

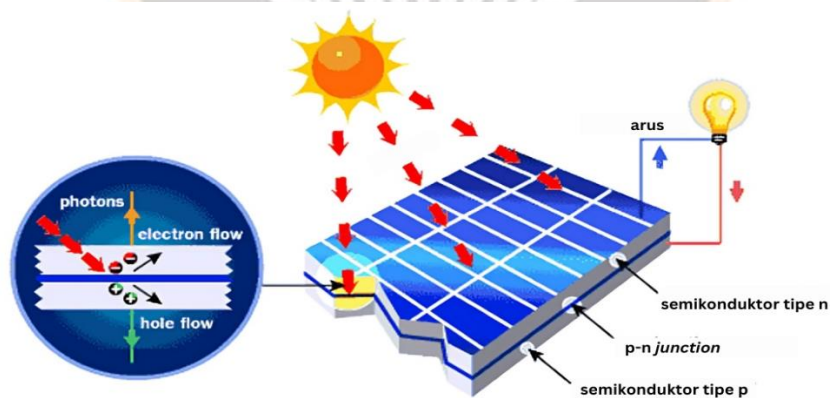
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kajian Penelitian Terdahulu

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

PLTS adalah pembangkit listrik yang menggunakan sinar matahari sebagai sumber energinya melalui sel surya (photovoltaic) untuk mengkonversikan radiasi sinar foton matahari menjadi energi listrik (Suyanto et al., 2024). Sel surya merupakan lapisan-lapisan tipis dari bahan semikonduktor silikon (Si) murni, dan bahan semikonduktor lainnya. PLTS memanfaatkan sinar matahari untuk menghasilkan listrik DC yang dapat diubah menjadi listrik AC apabila diperlukan (Pringsewu et al., 2023). PLTS merupakan pembangkit listrik yang ramah lingkungan tanpa ada bagian yang berputar, tidak menimbulkan kebisingan, dan tanpa mengeluarkan gas buang/limbah yang merugikan lingkungan disekitarnya. Terdapat beberapa faktor yang mempengaruhi efisiensi daya keluaran sel surya, yaitu radiasi matahari, temperatur sel surya, orientasi panel surya, sudut kemiringan panel surya (Ayu et al., 2022), dan pengaruh bayangan (Mansur, 2021) (Utami & Daud, 2020) (Dahliya et al., 2021). Proses konversi energi listrik pada modul fotovoltaik dapat dilihat pada Gambar 2.1.

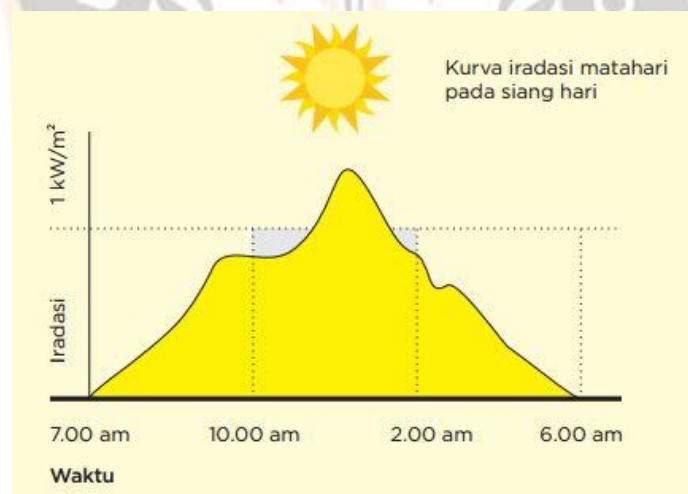


Gambar 2. 1 Proses Konversi Energi Pada Modul Fotovoltaik (Sans Power, 2025)

Pada siang hari, modul fotovoltaik menerima matahari kemudian cahaya matahari tersebut dikonversikan menjadi energi listrik. Energi listrik yang dihasilkan dari proses konversi modul fotovoltaik dapat langsung digunakan oleh beban maupun disimpan di dalam baterai (Wicaksono & Bangsa, 2022). Dalam kondisi malam hari tidak terdapat sumber

matahari, oleh karena itu beban sepenuhnya di catu oleh baterai yang telah diisi dayanya pada siang hari. Demikian pula apabila kondisi hari mendung, modul fotovoltaik memproduksi listrik lebih rendah dibandingkan pada saat matahari cerah (Wahyudin et al., 2022). Produksi listrik yang lebih rendah pada kondisi cuaca mendung disebabkan oleh lebih rendahnya tingkat radiasi matahari daripada saat kondisi cuaca cerah.

Berdasarkan besaran iradiasi sinar matahari yang di terima oleh sel surya terjadi fluktuasi karena pengaruh waktu dan tentunya akan mempengaruhi besaran tegangan, arus dan daya yang dihasilkan (Khaligh, 2017). Kecepatan di mana energi matahari mencapai kawasan bumi disebut dengan “solar irradiance” atau “insolation”. Insolation adalah ukuran energi radiasi matahari yang diterima di suatu kawasan bumi pada suatu waktu. Satuan ukuran untuk irradiance adalah watt per meter persegi (W/m^2) atau (kW/m^2) (Rauf, 2023). Gambar 2. 2 Kurva iradiasi matahari (Rauf, 2023). Selain itu tenaga surya yang di manfaatkan juga dipengaruhi oleh sudut pancaran matahari di bumi serta ketinggian dan sudut Azimut.



Gambar 2. 2 Kurva iradiasi matahari (Rauf, 2023)

Iradiasi matahari memiliki tiga komponen utama yang dinyatakan dalam (kW/m^2) diantaranya adalah *Direct Normal Irradiation* (DNI), *Diffuse Horizontal Irradiation* (DHI), dan *Global Horizontal Irradiation* (GHI). Berikut pengertian dari masing-masing komponen iradiasi matahari :

- a. DNI (*Direct Normal Irradiance*): jumlah iradiasi matahari yang diterima oleh suatu luasan permukaan yang selalu tegak lurus (atau normal) terhadap arah sinar yang datang.

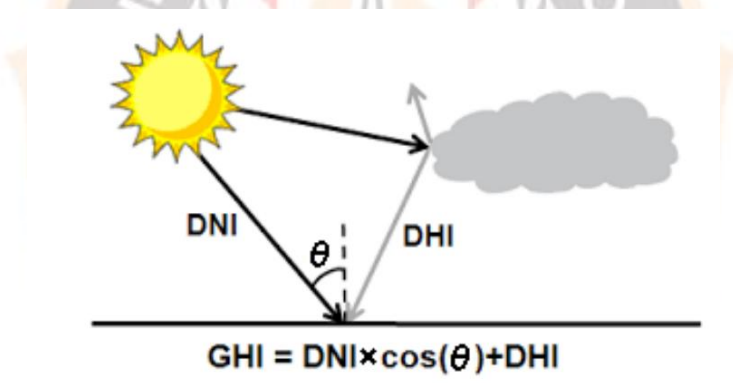
- b. DHI (*Diffuse Horizontal Irradiance*): jumlah iradiasi matahari yang tidak datang langsung, melainkan yang tersebar maupun berupa pantulan dari molekul atau partikel di atmosfer dan diterima oleh suatu luasan permukaan.
- c. GHI (*Global Horizontal Irradiance*): jumlah total iradiasi matahari yang langsung (DNI) dan yang berupa tersebar dan pantulan (DHI). Parameter ini adalah yang paling umum digunakan dalam merancang PLTS

$$GHI = DNI \times \cos \theta_z + DHI \quad (2.1)$$

Dimana :

θ_z = Sudut zenith matahari (°)

DHI adalah radiasi terestrial yang dihamburkan oleh atmosfer dan diterima oleh permukaan horizontal. DNI berasal dari pancaran sinar matahari seperti terlihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Komponen Iradiasi Matahari (Boutahir et al., 2022)

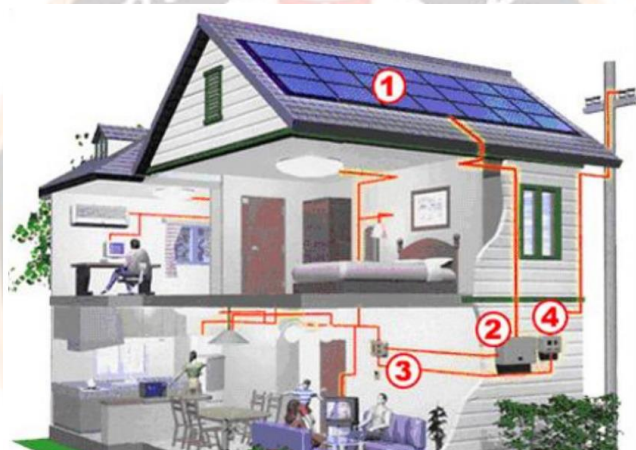
Iradiasi yang masuk ketika mengenai atmosfer di bagian atas sama dengan 1.360 W/m^2 , namun radiasi ini berkurang ketika mencapai permukaan bumi karena peristiwa pemantulan dari atmosfer dan penghamburan oleh aerosol dan komponen lain yang ada di lapisan permukaan bumi sehingga nilainya menjadi 1.000 W/m^2 yang kemudian nilai inilah yang dijadikan pedoman umum untuk uji standar daya keluaran dari panel surya dan dikenal dengan kondisi STC (*Standard Test Condition*).

Pengukuran iradiasi dapat dilakukan dengan dua cara yaitu pengukuran secara langsung dengan menggunakan pyranometer dan pengukuran yang berbasis satelit atau dikenal dengan TMY data (*Typical Meteorological Year*). Karena nilai iradiasi sangat bervariasi dimana nilai variasinya mencapai 20%/tahun maka metode TMY adalah metode yang paling cocok untuk digunakan mengukur iradiasi di suatu wilayah (Haning & I, 2020).

2.2.1 Teknologi Pembangkit Listrik Tenaga Surya

a. PLTS Atap

Metode pemasangan rooftop merupakan instalasi PLTS yang memanfaatkan ruang yang dapat diakses pada atap bangunan. Atap berfungsi sebagai struktur pendukung instalasi PLTS, namun harus disediakan untuk menghadapi kendala cuaca (Harahap et al., 2022). Metode teknologi yang dipasang di atap efektif untuk kapasitas pembangkit listrik skala kecil, sistem ekspor-impor, dan aplikasi energi baru terbarukan yang modern sehingga membantu menghemat tagihan listrik dan mengurangi dampak perubahan iklim (Rachmu et al., 2020). Cara teknologi pemasangan atap ditunjukkan pada Gambar 2.4 yang terdiri dari: (1) Modul surya, (2) Inverter, (3) panel distribusi AC dan (4) kWh meter.



Gambar 2. 4 PLTS Atap (Permana, 2022)

b. PLTS Lahan

Cara pemasangan di luar ruangan menggunakan lahan yang bersih, datar, dan stabil. Kolom dan balok baja diperlukan sebagai struktur pendukung dan analisis untuk menentukan stabilitas tanah jangka panjang. Pemasangan di luar ruangan efektif jika kapasitas pembangkit listrik besar. Keuntungan memasang panel surya di atas tanah adalah suhu rata-rata panel surya lebih stabil karena adanya pendinginan yang diberikan oleh tanah yang menyerap panas. Kelemahan sistem terestial adalah memerlukan luas permukaan yang cukup luas serta letaknya yang rendah dan dekat dengan permukaan tanah sehingga memungkinkan adanya kotoran dan debu. Jika seluruh bagian modul surya tertutup debu maka produksi modul surya akan berkurang sebesar 20%. Solusi dari permasalahan tersebut adalah dengan melakukan

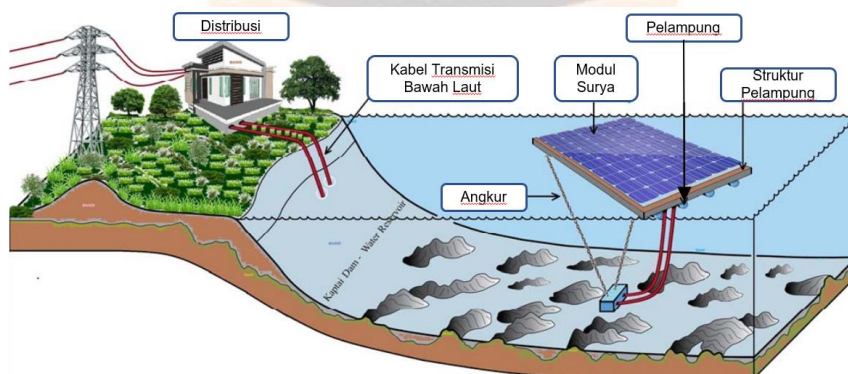
pembersihan panel surya setiap empat bulan sekali (Fauzi Wibowo & Rokhmat, 2019). Teknologi ruang terbuka seperti terlihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 PLTS Lahan (Ramadhani, 2018)

c. PLTS Terapung

Pembangkit listrik tenaga surya terapung adalah metode pemasangan struktur terapung di atas air. Sistem tenaga surya terapung dapat dipasang di permukaan air seperti lautan, waduk, dan danau. Penggunaan sistem PV surya terapung berbasis reservoir/danau memiliki sistem pendinginan evaporatif alami di permukaan air yang menjaga suhu panel tetap rendah dan meningkatkan efisiensi panel hingga 11% dibandingkan dengan sistem PV yang dipasang di darat. Oleh karena itu, terdapat potensi yang besar (Sahu et al., 2016) . Metode pemasangan ini juga memiliki lebih sedikit penghalang yang dapat menyebabkan hilangnya naungan dan lebih sedikit pengaruh debu yang dapat mempengaruhi kinerja panel (Golroodbari et al., 2023).



Gambar 2. 6 Struktur Instalasi PLTS Terapung (Rahman et al., 2017)

2.2.2 PLTS Berdasarkan Koneksi Terhadap Sistem Grid

Topologi jaringan pada sistem PLTS terbagi menjadi tiga berdasarkan koneksi sistem grid yaitu PLTS tidak terhubung jaringan, PLTS terhubung jaringan dan PLTS Hybrid yang merupakan gabungan dari keduanya. Masing – masing topologi memiliki perbedaan pada tipe inverter sesuai dengan fungsinya.

a. PLTS Tidak Terhubung Jaringan (*Off grid*)

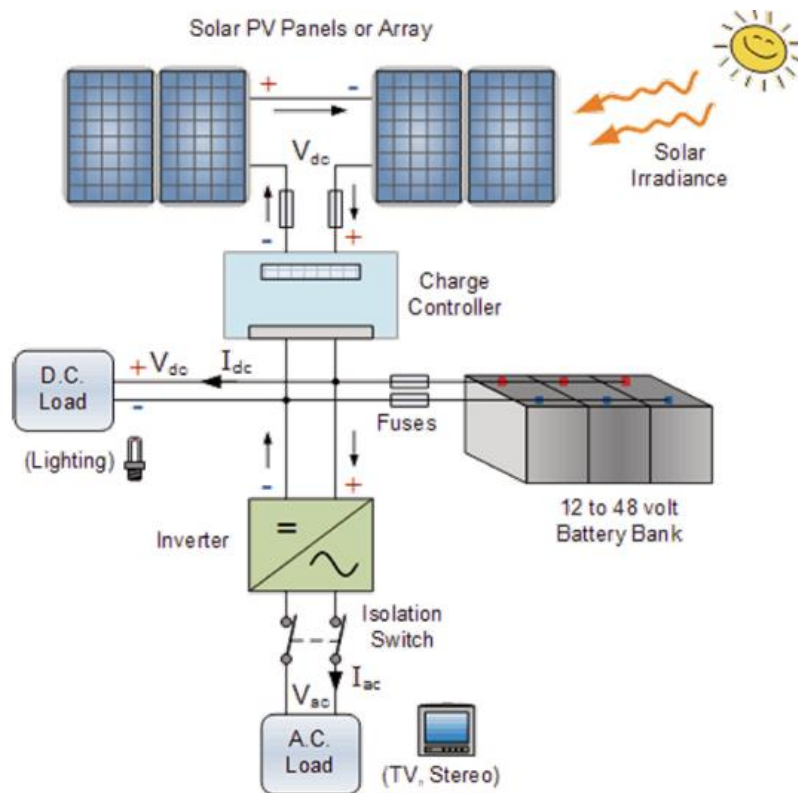
Sistem kerja pada sistem ini diawali dengan sinar matahari dirubah oleh modul surya menjadi energi listrik DC. Sebelum dirubah menjadi energi listrik AC, daya yang dihasilkan dibaca oleh *Charger Controller* dan dibandingkan terhadap beban. Pada saat beban lebih kecil dari produksi energi modul surya maka sisa energi disimpan kedalam baterai untuk dimanfaatkan pada malam hari atau pada saat supply energi modul surya tidak mencukupi kebutuhan beban. Selanjutnya energi yang dibutuhkan beban di rubah menjadi energi listrik AC oleh inverter. Sistem *off-grid* menggunakan rangkaian panel surya untuk menghasilkan energi listrik sesuai kebutuhan beban tanpa terhubung ke jaringan listrik PLN (Hasanah, 2021).

Pada sistem off grid inverter yang digunakan sudah memiliki perangkat charge controller didalamnya. Selain memperhatikan kapasitas pada Inverter off-Grid dalam pemilihan juga harus memperhatikan jenis sistem batrei yang digunakan 12 Vdc atau 24 Vdc. Gambar 2.7 contoh Inverter Off Grid-Bidirectional merk SMA dengan spesifikasi satu fasa, daya masukan maksimal 6000 watt, keluaran 180 – 270 Vac, termasuk charge controller tipe MPPT dengan sistem baterei 48 Vdc.



Gambar 2. 7 Inverter Off Grid (Permana, 2022)

Teknologi PLTS *off-grid* ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 PLTS *off grid* (Permana, 2022)

b. PLTS Terhubung Jaringan (*On Grid*)

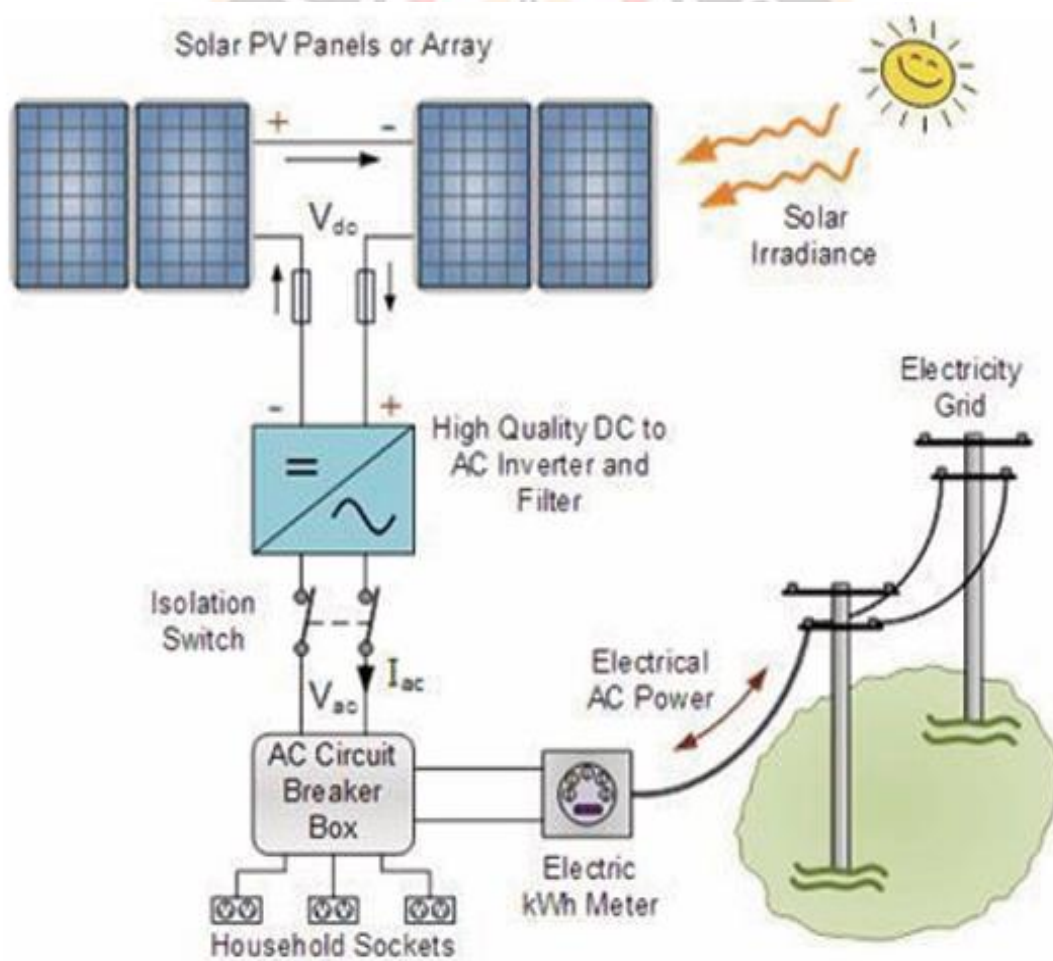
Berbeda dengan sistem *Off Grid* pada sistem ini tidak membutuhkan *charge controller*. Energi listrik DC yang dihasilkan modul surya langsung dirubah menjadi energi listrik AC oleh inverter sesuai dengan kebutuhan beban. Sistem bekerja dengan tetap terhubung pada jaringan PLN yaitu bekerja secara berdampingan. Pada saat kondisi tertentu dimana produksi energi listrik PLTS menurun akibat cuaca maka listrik PLN akan mengimbangi penurunan daya tersebut. Sedangkan pada saat kondisi optimal energi dari PLTS akan mengurangi supply daya dari PLN untuk memenuhi kebutuhan beban sehingga dapat mengurangi tagihan listrik (Anggara et al., 2014).

Inverter tipe *on grid* memiliki fungsi pengaman *anti islanding* yaitu pada saat terjadi pemadaman supply PLN maka inverter juga tidak akan aktif menyalurkan produksi energi menuju jaringan. Hal ini juga menjadi salah satu hal yang dipersyaratkan oleh PLN dalam instalasi PLTS yang terhubung ke jaringan PLN. Gambar 2.9 adalah contoh inverter yang digunakan pada sistem *PLTS on grid*.



Gambar 2. 9 Inverter On Grid (Permana, 2022)

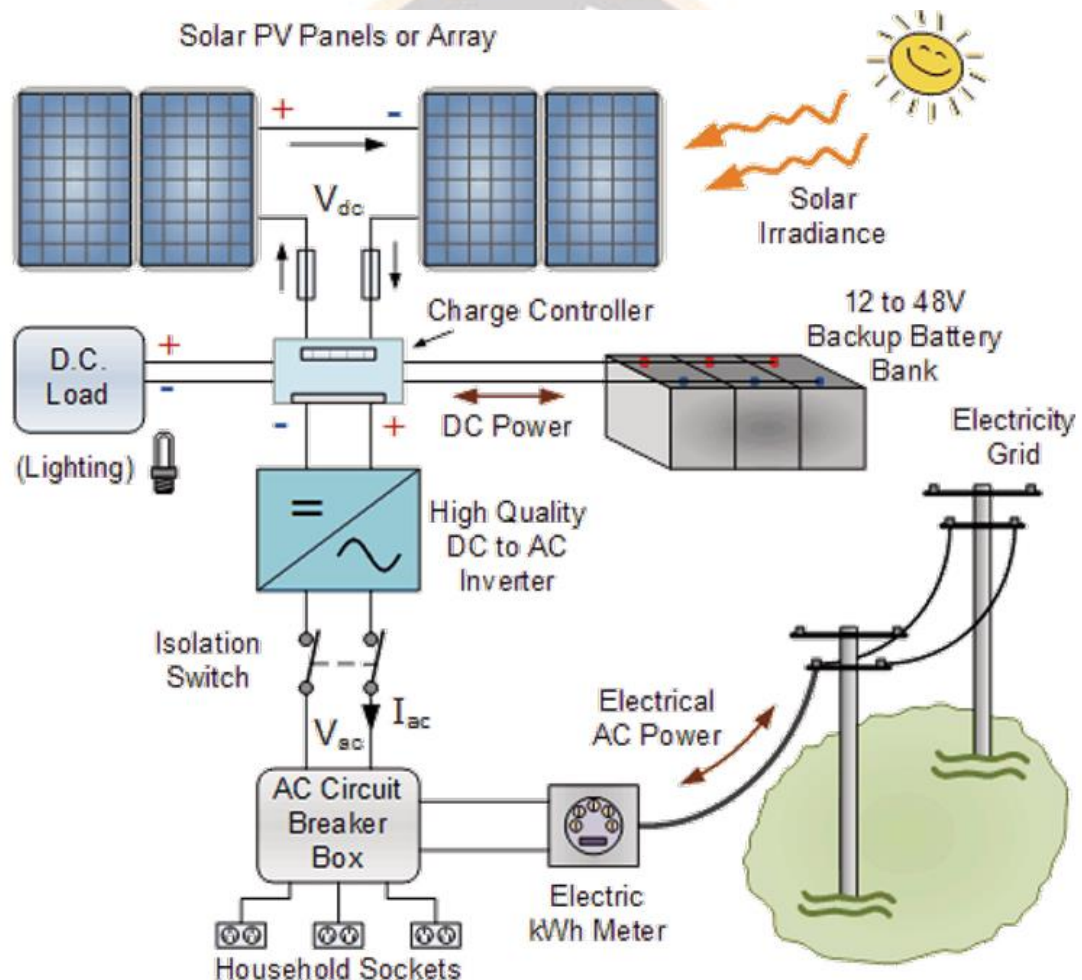
Teknologi PLTS On Grid ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2. 10 PLTS on grid (Permana, 2022)

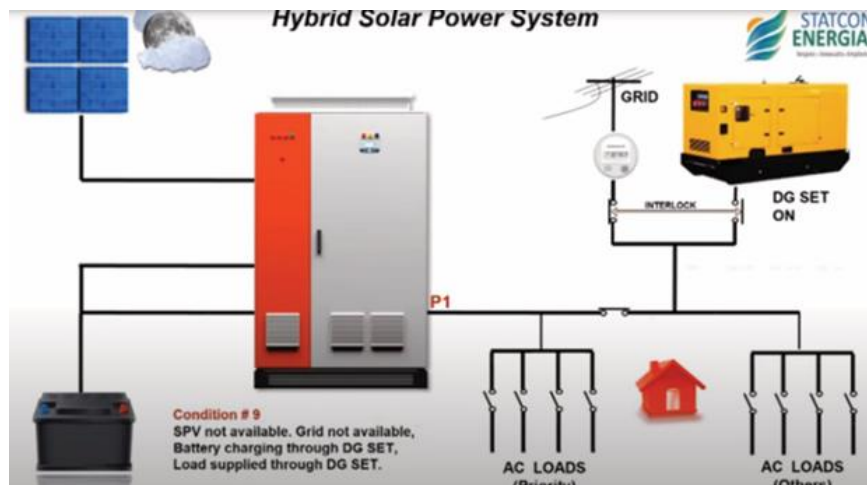
c. PLTS Terhubung Jaringan dan Memiliki Sumber Cadangan Energi (Hybrid)

Pada sistem hybrid sumber energi untuk memenuhi kebutuhan beban tidak hanya berasal pada satu sumber saja. Pada implementasi skala rumah tangga dapat dilihat pada gambar 2.11 dimana topologi jaringan yang digunakan sama dengan sistem off grid namun terhubung dengan jaringan PLN. Namun sistem ini bekerja dengan mekanisme berbeda dimana pada saat PLN padam sumber energi PLTS tidak ikut padam seperti halnya pada sistem on grid. Sumber energi akan di pindah dari sumber PLN menjadi sumber baterai. Dengan demikian pemilihan inverter menjadi sangat penting dalam implementasi sistem hybrid.



Gambar 2. 11 PLTS Hybrid (Permana, 2022)

Pada skala lebih besar dapat dilihat pada gambar 2.12. Sumber energi lain berupa generator set yang bekerja sebagai back up daya PLN. Dalam implementasinya sistem hybrid juga dapat melibatkan sumber energi baru terbarukan lainnya seperti pembangkit mikro hidro dan pembangkit tenaga angin.



Gambar 2. 12 Topologi Jaringan Sistem Hybrid Skala Besar (Permana, 2022)

Berikut ini beberapa kondisi yang dapat dilakukan oleh sistem hybrid mengacu pada topologi gambar 2.12 (Permana, 2022):

1. Pada saat supply PLTS menurun, konsumsi beban ditanggung sepenuhnya oleh PLN termasuk proses pengisian baterai
2. PLTS optimal dan baterai terisi penuh maka konsumsi beban sebagian besar disupply PLTS dan sisanya oleh PLN.
3. PLTS optimal, baterai penuh dan beban nol maka produksi energi akan di ekspor ke PLN. Namun perlu diperhatikan regulasi saat ini tidak lagi memberikan pembiayaan ekspor
4. PLTS optimal dan baterai penuh maka pemenuhan beban dapat dialihkan ke beban prioritas terlebih dahulu.
5. PLTS optimal, baterai kosong dan PLN padam maka generator set aktif dan sinkron dengan inverter untuk memenuhi kebutuhan beban
6. PLTS optimal, baterai kosong dan PLN padam jika beban kecil dan mampu ditangani PLTS saja maka generator set tidak aktif
7. PLTS menurun dan PLN ada jika baterai mencukupi maka akan menangani beban prioritas terlebih dahulu.
8. PLTS menurun bahkan off dan PLN ada maka baterai akan diisi oleh PLN bersamaan dengan pemenuhan kebutuhan beban
9. PLTS dan PLN off maka dimungkinkan generator set mengisi baterai dan memenuhi kebutuhan beban secara bersamaan.

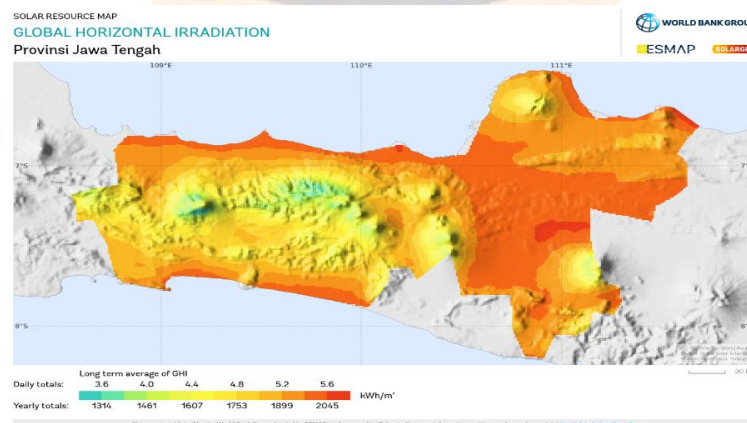
Gambar 2.13 adalah contoh inverter hybrid. Inverter hybrid, yang juga dikenal sebagai smart inverter atau inverter cerdas, merupakan jenis inverter yang tidak hanya berfungsi mengubah arus listrik, tetapi juga mengelola sumber pasokan serta distribusi energi dalam sistem yang menggabungkan konfigurasi on-grid, off-grid, dan sistem cadangan



Gambar 2. 13 Inverter Hybrid (Permana, 2022)

2.3 Potensi Energi Surya di Jawa Tengah

Indonesia adalah salah satu negara Asia Tenggara yang terbentang pada daerah garis khatulistiwa. Negara yang terletak di sepanjang garis itu memiliki waktu radiasi matahari rata-rata 12 jam. Potensi besar dari penyinaran matahari dan waktu rata-rata tahunan merupakan keunggulan utama pemasangan pembangkit listrik tenaga surya di Indonesia. Namun, Kondisi mendung di Indonesia menjadi masalah bagi pembangkit listrik tenaga surya. Awan bisa berubah dengan cepat seiring dengan kondisi geografi Indonesia yang merupakan daerah kepulauan. Semakin tinggi nilai penyinaran matahari berarti lokasi tersebut memiliki potensial PLTS yang lebih tinggi (Alvin Ridho & Winardi dan Agung Nugroho, n.d.).



Gambar 2. 14 Hasil plotting global horizontal irradiation Provinsi Jawa Tengah (Globalsolaratlas.info, 2024)

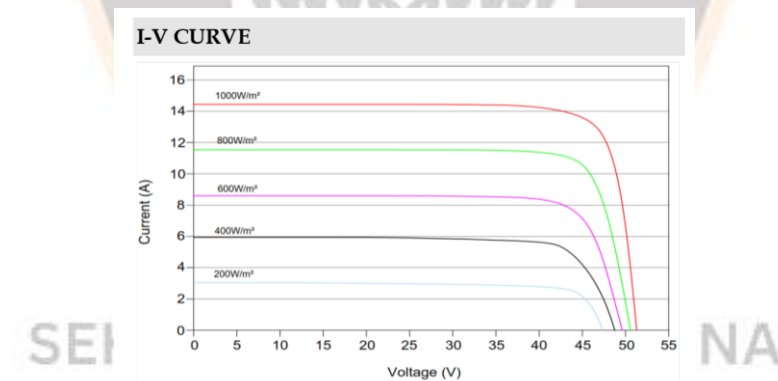
Global Horizontal Irradiation (GHI) adalah total radiasi gelombang pendek yang diterima oleh permukaan horizontal di Bumi. GHI merupakan jumlah iradiasi terestial yang jatuh pada permukaan horizontal terhadap permukaan bumi. GHI merupakan nilai yang penting untuk instalasi fotovoltaik. GHI mencakup Direct Normal Irradiance (DNI) dan Diffuse Horizontal Irradiance (DIF). Berdasarkan plotting pada Globalsolaratlas.info, wilayah Provinsi Jawa Tengah memiliki potensi global horizontal irradiation rata-rata sebesar 4,89 kWh/m² (Globalsolaratlas.info, 2024).

2.4. Parameter Produksi Energi PLTS

Pembangkitan listrik yang dihasilkan oleh suatu PLTS dapat dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti radiasi, daya masukan, suhu modul, tegangan hubung terbuka (open circuit) dan arus hubung singkat (short circuit), faktor pengisian (fill factor), dan daya keluaran maksimum.

2.4.1 Iradiasi

Pembangkitan energi listrik sangat dipengaruhi oleh tingkat atau intensitas penyinaran sinar matahari yang diterima modul surya. Gambar 2.16 menunjukkan karakteristik tegangan (V) dan arus (A). Hal ini menunjukkan bahwa semakin rendah jumlah radiasi matahari yang dapat diterima oleh modul surya, maka semakin rendah arus yang dihasilkannya.



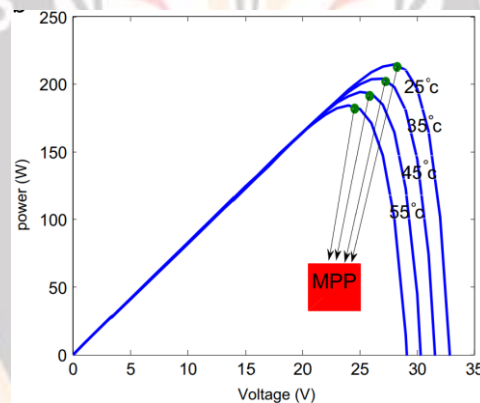
Gambar 2. 15 Kurva Karakteristik Tegangan (V) dan Arus (A) Terhadap Iradiasi Cahaya Matahari (W/m²) (PT Indonesia Solar Global, 2024)

Ketika jumlah radiasi matahari yang diterima modul fotovoltaik berkurang maka arus yang dihasilkan modul juga berkurang secara proporsional, namun perubahan nilai tegangan rangkaian terbuka sangat kecil. Faktanya, efisiensi modul tidak terpengaruh oleh radiasi matahari selama masih dalam standar pengoperasian modul surya. Dengan kata lain, efisiensi pembangkitan listrik modul surya tetap sama baik saat cuaca cerah maupun berawan. Fakta

bahwa panel surya menghasilkan lebih sedikit energi listrik bukan disebabkan oleh penurunan efisiensi panel surya, melainkan karena panel surya menerima lebih sedikit sinar matahari, sehingga produksi listrik menjadi lebih sedikit.

2.4.2 Suhu Modul fotovoltaik

Suhu di sekitar modul surya mempunyai pengaruh yang signifikan terhadap tegangan yang dihasilkannya. Suhu yang tepat sangat penting untuk menghasilkan jumlah listrik maksimum (Teresna & Nengah Suparta, 2024). Gambar 2.17 menunjukkan kurva karakteristik antara daya yang dihasilkan modul surya (W) dan pengaruh suhu terhadap tegangan keluaran (V) modul surya. Kurva karakteristik menunjukkan bahwa semakin dingin modul surya, semakin tinggi pula tegangan dan daya yang dapat dihasilkannya. Berdasarkan kurva karakteristik pengaruh suhu, diperlukan daerah yang sejuk untuk menghasilkan daya yang maksimal.



Gambar 2. 16 Kurva karakteristik pengaruh suhu modul terhadap daya (W) yang dihasilkan dan tegangan (V) keluaran modul fotovoltaik (Maghami, 2016)

Kurva karakteristik menunjukkan bahwa semakin rendah suhu modul surya maka semakin tinggi tegangan dan daya yang dapat dihasilkannya. Berdasarkan kurva karakteristik pengaruh suhu, diperlukan daerah yang sejuk untuk menghasilkan daya yang maksimal.

2.4.3 Daya Masukan

Daya input pada pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) adalah daya yang diterima panel surya dari intensitas radiasi matahari (Fajar et al., 2021). Perhitungan daya masukan PLTS dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut:

$$P_{in} = E \times A \quad (2.2)$$

Dimana :

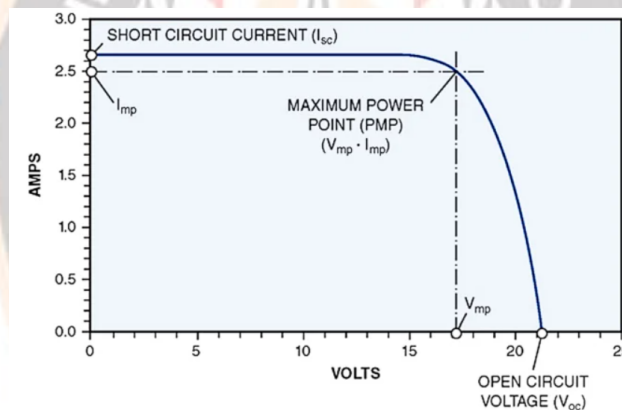
P_{in} = Daya input panel surya (Watt)

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

A = Luas permukaan modul surya (m^2)

2.4.4 Tegangan Hubung Terbuka (Open Circuit) dan Arus Hubung Singkat (Short Circuit)

Dasar pengujian modul surya biasanya untuk memeriksa tingkat arus hubung singkat dan tegangan rangkaian terbuka. Tujuannya adalah untuk mengetahui kinerja puncak maksimum yang dapat dicapai dengan modul surya. Secara sederhana karakteristik modul surya ini digambarkan dengan kurva arus-tegangan (kurva I-V).



Gambar 2. 17 Kurva Karakteristik Antara Besar Arus Hubung Singkat dan Tegangan Rangkaian Terbuka pada Modul Fotovoltaic (Sheikh, 2024)

Jika modul terkena sinar matahari, tegangan yang dihasilkan pada terminal positif dan negatif dapat diukur dengan voltmeter. Pada titik ini, sistem tidak terhubung ke beban, sehingga tidak ada daya yang mengalir. Oleh karena itu, pengukuran ini disebut tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}).

Menambahkan beban yang terhubung paralel menyebabkan lebih banyak arus yang mengalir dan tegangan lebih rendah. Untuk mendapatkan arus maksimum yang dapat dihasilkan oleh modul, anda dapat menghubungkan kedua terminal modul secara langsung sehingga tegangan yang dihasilkan adalah 0 (nol), dan jika diukur dengan amperemeter maka modul ini akan menghasilkan arus maksimum yang dapat dihasilkan. Ini disebut arus hubung singkat (I_{sc}).

2.4.5 Faktor Pengisian (*Fill Factor*)

Faktor pengisian adalah perbandingan tegangan dan arus pada daya maksimum, serta tegangan terbuka dan arus hubung singkat. Artinya tenaga surya tidak selalu tersedia sepenuhnya untuk beban. Harga faktor pengisian yang ideal adalah antara 0,7 dan 0,85. Persamaan berikut digunakan untuk menghitung nilai faktor pengisian:

$$V_{mp \text{ hitung}} = V_{oc \text{ ukur}} \times \frac{V_{mp \text{ nameplate}}}{V_{oc \text{ nameplate}}} \quad (2.3)$$

$$I_{mp \text{ hitung}} = I_{sc \text{ ukur}} \times \frac{I_{mp \text{ nameplate}}}{I_{oc \text{ nameplate}}} \quad (2.3)$$

$$I_{mp \text{ hitung}} = \frac{V_{mp} \times I_{mp}}{V_{oc} \times I_{oc}} \quad (2.4)$$

Dimana;

FF = Fill Factor

Vmp = Tegangan maksimal (V)

Voc = Tegangan open circuit (V)

Imp = Arus maksimal (A)

Isc = Arus short circuit (A)

2.4.6 Daya Keluaran Maksimum

Salah satu spesifikasi yang termasuk dalam PV adalah peak power (daya maksimum). Daya diperoleh dengan mengalikan arus, tegangan dan faktor pengisian. Untuk kinerja modul terbaik, tegangan dan arus harus maksimal. Hal ini terlihat pada kurva I-V pada 1000 W/m. Daya yang dihasilkan modul surya dapat ditentukan dengan menggunakan rumus berikut:

$$P_m = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (2.5)$$

Dimana;

Pm = Daya keluaran maksimum (watt)

Voc = Tegangan rangkaian terbuka (volt)

Isc = Arus hubungan singkat (Ampere)

Untuk memperoleh besar tegangan, arus dan daya yang sesuai dengan kebutuhan, maka panel-panel surya tersebut harus dikombinasikan secara seri dan paralel dengan aturan sebagai berikut (Isyanto, 2018):

1. Untuk memperoleh tegangan keluaran yang besar, maka dua buah (lebih) panel surya harus dihubungkan secara seri.
2. Untuk memperoleh arus keluaran yang besar, maka dua buah (lebih) panel surya harus dihubungkan secara paralel.
3. Untuk memperoleh daya keluaran yang besar maka panel-panel surya harus dihubungkan secara seri dan paralel.

2.4.7 Efisiensi Modul Surya

Efisiensi energi dapat didefinisikan sebagai perbandingan daya yang dihasilkan dengan daya masukan yang diterima. Efisiensi yang rendah mempengaruhi keluaran daya modul surya. Efisiensi panel surya dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\eta = \frac{P_m}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.6)$$

Dimana:

η = efisiensi modul surya (%)

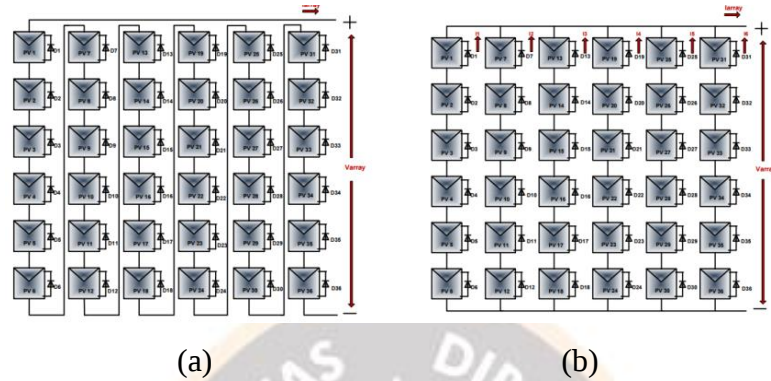
P_m = daya keluaran maksimum (watt)

P_{in} = daya masukan modul surya (watt)

2.4.8 Rangkaian PV Modul Surya

Pada umumnya terdapat dua tipe rangkaian PV sel surya yaitu secara paralel dan seri. Pada rangkaian tersebut masing-masing mempunyai kekurangan dan kelebihan. Sambungan seri modul PV sel surya mempunyai efisiensi dan keandalan yang lebih rendah dibandingkan dengan sambungan paralel (Burhandono et al., 2022). Namun, koneksi paralel modul PV sel surya mempunyai tegangan yang lebih rendah. Menurut (Desai & Mikkili, 2022) rangkaian PV sel surya Seri menghasilkan arus yang lebih sedikit dan kerugian yang tinggi karena jumlah sambungan seri yang lebih banyak sedangkan rangkaian series-paralel (SP) PV sel surya lebih baik daripada rangkaian Seri PV sel surya karena tegangan dan arus yang diinginkan dapat tercapai. Dengan demikian, jelas bahwa Power Conditioning System (PCS) harus memiliki fungsi penambah tegangan, pelacakan Maximum Power Point Tracking (MPPT), dan inversi (Dogga & Pathak, 2019). PV sel surya Array pada dasarnya merupakan kumpulan dari beberapa modul PV sel surya yang saling berhubungan dalam konfigurasi yang berbeda,

misalnya seri-paralel (SP), total cross-tied (TCT), dan jembatan link (BL),honeycomb (HC) seperti disajikan gambar 2.19.



Gambar 2. 18 (a) Rangkaian seri 6x6 (b) Rangkaian seri paralel 6x6 (Desai & Mikkili, 2022)

2.4.9 Inverter

Inverter adalah komponen penting dari banyak sistem kelistrikan, mengubah daya DC menjadi daya AC untuk berbagai aplikasi (Setiawan et al., 2019). Dua jenis inverter yang umum digunakan dalam aplikasi ini adalah inverter satu fasa dan inverter 3 fasa. Meskipun keduanya memiliki tujuan yang sama, ada perbedaan utama antara kedua jenis tersebut yang membuat masing-masing lebih cocok untuk aplikasi tertentu.

Inverter satu fasa adalah jenis inverter yang paling umum digunakan dalam aplikasi perumahan dan komersial kecil. Mereka beroperasi dengan menghasilkan daya AC menggunakan gelombang sinus tunggal, yang menyebabkan tegangan berosilasi antara positif dan negatif 120 atau 240 kali per detik. Gelombang sinus ini bergantian antara nilai positif dan negatif, menciptakan bentuk gelombang yang menyerupai kurva sinus sederhana. Salah satu keuntungan utama inverter satu fasa adalah biayanya yang lebih rendah dan desainnya yang sederhana. Karena menggunakan gelombang sinus tunggal, maka memerlukan peralatan elektronik yang tidak terlalu rumit dan biasanya lebih murah untuk diproduksi. Namun kesederhanaan ini juga mempunyai beberapa kelemahan. Inverter satu fasa memiliki keluaran daya yang lebih rendah dan pengaturan tegangan yang kurang stabil dibandingkan inverter 3 fasa, sehingga kurang cocok untuk aplikasi skala besar atau berdaya tinggi. Aplikasi umum dari inverter satu fasa mencakup sistem tenaga surya perumahan, peralatan kecil, dan aplikasi berdaya rendah lainnya. Mereka juga biasa digunakan di daerah dimana jaringan listrik tidak stabil atau tidak dapat diandalkan, karena mereka dapat dengan mudah dihubungkan ke sistem cadangan baterai. Inverter 3 fasa, seperti namanya, menggunakan tiga gelombang sinus (tiga

gelombang sinus dengan perbedaan fasa 120 derajat satu sama lain) untuk menghasilkan daya AC, menghasilkan tegangan yang berosilasi antara positif dan negatif sebanyak 208, 240, atau 480 kali. Per detik. Hal ini memungkinkan keluaran daya yang lebih besar, pengaturan tegangan yang lebih stabil, dan efisiensi yang lebih besar dibandingkan dengan inverter satu fasa. Namun, pembuatannya juga lebih kompleks dan mahal. Salah satu keunggulan utama inverter 3 fasa adalah kemampuannya memberikan keluaran daya tingkat tinggi. Mereka umumnya digunakan dalam sistem tenaga komersial dan industri skala besar, kendaraan listrik, dan aplikasi berdaya tinggi lainnya. Efisiensinya yang lebih besar dan pengaturan tegangan yang stabil juga membuatnya cocok untuk aplikasi yang membutuhkan daya yang andal. Namun inverter 3 fasa juga memiliki beberapa kelemahan. Inverter ini biasanya lebih mahal dibandingkan inverter satu fasa dan memerlukan perangkat elektronik yang lebih rumit untuk beroperasi. Kompleksitas ini dapat membuat pemasangan dan pemeliharaannya lebih sulit.

2.5. Parameter Performa Ratio PLTS

Analisis aspek teknis kinerja sistem dilakukan dengan menghitung tiga kategori sistem PLTS: *Final Yield (YF)*, *Reflection Yield (YR)*, dan *Performance Ratio (PR)* berdasarkan standar IEC 61724 (Ariawan, 2022).

a. Hasil akhir / *Yield Final (YF)*

Perhitungan pembangkitan tenaga listrik (kWh) setelah sistem PLTS dipasang dibagi dengan daya puncak (kWp) yang dihasilkan oleh PV array. Nilai hasil akhir (YF) dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$YF = \frac{E_{pv}}{P_o} \quad (2.7)$$

Dimana :

YF = produksi energi yang dihasilkan PLTS per daya terpasang

E_{pv} = energi yang dihasilkan PLTS (kWh)

P_o = daya PLTS yang terpasang (kWp)

b. Hasil acuan / *Yield Reference (YR)*

Ditentukan dengan membagi total radiasi matahari (H_t) atas luas permukaan bumi dalam kWh/m² dengan radiasi matahari acuan/STC (G_{stc}) pada kondisi ideal dengan nilai 1.000 W/m² (Erawan et al., 2023). Nilai acuan hasil (YR) dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut:

$$YR = \frac{H_t}{G_{stc}} \quad (2.8)$$

Dimana :

YR = potensi energi yang dihasilkan PLTS saat kondisi ideal (STC)

Ht = radiasi pada bidang array (kWh/m²)

Gstc = radiasi referensi saat kondisi ideal/STC (1.000 W/m²)

c. Rasio kinerja/Performa Ratio (PR)

Didapatkan dengan membandingkan daya yang dihasilkan oleh arus searah dan daya keluaran oleh arus bolak-balik (Kamil et al., 2024). Nilai rasio kinerja (PR) dapat dihitung dengan menggunakan rumus berikut:

$$PR = \frac{YF}{YR} \times 100\% \quad (2.9)$$

Dimana :

PR = *Performance Ratio* atau rasio kinerja (%)

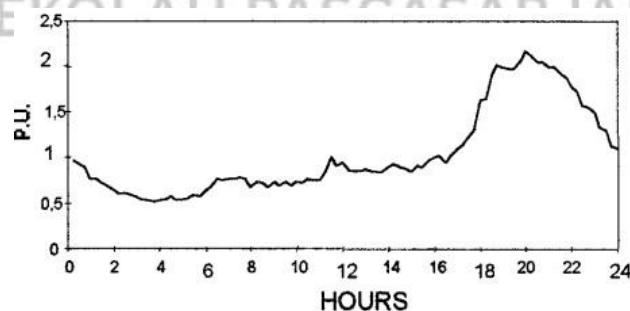
YF = *Final yield* atau hasil akhir

YR = *Reference yield* atau hasil acuan

Objek penelitian berupa bangunan gedung pemerintahan memiliki karakteristik tersendiri dibandingkan dengan bangunan lainnya. Bangunan perkantoran cenderung mengonsumsi lebih banyak listrik daripada jenis bangunan lain karena jam operasional yang lebih panjang dan tingkat hunian yang lebih tinggi. Secara umum terdapat 3 contoh pola beban sebagai diantaranya residensial, komersial dan Industrial berikut :

a. Pola beban residensial

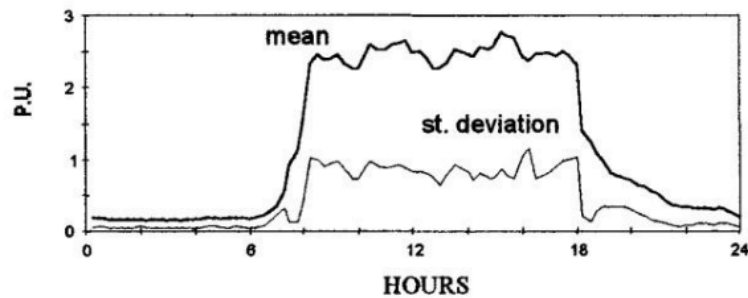
Pola beban residensial adalah pola konsumsi energi selama satu hari yang merepresentasikan kegiatan di sektor rumah tangga ditunjukkan gambar 2.20.



Gambar 2. 19 pola beban residensial (Jardini, 2020)

b. Pola beban komersial

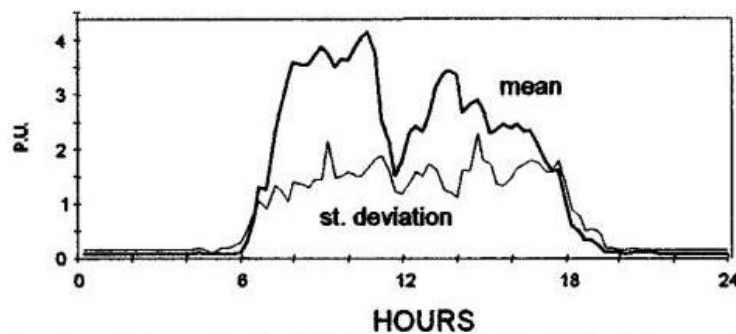
Pola beban komersial adalah pola energi selama satu hari yang merepresentasikan kegiatan di sektor komersial seperti UMKM. Kegiatan di sekore komersial lebih banyak mengkonsumsi beban pada siang hari yang ditunjukkan gambar 2.21.



Gambar 2. 20 pola beban komersial (Jardini, 2020)

c. Pola beban industrial

Pola beban industrial adalah pola energi selama satu hari yang merepresentasikan kegiatan di sektor komersial yang meliputi kegiatan pembuatan bahan mentah menjadi bahan jadi yang siap dikonsumsi ditunjukkan oleh gambar 2.22.



Gambar 2. 21 pola beban industrial (Jardini, 2020)

2.6. Analisis Keekonomian

Analisis aspek ekonomi dilakukan dengan menghitung kelayakan investasi berdasarkan *net present value* (NPV), *benefit cost ratio* (BCR) dan *payback period* (PP) proyek pemanfaatan PLTS yang dipasang pada atap Gedung Kantor Sekretariat DPRD Provinsi Jawa Tengah.

a. Biaya Investasi

Biaya investasi adalah pengeluaran modal yang digunakan untuk menghasilkan suatu produk berupa barang atau jasa (I. Pateda et al., 2023). Sifat dari biaya adalah pengorbanan

ekonomi. Biaya dapat dibedakan menjadi bermacam-macam sesuai dengan tujuan pengelompokannya. Keberagaman jenis biaya diakibatkan oleh beragamnya tujuan penentuan biaya (Faisal & Astuti, 2022). Biaya yang tidak transparan meliputi biaya investasi dan biaya operasi dan pemeliharaan. Biaya investasi terdiri dari biaya pelaksanaan pembangunan PLTS. Biaya operasi dan pemeliharaan diasumsikan 1-2% dari biaya investasi.

$$\text{Biaya} = \text{Investasi Awal} + \text{Operasional dan Perawatan} \quad (2.10)$$

b. Net Present Value (NPV)

Metode perhitungan nilai NPV merupakan salah satu metode yang digunakan dalam menentukan keputusan kelayakan suatu investasi. Jika nilai NPV positif maka proyek tersebut layak dilaksanakan, namun jika NPV yang ditentukan negatif maka proyek tersebut tidak layak dilaksanakan. Penghitungan NPV dilakukan dengan mengekstrapolasi perhitungan pendapatan dan biaya yang dikeluarkan selama umur proyek, yang biasanya 20 hingga 25 tahun (Rangkuti & Teknik Mesin, 2016), dengan menggunakan rumus berikut:

$$NPV = PWB - PWC \quad (2.11)$$

$$NPV = \sum_{t=0}^n Cbt (FBT)^t - \sum_{t=0}^n Cct (FBT)^t$$

Dimana :

NPV = *Net Present Value* (Rp)

PWB = *Present Worth Benefit* (Rp)

PWC = *Present Worth Cost* (Rp)

Cb = *Cashflow Benefit* (Rp)

Cc = *Cashflow Cost* (CC)

FBP = Faktor Bunga Present

n = Umur investasi/proyek infrastruktur (tahun)

t = Lama investasi (tahun)

c. Benefit Cost Ratio (BCR)

Pada analisa metode BCR, jika nilai BCR lebih besar dari 1, maka proyek tersebut dinyatakan layak dilaksanakan karena nilai manfaat yang dicapai selama umur ekonomi proyek lebih besar dibandingkan biaya dan investasinya. Jika nilai BCR kurang dari 1 berarti

keuntungan proyek buruk (*unrealizable*) atau dinyatakan tidak layak untuk dilaksanakan. Rumus berikut dapat digunakan untuk perhitungan BCR (Newnan et al., 2012) :

$$BCR = \frac{\sum_{t=0}^n Cbt (FBI)t}{\sum_{t=0}^n Cct (FBI)t} \quad (2.12)$$

Dimana :

BCR	= <i>Benefit Cost Ratio</i>
PWB	= <i>Presnt Worth Benefit</i> (Rp)
PWC	= <i>Present Worth Cost</i> (Rp)
Cb	= <i>Castflow Benefit</i> (Rp)
Cc	= <i>Cashflow Cost</i> (Rp)
FBP	= <i>Faktor Bunga Present</i>
n	= <i>Umur investasi/proyek infrastruktur</i> (tahun)
t	= <i>Lama investasi</i> (tahun)

d. *Payback Period* (PP)

Metode perhitungan *Payback period* (PP) digunakan untuk menentukan waktu yang diperlukan untuk memulihkan nilai investasi (Ramadhan dan Rangkuti, 2016) suatu proyek. Jika jangka waktu *Payback period* (PP) lebih pendek dari jangka waktu proyek, maka investasi proyek dianggap layak, namun sebaliknya jika jangka waktu *Payback period* (PP) lebih lama dari jangka waktu proyek, maka investasi proyek dianggap belum layak. *Payback period* (PP) dapat dihitung dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$PP = (n - 1) + \frac{\text{Arus Kas Bersih Kumulatif tahun } n-1}{1\text{Arus Kas Bersih Tahun } n} \times 1 \text{ tahun} \quad (2.13)$$

Dimana :

PP	= <i>Payback Period</i> (PP)
n	= <i>Umur investasi/proyek infrastruktur</i> (tahun)

2.7. Gas Rumah Kaca (Emisi CO₂)

Gas Rumah Kaca (GRK) merupakan suatu jenis gas yang mempunyai peranan penting terhadap bumi, tanpanya suhu rata-rata bumi akan jauh lebih dingin sehingga bumi tidak dapat ditinggali oleh makhluk hidup salah satunya manusia. Akan tetapi, bila semakin tinggi konsentrasi GRK di atmosfer maka semakin tinggi pula radiasi energi matahari yang diperangkanya. Beberapa gas seperti karbondioksida (CO₂), dinitrooksida (N₂O), dan metana (CH₄) merupakan gas yang berkontribusi terhadap peningkatan GRK. Peningkatan GRK terjadi akibat adanya kontribusi oleh beberapa faktor sebagai berikut:

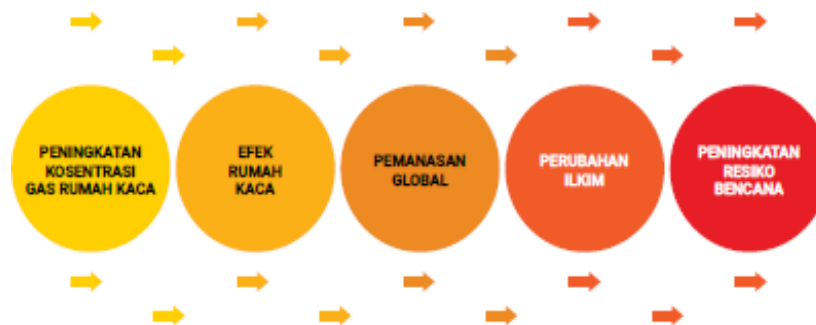
- a. **Energi**, Pemanfaatan berbagai macam bahan bakar fosil atau BBM memberi kontribusi besar terhadap naiknya konsentrasi GRK.
- b. **Kehutanan**, Salah satu fungsi hutan adalah sebagai penyerap emisi GRK. Karena hutan dapat mengubah CO₂ menjadi O₂. Sehingga kerusakan hutan akan memberi kontribusi terhadap naiknya emisi GRK.
- c. **Peternakan**, Di sektor ini emisi GRK dihasilkan dari pemanfaatan pupuk, pembusukan sisa- sisa pertanian dan pembusukan kotoran-kotoran ternak.
- d. **Pertanian**, Pada sektor ini penyebab utama peningkatan emisi GRK berasal dari adanya emisi metana yang tinggi yang berasal dari tanah sawah beririgasi. Tanah sawah adalah salah satu penyumbang gas metana sekitar 20-120 juta ton ke atmosfer.
- e. **Sampah**, Sampah memiliki potensi untuk memberi sumbangan terhadap meningkatnya emisi GRK, peristiwa ini terjadi pada penumpukan sampah tanpa diolah yang melepaskan gas metana (CH₄). CH₄ diemisikan dari Tempat Pembuangan Akhir (TPA) sebagai hasil dekomposisi anaerobik sampah organik.

Konsentrasi GRK di atmosfer semakin meningkat karena kegiatan manusia terlebih kegiatan industri yang memerlukan banyak sumber energi yang sampai saat ini sebagian besar berasal dari minyak dan gas bumi. Meningkatnya GRK mengakibatkan suhu di atmosfer meningkat dan menyebabkan terjadinya pemanasan global yang berdampak terhadap bumi. Fenomena inilah yang dinamakan sebagai efek rumah kaca.



Gambar 2. 22 Fenomena Efek Rumah Kaca (Hindarto, 2018)

Efek rumah Kaca merupakan sebuah kondisi yang mengakibatkan peningkatan suhu atau biasa dikenal dengan pemanasan global. Pemanasan global mengakibatkan terjadinya perubahan iklim. Penyebab utama perubahan iklim karena kenaikan suhu di atmosfer bumi yang menyebabkan keseimbangan sistem iklim terganggu sehingga mengubah iklim di bumi. Berikut urutan sebab dan akibat terjadinya perubahan iklim.



Gambar 2. 23 Proses Perubahan Iklim (Adedeji, O, 2014)

Meningkatnya suhu permukaan bumi akan mengakibatkan adanya perubahan iklim yang sangat ekstrem di bumi. Hal ini dapat mengakibatkan terganggunya hutan dan ekosistem lainnya sehingga dapat mengurangi kemampuan untuk menyerap karbondioksida. Selain itu, pemanasan global dan perubahan iklim tentunya akan berdampak pada keberlangsungan makhluk hidup lainnya.

Berdasarkan metodologi perhitungan reduksi emisi dan/atau peningkatan serapan GRK dalam kerangka verifikasi aksi mitigas, reduksi emisi ditentukan berdasarkan pemantauan ex-post konsumsi bahan bakar dan listrik (KLHK, 2020), dengan perhitungan sebagai berikut:

$$ER_y = \sum ER_{elec.saving,j,y} + ER_{fuel.saving,j,y} + ER_{fuel.switching,j,y} + ER_{solar\ PV\ atap,j,y} \quad (2.14)$$

Dimana:

ER_y = reduksi emisi pada tahun y (tCO_2)

$ER_{elec.saving,j,y}$ = reduksi emisi yang disebabkan penghematan listrik dari unit bangunan j pada tahun y (tCO_2)

$ER_{fuel\ saving,j,y}$ = reduksi emisi yang disebabkan penghematan bahan bakar dari unit bangunan j pada tahun y (tCO_2)

$ER_{fuel\ switching,j,y}$ = reduksi emisi yang disebabkan penghematan peralihan bahan bakar dari unit bangunan j pada tahun y (tCO_2)

$ER_{solar\ PV\ atap,j,y}$ = reduksi emisi yang disebabkan penggunaan solar PV dari unit bangunan j pada

tahun y (tCO_2)

j = setiap unit bangunan yang termasuk dalam aksi mitigasi

Reduksi emisi dari penggunaan Solar PV atap ditentukan berdasarkan jumlah emisi baseline aksi mitigasi solar PV (tCO_2e) dikurangi emisi yang ditimbulkan dari aksi mitigasi solar PV, dikurangi jumlah emisi leakage aksi mitigasi solar PV, dengan perhitungan sebagai berikut :

$$ER_{solar\ atap,j,y} = BE_{solar\ PV,j,y} - PE_{solar\ PV,j,y} - LE_{solar\ PV,j,y} \quad (2.15)$$

Dimana:

$ER_{solar\ PV\ atap,j,y}$ = reduksi emisi yang disebabkan penggunaan solar PV dari unit bangunan j pada tahun y (tCO_2)

$BE_{solar\ PV,j,y}$ = emisi baseline aksi mitigasi solar PV dalam tahun y ($tCO_2.e$)

$PE_{solar\ PV,j,y}$ = emisi yang ditimbulkan dari aksi mitigasi solar PV dalam tahun y ($tCO_2.e$)
= 0

$LE_{solar\ PV,j,y}$ = emisi leakage aksi mitigasi solar PV dalam tahun y (tCO_2e)
= 0

$$BE_{solar\ PV,j,y} = EG_{Blsolar\ PV,j,y} \times EF_{CO_2,y} \quad (2.16)$$

Dimana:

$EG_{Blsolar\ PV,j,y}$ = jumlah listrik neto yang digantikan oleh aksi mitigasi pada tahun y (MWh)

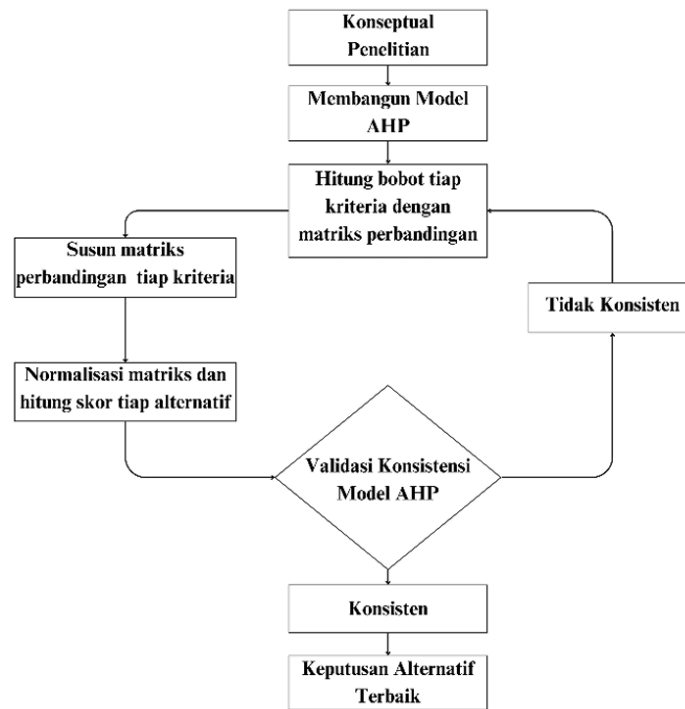
$EF_{CO_2,y}$ = Faktor emisi ($ton\ CO_2/MWh$) – sesuai faktor emisi yang dipublikasikan Ditjen Gatrik KESDM

2.8. Analisis Hirarki Proses (AHP) Alternatif Spesifikasi PLTS Atap

AHP adalah suatu metode analisis yang digunakan untuk menentukan urutan prioritas suatu rencana. Proses AHP dimulai dengan membangun struktur hierarki yang menggambarkan masalah secara keseluruhan. Evaluasi kelayakan spesifikasi teknis PLTS Atap pengembangan dilakukan bertujuan untuk mengetahui alternatif teknis PLTS atap terbaik atau ideal diterapkan. Langkah proses AHP selanjutnya disajikan dalam Gambar 2.25.

Kriteria penentu kelayakan teknis PLTS atap yang di evaluasi dalam penelitian ini yaitu luas area, jenis panel PV, jenis inverter, produksi listrik, performa ratio, serta sistem losses. Seluruh kriteria ini kemudian dibandingkan tingkat kepentingannya secara berpasangan untuk

menentukan bobot relatifnya. Perbandingan tiap kriteria dilakukan berdasarkan pendapat dari ahli atau stakeholder yang relevan. Proses ini menggunakan sembilan skala kepentingan yang dikenal sebagai skala Saaty, dengan ketentuan sesuai dengan Tabel 2.1



Gambar 2. 24 Alur Proses Analisis Hirarki Proses (AHP)

Tabel 2. 1 Argumen untuk membantu mengukur perbandingan kriteria. (Brito, 2024)

Intensi	Definisi	Penjelasan
1	Sama Pentingnya	Kedua aktifitas memberikan kontribusi yang sama terhadap tujuan
3	Agak Lebih Penting	Pengalaman dan penilaian sedikit lebih menyukai satu aktifitas dibandingkan yang lain
5	Sangat Penting	Pengalaman dan penilaian sangat menyukai satu aktivitas dibandingkan yang lain.
7	Sangat Penting dan Terbukti	Aktivitas sangat disukai dan dominasinya telah terbukti dalam praktek
9	Sangat Penting Sekali	Bukti yang mendukung satu aktivitas dibandingkan yang lain adalah pada tingkat tertinggi yang mungkin
2,4,6,8	Nilai Antara	Ketika diperlukan kompromi antara dua penilaian yang berdekatan
Timbal Balik	Jika aktifitas i diberikan salah satu angka diatas, dibandingkan dengan aktifitas j, maka j memiliki nilai sebaliknya jika dibandingkan dengan i.	Jika kita memberikan nilai tertentu pada aktivitas A saat dibandingkan dengan aktivitas B, maka nilai pada Aktivitas B saat dibandingkan aktivitas A adalah kebalikannya

Penilaian dilakukan terhadap 11 kriteria utama yang telah ditentukan sebelumnya. Setiap ahli memberikan pendapat dalam bentuk matriks perbandingan berpasangan (pairwise comparison), yang kemudian digabungkan menggunakan metode rata-rata geometrik untuk mendapatkan nilai konsensus. Berikut adalah profil tiga ahli yang menjadi narasumber penelitian:

Tabel 2. 2 Latar Belakang Narasumber Ahli (Penelitian, 2025)

Nara sumber	Latar Belakang	Keahlian	Lama Pengalaman	Kedudukan	Asal Institusi
Ahli 1	OPD Objek Penelitian	Kebijakan dibidang energi	20 Tahun	Kepala Biro	Biro ISDA Prov. Jawa Tengah
Ahli 2	OPD Objek Penelitian	Auditor Energi, Manager Energi dan Asesor Konservasi Energi	10 Tahun	Analisis Kebijakan Biro Infrast dan SDA	Biro ISDA Prov. Jawa Tengah
Ahli 3	OPD Teknis	Auditor Energi dan Teknisi PLTS Atap	10 Tahun	Inspektur Ketenagalist rikan	Dinas ESDM Prov. Jawa Tengah

Perhitungan bobot tiap kriteria kemudian dilakukan terhadap hasil tabel perbandingan yang diperoleh dari pendapat para ahli. Perhitungan tersebut dilakukan dengan persamaan

$$W_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{c_{ij}}{\sum_{k=1}^n c_{kj}} \quad (2.17)$$

Perhitungan lanjutan dilakukan dengan membandingkan nilai indeks konsistensi (CI) dengan random index (RI), sehingga diperoleh nilai Rasio konsistensi (CR) untuk mengevaluasi kebenaran hasil pembobotan setiap aspek penentu keputusan (Persamaan 2.18). Indeks Acak (RI) berasal dari sampel 500 matriks timbal balik yang dihasilkan secara acak, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.2. Nilai CR harus kurang dari 0,10 atau 10% jika lebih dari itu maka skala penilaian bobot dianggap tidak konsisten atau tidak valid [10]

$$\lambda_{max} = \frac{W_i}{\sum_{j=1}^n c_{ij} \times W_j}; CI = \frac{\lambda_{max}-1}{n-1}; CR = \frac{CI}{RI} \quad (2.18)$$

Tabel 2. 3 Nilai RI Berdasarkan Banyak Kriteria

n	1	2	3	4	5	6	7	8
RI	0	0	0,52	0,88	1,11	1,25	1,34	1,40

Secara matematis pengambilan keputusan alternatif spesifikasi PLTS atap yang paling ideal untuk dikembangkan, dihitung menggunakan rumus persamaan 2.18. Total nilai alternatif tertinggi merupakan keputusan yang terbaik atau paling ideal yang akan dipilih. Penilaian

terhadap alternatif spesifikasi dilakukan dengan menggunakan skala skor 1 hingga 5. Penentuan skor didasarkan pada kinerja masing-masing alternatif PLTS atap serta tingkat kesesuaiannya dengan kebutuhan daya gedung Sekretariat DPRD Provinsi Jawa Tengah. Skor 1 merepresentasikan tingkat kesesuaian paling rendah, sedangkan skor 5 menunjukkan kesesuaian paling tinggi untuk memenuhi kebutuhan gedung. Tabel 5 menjelaskan kriteria penilaian untuk setiap parameter pada rentang skor 1 hingga 5.

Tabel 2. 4 Kriteria Penilaian Skor Alternatif Spesifikasi PLTS Atap Gedung (Penelitian, 2025)

Kode	Kriteria	Skor 1	Skor 2	Skor 3	Skor 4	Skor 5
K.1.1	Luas Atap (m ²)	Sangat Rendah	Kurang Efisien	Cukup Efisien	Efisien	Sangat Efisien
K.1.2	Jenis PV (wattpeak/unit)	Sangat Rendah	Kurang Efisien	Cukup Efisien	Efisien	Sangat Efisien
K.1.3	Jenis dan Kapasitas Inverter (kW)	Sangat Rendah	Kurang Efisien	Cukup Efisien	Efisien	Sangat Efisien
K.1.4	Produksi Energi /Jam Rata Rata (Wh)	Sangat Rendah	Kurang Efisien	Cukup Efisien	Efisien	Sangat Efisien
K.1.5	Performa Ratio PR (%)	Sangat Rendah	Kurang Efisien	Cukup Efisien	Efisien	Sangat Efisien
K.1.6	Losses (%)	Sangat Rendah	Kurang Efisien	Cukup Efisien	Efisien	Sangat Efisien
K.2.1	Reduksi (Emisi tonCO ₂)	Sangat Rendah	Kurang Efisien	Cukup Efisien	Efisien	Sangat Efisien
K.3.1	Biaya Investasi	Sangat Rendah	Kurang Efisien	Cukup Efisien	Efisien	Sangat Efisien
K.3.2	<i>Net Present Value</i>	Sangat Rendah	Kurang Efisien	Cukup Efisien	Efisien	Sangat Efisien
K.3.3	<i>Benefit Cost Ratio</i>	Sangat Rendah	Kurang Efisien	Cukup Efisien	Efisien	Sangat Efisien
K.3.4	<i>Payback Period</i>	Sangat Rendah	Kurang Efisien	Cukup Efisien	Efisien	Sangat Efisien

Setelah diperoleh alternatif paling optimal maka langkah selanjutnya adalah melakukan analisis sensitivitas untuk menilai sejauh mana perubahan pada input, seperti bobot kriteria atau nilai perbandingan berpasangan, memengaruhi hasil akhir keputusan (Triantaphyllou & Sánchez, 1997). Tujuannya adalah mengevaluasi stabilitas dan keandalan model. Jika perubahan kecil pada bobot menyebabkan perubahan besar pada peringkat alternatif, maka keputusan dianggap sensitif.

Analisis sensitivitas membantu memahami dampak ketidakpastian penilaian subjektif terhadap hasil AHP (Huang, 2002). Pendekatan ini dilakukan dengan memodifikasi bobot kriteria secara bertahap dan mengamati perubahan urutan prioritas. Metode ini juga berfungsi untuk mengidentifikasi kriteria dominan yang paling memengaruhi hasil keputusan, sehingga dapat menjadi fokus utama dalam proses penilaian (Lin, 2013).

2.9. Perangkat Lunak Pvsyst 7.2

PVsyst merupakan salah satu perangkat lunak tertua yang dikembangkan oleh Universitas Genewa Swiss. Perangkat lunak ini dirancang untuk digunakan oleh arsitek, insinyur, dan peneliti dalam merencanakan proyek pengembangan pembangkit listrik tenaga surya. Pvsyst dilengkapi dengan data cuaca, database modul PV, inverter dan meteo data serta dapat mengimpor data berbagai sumber. Perangkat lunak ini digunakan untuk desain simulasi PLTS on grid ataupun off grid. Desain yang ditampilkan dapat mensimulasikan spesifikasi teknis PLTS meliputi; energi yang akan dihasilkan, jumlah modul surya, jumlah rangkaian modul surya, jenis inverter, performance ratio dan nilai keekonomian. Pvsyst 7.2 merupakan perangkat lunak Pvsyst yang dikeluarkan pada 24 April 2021. Nilai error software Pvsyst dibandingkan dengan nilai pengukuran hanya berkisar 2,3% yang menunjukkan bahwa software Pvsyst dapat digunakan sebagai perangkat simulasi untuk memperoleh daya reaktif dari sistem panel surya (Burduhos et al., 2020). PVSyst memberikan laporan evaluasi dengan tampilan yang mudah dipahami serta mudah dalam pengunduhan. Berikut contoh laporan evaluasi PVsyst ditampilkan pada gambar 2.25.



Project: Gedung Setwan Pengembangan

Variant: LR7-72HVVH-670M area IKO inv 36 mod seri 17

PVsyst V7.2.11

VCT, Simulation date:
20/04/25 02:14
with v7.2.11

Project summary

Geographical Site

Semarang Gedung Setwan

Indonesia

Situation

Latitude -6.99 °S

Longitude 110.42 °E

Altitude 17 m

Time zone UTC+7

Project settings

Albedo 0.20

Meteo data

Semarang Gedung Setwan

Meteonorm 8.0 (2010-2014), Sat=100% - Synthetic

System summary

Grid-Connected System

PV Field Orientation

Fixed plane

Tilt/Azimuth 15 / -30 °

System information

PV Array

Nb. of modules 68 units

Pnom total 45.6 kWp

No 3D scene defined, no shadings

Near Shadings

No Shadings

User's needs

Unlimited load (grid)

Inverters

Nb. of units 1 unit

Pnom total 36.0 kWac

Pnom ratio 1.266

Results summary

Produced Energy 72.50 MWh/year

Specific production 1591 kWh/kWp/year

Perf. Ratio PR 84.43 %

Table of contents

Project and results summary 2

General parameters, PV Array Characteristics, System losses 3

Main results 4

Loss diagram 5

Special graphs 6

Gambar 2. 25 Tampilan Laporan Simulasi Pvsyst (Peneliti, 2025)

2.10. Perangkat Lunak SuperDecisions

Perangkat lunak SuperDecisions merupakan salah satu aplikasi yang banyak digunakan dalam pengambilan keputusan multikriteria dengan pendekatan Analytic Hierarchy Process (AHP) dan Analytic Network Process (ANP). Aplikasi ini dikembangkan oleh *Creative Decisions Foundation (CDF)* sebagai implementasi praktis dari teori AHP dan ANP yang diperkenalkan oleh Thomas L. Saaty pada tahun 1980-an.

Kelebihan utama SuperDecisions adalah kemampuannya dalam memodelkan permasalahan kompleks melalui representasi struktur hierarki maupun jaringan. Pada AHP, hubungan antar elemen bersifat linier dari tujuan, kriteria, subkriteria hingga alternatif, sedangkan pada ANP, SuperDecisions mampu menggambarkan hubungan saling ketergantungan antar kriteria maupun antar alternatif. Dengan demikian, perangkat lunak ini sering dipilih untuk analisis keputusan yang melibatkan banyak faktor dan memiliki tingkat kompleksitas tinggi. Secara umum, SuperDecisions menyediakan beberapa fungsi utama, antara lain:

1. Membentuk struktur hirarki atau jaringan keputusan sesuai dengan permasalahan yang dianalisis.
2. Melakukan **pairwise comparison** antar elemen untuk mendapatkan bobot prioritas.
3. Menghitung nilai **eigenvector** serta menguji tingkat konsistensi melalui *Consistency Ratio (CR)*.
4. Melakukan sintesis prioritas sehingga diperoleh urutan alternatif terbaik berdasarkan bobot kriteria.
5. Menyajikan hasil dalam bentuk tabel maupun grafik untuk memudahkan interpretasi.

Dengan kemampuannya tersebut, SuperDecisions dapat menjadi alat bantu yang efektif dalam mendukung proses analisis keputusan pada penelitian ini. Selain itu, penggunaan perangkat lunak ini juga meningkatkan validitas hasil karena perhitungan matematis dilakukan secara sistematis dan transparan, sehingga dapat meminimalisasi potensi kesalahan manual.