya (%)	1,3	1,6	13,1	16	23,3	25,3	29,8	32
Angin (%)	0,3	0,5	0,9	1,1	1	1,2	1,2	1,3
Biomassa (%)	7,2	9	6,5	6,7	7,4	7,6	12,2	13,4
Panas Bumi (%)	3,4	4	3,8	4,4	4,8	5,1	4,9	5,2
Biogas (%)	0,013	0,014	0,019	0,02	0,027	0,028	0,043	0,049
BBN (%)	5,1	5,2	4,2	4,7	3,1	3,2	2,1	2,6
Nuklir (%)	0	0	2,8	3,4	6,8	7	11,7	12,1
EBT Lain (%)	0,1	0,2	0,5	0,6	1,2	1,5	1,5	1,6
Bauran EBT pada Total Energi Primer (%)	19	23	36	40	53	55	70	72

Khusus untuk pengembangan PLTS atap, pemerintah telah menetapkan regulasi teknis melalui Peraturan Menteri ESDM Nomor 49 Tahun 2018 yang menjadi kebijakan awal implementasi PLTS atap di Indonesia. Regulasi ini memperkenalkan skema net metering dengan rasio ekspor-impor energi sebesar 1:0,65, di mana energi listrik yang diekspor ke jaringan mendapatkan kredit sebesar 65%. Selanjutnya, melalui Peraturan Menteri ESDM Nomor 26 Tahun 2021, rasio tersebut ditingkatkan menjadi 1:1, sehingga seluruh energi yang diekspor memperoleh kredit penuh, yang berdampak positif terutama bagi sektor rumah tangga dan sosial.

Peraturan tentang PLTS atap yang saat ini berlaku yaitu Peraturan Menteri ESDM Nomor 2 Tahun 2024. Dalam peraturan ini beberapa kebijakan dihapuskan dan diganti. Kapasitas terpasang PLTS atap sebelumnya dibatasi atas kapasitas terpasang PLN, dikebijakan yang berlaku saat ini batasan tersebut dihilangkan dan diganti dengan kuota pengembangan PLTS nasional. Kebijakan ini memberikan fleksibilitas lebih besar, khususnya bagi sektor industri, untuk mengembangkan PLTS atap sesuai dengan kebutuhan operasionalnya. Kebijakan terbaru ini juga menghapus skema ekspor-impor energi listrik ke jaringan PLN, sehingga surplus energi tidak lagi dikonversikan menjadi kredit. Hal ini berdampak pada pelanggan sektor rumah tangga yang sebelumnya memperoleh keuntungan dari kelebihan produksi energi PLTS. Rumus perhitungan penghematan beban pemakaian sendiri dari PLTS atap dihitung dengan Persamaan 17.

$$\text{Penghematan} = E_{pv\,(t)} \text{ x tarif listrik} \quad (17)$$

Keterangan:

Penghematan : Total penghematan energi (Rp/tahun)

$E_{pv\,(t)}$: Energi listrik yang dihasilkan (kwh/tahun)

Tarif Listrik : harga listrik (Rp/kwh)

UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG

UNIVERSITAS DIPONEGORO
SEMARANG