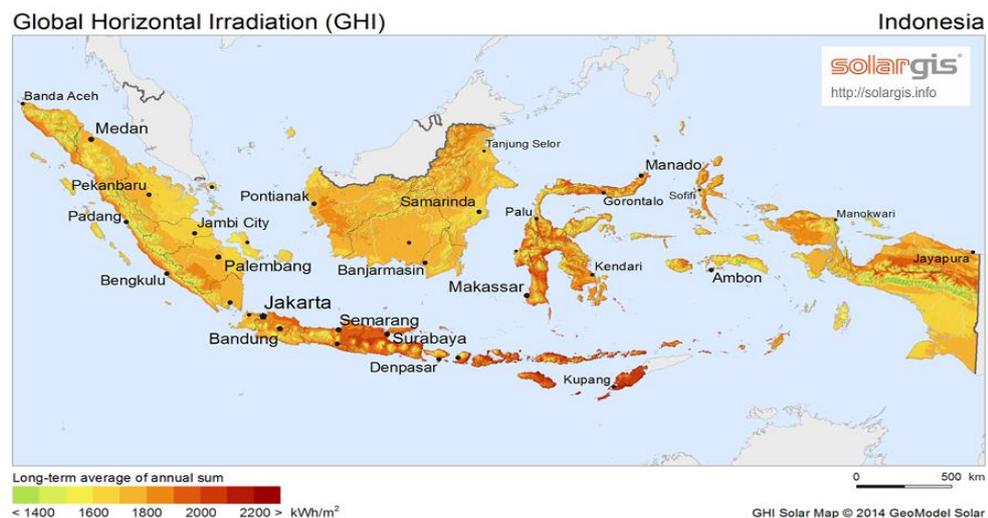


BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Potensi Energi Matahari

Energi matahari atau biasa disebut juga sebagai energi surya adalah energi yang berasal dari radiasi sinar matahari. Indonesia memiliki intensitas energi matahari yang sangat besar karena wilayahnya yang terbentang melintasi garis khatulistiwa dengan radiasi sinar 4,80 kWh/m² tiap harinya. Energi Surya dapat dimanfaatkan secara langsung dengan aplikasi yang terbagi menjadi dua jenis, yaitu solar thermal untuk aplikasi pemanasan dan solar photovoltaic untuk pembangkit listrik (Safrizal, 2017).



Gambar 2.1 Sebaran Potensi Energi Surya di Indonesia
(Sumber: Global Solar Atlas 2.0, 2020)

Secara umum potensi energi surya di Indonesia sangat menjanjikan karena secara geografis berada pada garis lintang -7,4003 dan garis bujur 109,6259 sehingga memiliki iklim tropis. Dengan nilai rata – rata insolasi matahari di Indonesia mencapai 5,045 kWh/m²/hari maka PLTS sangat berpotensi untuk dapat dikembangkan (Dewan Energi Nasional, 2021).

Tabel 2.1 Sebaran Energi Surya di Indonesia

Lokasi	Provinsi	Latitude	Longitude	Insolasi Matahari (kWh/m ² /hari)
Pekanbaru	Riau	0,506	101,437	4,67
Jambi	Jambi	-1,609	103,607	4,63
Palembang	Sumatera Selatan	-2,990	104,756	4,81
Jakarta	DKI Jakarta	-6,200	106,816	4,87
Bandung	Jawa Barat	-6,914	107,609	5,02
Semarang	Jawa Tengah	-6,966	110,416	5,48
Yogyakarta	DIY	-7,803	110,374	5,26
Pontianak	Kalimantan Barat	0,000	109,333	4,67
Surabaya	Jawa Timur	-7,250	112,768	5,27
Banjarmasin	Kalimantan Selatan	-3,316	114,590	4,84
Denpasar	Bali	-8,650	115,216	5,54
Samarinda	Kalimantan Timur	-0,502	117,153	4,84
Makkasar	Sulawesi Selatan	-5,135	119,423	5,24
Kendari	Sulawesi Tenggara	-3,972	122,514	5,07
Manado	Sulawesi Utara	1,474	124,842	5,51
Ambon	Maluku	-3,654	128,190	5,00
Rata-rata				5,045

Dengan pemanfaatan teknologi secara tepat, tidak hanya energi listrik yang dapat diproduksi oleh energi surya, namun dapat dimanfaatkan pula sebagai fungsi pemanas air. Dengan berbagai panjang gelombang, mulai dari ultraviolet, cahaya tampak, sampai infrared dari spektrum elektromagnetik, radiasi matahari dapat dikonversi menjadi energi listrik. Sebagai bentuk komitmen untuk mendorong percepatan implementasi PLTS, PT. PLN (Persero) menargetkan bauran energi dari PLTS ke dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) sebesar 3.200 MW pada tahun 2025-2028 dengan kontribusi konsumen dalam instalasi panel surya. Jika menilik potensi energi surya yang dapat berkontribusi hingga 207,8 GWp, realisasi pemanfaatan di angka 0,092 GWp terbilang sangat minim. Hal ini

menandakan bahwa Indonesia mengalami ketertinggalan dari negara tetangga di Asia tenggara terkait implementasi PLTS (Handayani & Ariyanti, 2012).

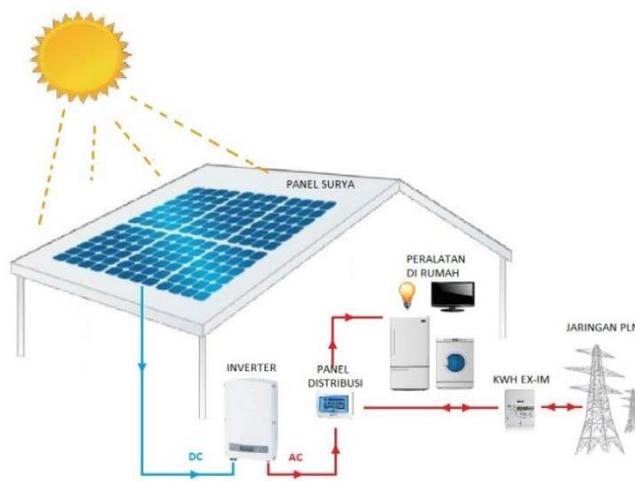
Produksi energi listrik dengan sistem PLTS diproyeksikan akan menjadi yang terbesar di Indonesia hingga mencapai 421,3 TWh (Tera Watt Hour) dari sekian jenis sumber energi baru terbarukan atau sekitar 68 %. Tingginya produksi listrik tersebut disinyalir karena implementasi PLTS atap / rooftop yang memiliki 25% porsi dari jumlah rumah mewah serta adanya perkembangan industri baterai di beberapa daerah sebagai penunjang sistem penyimpanan energi listrik PLTS (off grid) (Suharyati, dkk., 2019).

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan suatu sistem pembangkitan yang mengkonversi energi kalor dari radiasi matahari / surya menjadi energi listrik. PLTS terdiri dari beberapa komponen utama yaitu panel surya, inverter, dan unit kontrol. Secara desain dan sistem integrasi, PLTS dikonfigurasi menjadi dua jenis, yaitu PLTS jenis Off-Grid dan PLTS jenis On-Grid. Pada PLTS jenis Off-Grid, energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya akan disimpan pada baterai yang terhubung dengan charger controller dan inverter. Sedangkan pada PLTS jenis On-Grid, panel surya akan dihubungkan langsung dengan inverter dan jaringan PLN (Putra, 2020).

2.2.1 PLTS On Grid

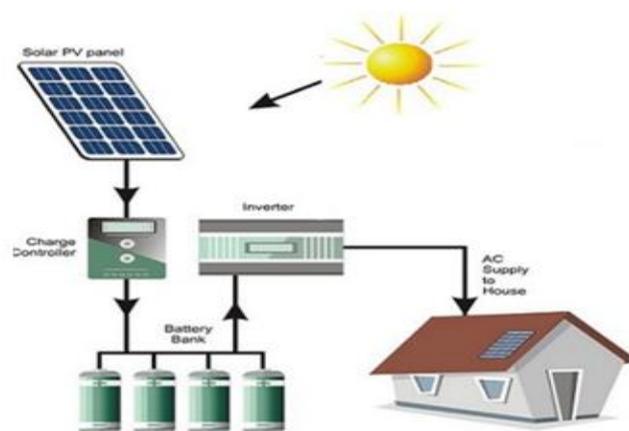
PLTS jenis On-Grid didesain secara langsung terkoneksi dengan sistem grid dari PLN. PLTS jenis ini tidak menggunakan baterai sebagai sarana penyimpanan energi listrik. Agar sistem listrik PLTS tidak mengintervensi kestabilan sistem grid PLN, maka biasanya memiliki kapasitas yang relatif kecil. Ketika jaringan listrik kehilangan tegangan, maka sistem PLTS ini memiliki kemampuan untuk dapat memutuskan kontak terhadap sistem grid. Sistem ini biasa digunakan pada perkantoran, mall, rumah sakit, serta fasilitas umum lainnya (Mohite & Butale, 2019).



Gambar 2.2 Ilustrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Jenis On-Grid
(Sumber: Sunergi, 2022)

2.2.2 PLTS Off - Grid

PLTS Off-Grid adalah suatu sistem pembangkit listrik yang hanya bersumber dari energi matahari saja. Sistem ini tidak terkoneksi terhadap jaringan grid PLN. Pada sistem ini energi listrik yang dihasilkan akan disalurkan menuju beban dan baterai. Baterai difungsikan untuk menyimpan energi listrik pada saat tidak ada konsumsi beban atau konsumsi beban sedikit (Mohite & Butale, 2019).



Gambar 2.3 Ilustrasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya Jenis Off-Grid
(Sumber: learnsolarblog, 2017)

2.3 Kebijakan Implementasi PLTS

PLTS Rooftop atau PLTS Atap adalah suatu pembangkit listrik yang memanfaatkan kinerja modul PV yang ditempatkan pada atap gedung bangunan. Implementasi PLTS Atap dapat memberikan manfaat yaitu penghematan konsumsi energi listrik pelanggan PLN serta meningkatkan kontribusi energi listrik yang bersih dan ramah lingkungan (Bayu & Windarta, 2021). Pemanfaatan energi matahari sebagai salah satu energi terbarukan bersandar pada *Paris Agreement* sebagai instrument hukum internasional yang telah diadopsi oleh Indonesia. Hal ini guna mendukung pengurangan jumlah emisi karbon melalui program transisi energi agar tercapai penurunan tingkat pemanasan global (Agung & Maharta Yasa, 2021)

Peraturan Pemerintah Republik Indonesia No. 79 tahun 2014 (pasal 9f ayat 1) tentang Kebijakan Energi Nasional, menyebutkan bahwa Pemerintah menargetkan penggunaan Energi Baru Terbarukan paling sedikit 23% pada tahun 2025 dan setidaknya 31% sepanjang keekonomiannya terpenuhi (Setyono, dkk., 2019). Undang-undang Nomor 30 tahun 2009 tentang Ketenagalistrikan menetapkan bahwa sumber energi primer harus dimanfaatkan secara optimal. Sejalan dengan ketentuan tersebut, inisiatif strategis dalam upaya meningkatkan peran Energi Baru Terbarukan ke dalam bauran energi sebagai pasokan pembangkit listrik salah satunya dengan pengembangan PLTS untuk Pemakaian Sendiri pada Pembangkit Listrik eksisting milik PLN (RUPTL PLN, 2021).

2.4 Komponen Utama PLTS (Sistem *On-Grid*)

PT. Komipo – PJB telah mengimplementasikan Pembangkit Listrik Tenaga Surya sistem On - Grid dengan kapasitas terpasang sebesar 32 kWp. Adapun beberapa komponen utama dari sistem PLTS tersebut yaitu sebagai berikut :

2.4.1 Panel Surya

Panel surya merupakan suatu peralatan yang berisikan sel surya yang berfungsi mengkonversikan energi kalor dari radiasi matahari menjadi energi

listrik. Efek fotovoltaiik yang terjadi ketika penyerapan radiasi matahari membangkitkan arus yang mengalir di antara dua lapisan bermuatan yang berlawanan. Tegangan listrik yang diproduksi oleh sel surya sangat kecil, berkisar 0,6 VDC pada kondisi tanpa beban atau 0,45 VDC pada kondisi berbeban. Dengan merangkai sel surya secara seri akan menghasilkan nilai tegangan yang lebih besar. Jika 36 keping sel surya dirangkai seri, maka akan menghasilkan tegangan mencapai 16V, sehingga cukup untuk mensuplai baterai berkapasitas 12V (pada sistem *Off-Grid*) (Purwoto, dkk., 2018). Dengan merangkai lebih banyak sel surya secara seri, maka akan menghasilkan tegangan yang lebih besar pula (Roza & Mujirudin, 2019).

Penyusunan beberapa panel surya akan membentuk array dan dapat menaikkan nilai tegangan dan arus array. Nilai tegangan akan naik jika panel surya disusun secara seri, sedangkan nilai arus akan naik jika disusun secara paralel (Prayogi, dkk., 2018). Panel surya memiliki beberapa jenis yang sering digunakan di berbagai sektor, antara lain sebagai berikut :

1. Monokristal (Mono-Crystalline)

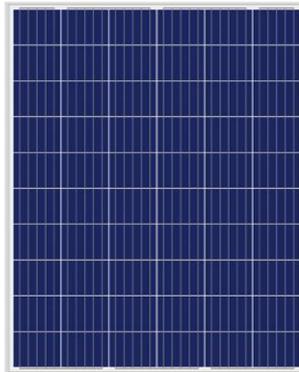
Panel surya jenis ini memiliki tingkat efisiensi paling tinggi jika dibandingkan dengan jenis lain. Monokristal dapat diaplikasikan pada lokasi dengan cuaca ekstrim dan memiliki kondisi alam yang keras. Memiliki nilai efisiensi antara 15-20 %. Namun memiliki kelemahan yaitu tidak dapat optimal jika diimplementasikan di tempat yang memiliki intensitas sinar matahari yang kecil (Prayogi, dkk., 2018).



Gambar 2.4 Panel Surya Monokristal
(Sumber: Aslansolar, 2022)

2. Polikristal (Poly-Crystalline)

Panel surya jenis ini dirancang dengan susunan kristal secara acak karena dipabrikasi dengan proses pengecoran. Panel surya jenis ini biasanya memiliki luas permukaan yang lebih besar dari jenis lainnya, namun memiliki nilai efisiensi yang lebih rendah. Harga panel surya jenis ini relatif murah (Prayogi, dkk., 2018).



Gambar 2.5 Panel Surya Polikristal
(Sumber: Aslansolar, 2022)

3. Thin Film Photovoltaic

Tersusun dari dua struktur lapisan tipis mikrokrystal - silicon dan amorphous yang dapat memiliki nilai efisiensi mencapai 8.5%. Sehingga dapat menghasilkan nilai daya yang lebih besar daripada jenis monokristal & polykristal dengan luas permukaan yang sama. Menurut temuan terbaru, Thin Film Photovoltaic dengan tiga lapisan memiliki nilai efisiensi sangat baik sehingga mampu memproduksi energi listrik 45% lebih tinggi dibanding jenis lain (Purwoto, dkk., 2018).



Gambar 2.6 Thin film photovoltaic
(Sumber: Solar Power World, 2018)

2.4.2 Inverter

Secara sederhana, inverter berfungsi mengubah tegangan DC menjadi AC. Pada sistem PLTS, energi listrik yang dihasilkan oleh solar panel dalam wujud tegangan DC akan diubah menjadi tegangan AC untuk kemudian disalurkan menuju beban (Fatahillah, 2022). Terdapat beberapa jenis inverter yang umum digunakan pada sistem PLTS, antara lain:

1. String Inverter

Inverter jenis ini terpasang pada setiap array. Sehingga apabila terjadi suatu kegagalan dalam salah satu sistem array, maka tidak akan menginterupsi ke sistem array yang lain. String inverter juga menjaga tegangan dan arus tetap stabil dan seimbang dalam proses konversi daya listrik.



Gambar 2.7 String Inverter
(Sumber: DS New Energy, 2022)

2. Central Inverter

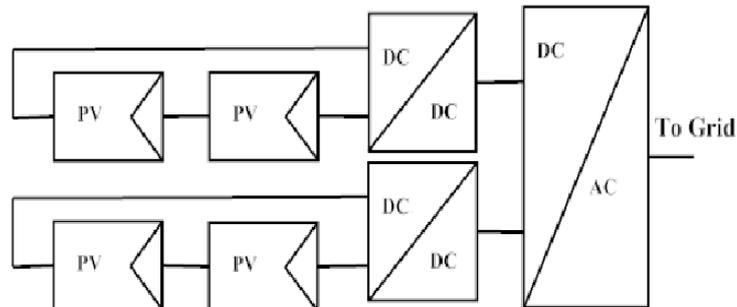
Central inverter memiliki dimensi yang umumnya lebih besar dari string inveter. Terdapat cukup banyak kabel dari sambungan berbagai array dan dapat mengkonversi daya listrik dengan kapasitas yang lebih besar. Inverter jenis ini biasanya menjadi pilihan pengguna system PLTS karena dinilai dapat menghemat biaya investasi dan juga memudahkan pemeliharaan jika dibandingkan dengan tipe string inverter yang terpasang pada masing masing system array.



Gambar 2.8 Tampilan Central Inverter
(Sumber: Solar Power World, 2014)

3. Multi - String Inverter

Multi – String Inverter merupakan gabungan antara string inverter dengan central inverter. Inverter jenis ini memiliki keunggulan yaitu antar string memiliki input yang terpisah sehingga apabila terjadi kerusakan modul atau kegagalan sistem pada suatu string, maka tidak akan mempengaruhi string yang lain. Sehingga kerugian daya dapat dihindari.



Gambar 2.9 Topologi Multi – String Inverter
(Sumber: IEEE, 2012)

2.4.3 Human Monitor Interface

HMI (*Human Monitor Interface*) merupakan sistem penghubung antara manusia dengan suatu proses. HMI dapat menampilkan kondisi serta sebagai media pengendali suatu proses secara aktual dan *real time*. Sistem HMI

bekerja secara online dengan memberikan gambaran kondisi proses, trend grafik, serta opsi pengendalian dari jarak jauh sehingga memudahkan kerja operator (Haryanto & Hidayat, 2012).

(Galitz, 2007) mengemukakan bahwa beberapa hal yang perlu diperhatikan pada desain HMI adalah sebagai berikut:

1. Pengaturan lay out dan pages, layar HMI harus dapat menampilkan informasi yang benar dengan kecepatan yang komprehensif.
2. Pemilihan icon pada layar HMI harus sesuai, jelas, dan dapat dengan mudah dipahami.
3. Pemilihan warna harus sesuai dan komunikatif, sehingga informasi dapat disampaikan dengan mudah.



Gambar 2.10 Tampilan Human Monitor Interface

2.4.4 KWH Meter Ekspor Impor

KWH Ekspor Impor digunakan untuk menghitung pemakaian energi listrik pada pengguna PLTS sistem On-Grid. KWH Exim berfungsi mencatat besaran produksi listrik (ekspor) dan konsumsi energi listrik (impor) menggunakan skema net metering. Mekanisme penagihan listrik dari sistem

net metering memungkinkan pengguna PLTS untuk dapat menghasilkan sebagian atau bahkan seluruh kebutuhan energi listrik. Ketika terjadi kelebihan produksi energi listrik, maka akan di ekspor ke jaringan PLN dan tercatat pada kWh meter ekspor impor sehingga akan mendapatkan kompensasi biaya tarif listrik. Namun Ketika produksi energi listrik kurang dari nilai kebutuhan, maka jaringan PLN akan menyuplai kekurangan energi listrik (Perdana, dkk., 2018).



Gambar 2.11 Tampilan kWh Ekspor Impor
(Sumber: EDM1, 2020)

2.5 Perhitungan Teknis PLTS

Berkaitan dengan beberapa parameter pada sistem PLTS, perhitungan dapat dijabarkan melalui beberapa persamaan sebagai berikut :

2.5.1 Perhitungan PV Array

Untuk menghitung luasan PV area dapat dihitng dengan metode persamaan sebagai berikut:

$$PV \text{ Area} = \frac{E_L}{G_{AV} \times TCF \times \eta \text{ PV} \times \eta \text{ out}} \quad (2.1)$$

Dalam hal ini :

E_L = Energi yang dibangkitkan [kWh/hari]

PV Area = Luas permukaan panel surya [m²]

TCF = *Temperature coefficient factor* [%]

G_{AV} = Intensitas Matahari harian [$\text{kW}/\text{m}^2/\text{hari}$]

η_{PV} = Efisiensi panel surya [%]

η_{out} = Efisiensi keluaran [%] asumsi 0,9

Setiap kenaikan temperatur 1 (dari temperatur standarnya) pada panel surya, maka hal tersebut akan mengakibatkan daya yang dihasilkan oleh panel surya akan berkurang sekitar 0,5% (Colli, 2015). Efisiensi sel surya adalah perbandingan antara daya listrik yang diproduksi (dikirim ke beban) dengan daya cahaya yang mengenai permukaan sel. Daya cahaya yang mengenai sel biasanya ditentukan sebagai daya cahaya matahari pada permukaan bumi yang besarnya $1000\text{W}/\text{m}^2$.

2.5.2 Perhitungan Daya PLTS

Setelah mendapatkan hasil perhitungan area array, nilai daya listrik yang dihasilkan oleh PLTS (watt peak) dapat dihitung menggunakan formula sebagai berikut (Eriyanto, 2017):

$$PV \text{ watt peak} = PV \text{ Area} \times PSI \times \eta_{PV} \quad (2.2)$$

Dimana:

PV Area = Luas Permukaan panel surya (m^2)

PSI = Peak Solar Insolation, yaitu sebesar $1.000 \text{ W}/\text{m}^2$

η_{PV} = Efisiensi panel surya [%]

2.5.3 Perhitungan Jumlah Panel Surya

Dari hasil perhitungan daya dibangkitkan oleh PLTS (watt peak), maka jumlah banyaknya panel surya yang dibutuhkan dapat dihitung dengan rumus berikut (Eriyanto, 2017):

$$\text{Jumlah Panel Surya} = \frac{P_{\text{watt peak}}}{P_{MPP}} \quad (2.3)$$

Dimana:

$P_{\text{watt peak}}$ = Daya yang dibangkitkan (Wp)

P_{MPP} = Daya maksimum keluaran panel surya (Wp)

2.5.4 Perhitungan Kapasitas Modul PLTS

Dalam menentukan kapasitas modul Panel surya berdasar pada kebutuhan energi aktual beserta penambahan kompensasi akibat adanya rugi – rugi pada rangkaian PLTS. Umumnya nilai faktor pengali akibat adanya kompensasi rugi – rugi adalah sebesar 130% (Firmansyah & Windarta, 2021). Sehingga perhitungan kapasitas modul panel surya dapat dihitung menggunakan formula berikut:

$$\text{Kapasitas Modul} = \frac{\text{Total energi beban}}{\text{Minimum rata rata iradiasi}} \times \text{faktor kali} \quad (2.4)$$

2.5.5 Perhitungan Daya Input

Dengan menghitung daya input maka dapat diketahui besaran nilai daya yang diterima oleh panel surya sehingga dapat dihitung efisiensinya (Imam, dkk., 2021). Berikut rumus perhitungan daya input:

$$P_{in} = E \times A \quad (2.5)$$

Dimana:

E = Nilai Iradiasi (W/m^2)

A = Luas permukaan string panel surya (m^2)

2.5.6 Perhitungan Fill Factor

Nilai perbandingan antara daya maksimal terhadap nilai arus short circuit dan tegangan open circuit disebut *fill factor* (FF). Daya aktual adalah pada saat kondisi tegangan dan arus maksimal (V_{mp} dan I_{mp}) (Eriyanto, 2017). Data – data tersebut biasanya telah tertera pada nameplate / buku manual dari pihak manufaktur panel surya. Semakin tinggi nilai FF pada sel surya maka kinerja dapat dikatakan semakin maksimal dengan nilai efisiensi konversi energi yang semakin baik pula.

$$FF = \frac{(V_{MP} \times I_{MP})}{(V_{OC} \times I_{SC})} \quad (2.6)$$

Dimana:

V_{MP} = Tegangan Maksimal (V)

I_{MP} = Arus Maksimal (A)

V_{OC} = Tegangan Open Circuit (V)

I_{OC} = Arus Short Circuit (A)

2.5.7 Perhitungan Efisiensi PLTS

Setelah mendapatkan nilai daya input dan nilai daya output panel surya, maka dapat diperhitungkan nilai efisiensi dari PLTS tersebut (Eriyanto, 2017). Perhitungan nilai efisiensi adalah sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{OUT}}{P_{IN}} \times 100 \% \quad (2.7)$$

Dimana:

η = Nilai Efisiensi (%)

P_{out} = Daya Listrik Panel Surya (Watt)

P_{in} = Daya Input Panel Surya dengan mempertimbangkan iradiasi (Watt)

2.5.8 Perhitungan Performance Ratio

Performa atau kinerja PLTS dapat dihitung dan dianalisa berdasarkan dari nilai Performance Ratio (Syahindra, dkk., 2021). PR dihitung dengan membagi nilai aktual produksi listrik dengan hasil perhitungan energi output. Nilai PR dikatakan baik apabila mendekati nilai 1 (Sharma & Chandel, 2013). Pandangan lain menyatakan bahwa nilai Performance Ratio di atas 70% terbilang cukup baik (Martha, dkk., 2022). Nilai Performance Ratio dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut:

$$PR = \frac{\text{Energi aktual output PLTS}}{GHI \times A \times \eta} \quad (2.8)$$

Dimana:

GHI = Global Horizontal Irradiance (kWh/m²)

A = Luas permukaan string panel (m²)

η = efisiensi panel surya dari data sheet (%)

Dalam melakukan analisa performa sistem PLTS dapat dilakukan dengan menghitung beberapa hal yaitu Hasil Akhir / Final Yield (YF), Hasil Acuan /

Reference Yield (YR), dan Performance Ratio (PR) merujuk pada standar IEC 61724 (Ariawan, 2022).

$$YF = \frac{E_{pv}}{P_o} \quad (2.9)$$

Dimana:

YF = Produksi energi listrik PLTS per daya terpasang

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

P_o = Daya PLTS terpasang (kWp)

$$YR = \frac{H_t}{G_{stc}} \quad (2.10)$$

Dimana:

YR = Potensi energi yang dapat dihasilkan PLTS saat kondisi ideal

H_t = Radiasi pada array / permukaan panel surya (kWh/m²)

G_{stc} = Referensi nilai radiasi kondisi ideal (1.000 W/m²)

Sehingga dari kedua nilai YF dan YR di atas, didapatkan nilai Performance Ratio (PR) sebesar:

$$PR = \frac{YF}{YR} \times 100\% \quad (2.11)$$

2.6 Potensi Losses pada PLTS

Energi surya yang ditangkap oleh panel surya tidak sepenuhnya terkonversi menjadi energi listrik dan terkirim penuh menuju beban / grid. Hal ini dikarenakan adanya factor losses / pengurangan pada sistem PLTS yang mana dapat menurunkan nilai efisiensi. Berikut beberapa factor yang perlu diperhatikan terkait potensi losses pada sistem PLTS :

2.6.1 Kotoran (Soilage)

Kotoran pada permukaan panel surya dapat menurunkan efisiensi sistem PLTS. Kotoran menempel tersebut dapat menghalangi cahaya matahari yang menuju ke sel – sel pada panel surya sehingga mengakibatkan output produksi menjadi turun. Kotoran mengakibatkan sistem tidak bekerja

secara optimal (Rawat & Hod, 2017). Dengan demikian diperlukan kegiatan pemeliharaan rutin, khususnya pembersihan terhadap permukaan panel surya.

2.6.2 Bayangan (Shading)

Pada proses penangkapan energi matahari oleh panel surya, adanya bayangan yang menutupi permukaan panel surya dapat mempengaruhi kinerjanya. Efek bayangan mengakibatkan berkurangnya radiasi matahari sehingga mengganggu proses transfer energi ke permukaan panel surya dan menurunkan hasil produksi (Colli, 2015). Efek bayangan dapat menginterupsi sistem PLTS apabila:

1. Array terhalang oleh bayangan, sehingga nilai tegangan yang masuk menuju inverter akan menurun dan mempengaruhi kinerja inverter.
2. Penggunaan string inverter untuk memfasilitasi beberapa string panel surya, hal ini dikarenakan efek bayangan pada satu string dapat mempengaruhi output string lainnya.

Dalam kedua situasi tersebut di atas, akan sulit memperkirakan output array dikarenakan perbedaan efek pada masing-masing inverter. Maka dalam pemasangan array sebaiknya memilih lokasi yang tidak tertutup bayangan (gedung / pohon / lainnya).

2.6.3 Temperatur Panel Surya

Temperatur pada lokasi PLTS, khususnya pada permukaan panel surya dapat mempengaruhi efisiensi dan kinerja sistem pembangkitan. Pada saat temperatur permukaan sel surya naik, nilai tegangan yang mengalir pada setiap sel akan berkurang sehingga menurunkan pula nilai daya. Efek penurunan ini tergantung pada karakteristik panel surya terpasang. Daya yang diproduksi oleh panel surya akan turun hingga 0,5% setiap kenaikan suhu 1°C pada permukaan panel surya, dihitung dari nilai standarnya (Colli, 2015).

2.6.4 Toleransi Manufaktur

Karakteristik dari panel surya selalu mengacu pada spesifikasi dari manufaktur. Spesifikasi tersebut biasanya tercatat pada data sheet produk. Spesifikasi mencatat beberapa parameter karakteristik yang menyimpulkan potensi kinerja dari panel surya tersebut, seperti nilai toleransi, nilai tegangan dan arus maksimal, nilai daya output dan lain sebagainya (Colli, 2015).

2.6.5 Efisiensi Inverter

Efisiensi inverter tercatat pada lembaran *data sheet* dari manufaktur. Parameter tegangan dan arus input yang dialirkan dari masing – masing array sangat mempengaruhi efisiensi inverter. Untuk menghindari penurunan efisiensi inverter perlu dilakukan monitoring terhadap output array, karena nilai output array yang berlebihan akan menurunkan nilai efisiensi inverter. Pada instalasi inverter juga perlu memperhatikan ventilasi untuk mengatur alur keluar masuk udara sehingga dapat memaksimalkan performa kerja inverter (Colli, 2015).

2.6.6 Lifetime

Usia dari panel surya sangat berpengaruh pada efisiensi kerja PLTS. Panel Surya dengan kapasitas 400watt peak akan mengalami penurunan output daya sekitar 5% di tahun ke 5, 10% di tahun ke 10, dan mencapai 20 % di tahun ke 25 pasca operasional (Everexceed, 2020).

2.7 Software Simulasi PVSyst

PVSyst adalah suatu perangkat lunak dirancang untuk media edukasi PLTS, lengkap dengan perencanaan hingga analisis data (Satrio, dkk., 2022). Universitas Genewa berhasil mengembangkan PVSyst dengan beberapa opsional sistem, antara lain sistem jaringan (*grid-connected*), sistem berdiri sendiri (*stand-alone*), sistem pompa (*pumping*), dan jaringan arus searah untuk transportasi publik (DC-grid). Pada database PVSyst, terdapat banyak sumber data meteorologi, lengkap dengan bermacam jenis komponen PLTS.

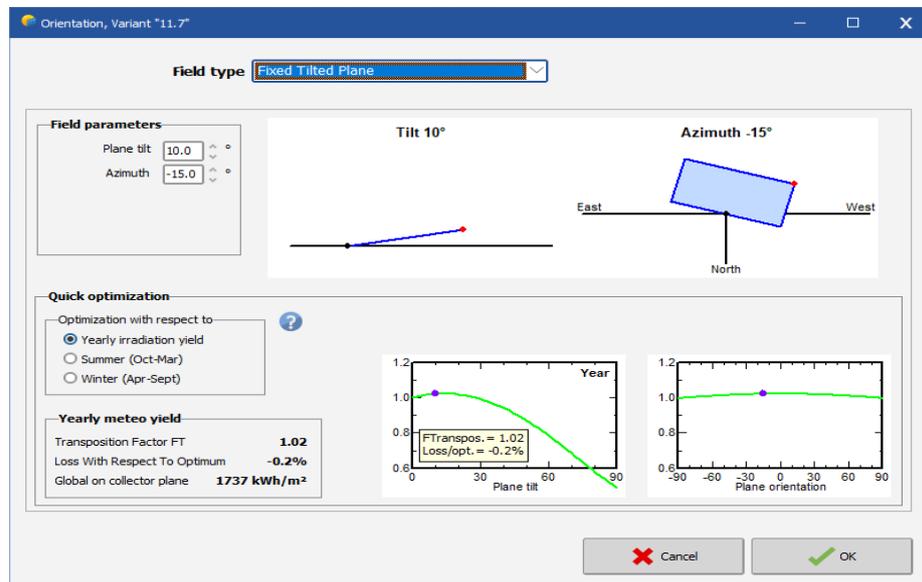
PVSyst memiliki fitur desain proyek yang dapat berfungsi untuk mensimulasi dan menganalisa hasil produksi serta performa dari PLTS, yaitu dengan membuat terlebih dahulu perancangan atau desain proyek kemudian menjalankan fitur simulasi. Berikut tahapan dalam merencanakan dan mendesain PLTS pada perangkat lunak PVSyst:

1. Penetapan proyek

Setelah menentukan jenis PLTS yang diantaranya *Grid Connected*, *Stand Alone*, *Pumping*, dan *DC Grid*, kemudian lanjut ke tahap desain proyek baru serta mengisi beberapa informasi seperti nama proyek, lokasi dan data meteorologi.

2. Penetapan konfigurasi sistem

Setelah menentukan orientasi dari panel surya seperti jenis konstruksi rangka, sudut kemiringan, dan azimuth, dilanjutkan pemilihan spesifikasi, jumlah panel surya dan inverter serta konfigurasi instalasi. Kemudian dilanjutkan running simulasi.



Gambar 2.12 Tampilan Software Simulasi PVSyst 7.2

2.8 Perhitungan Ekonomi

2.8.1 Alur Kas / *Cash Flow*

Alur kas atau disebut juga *cash flow* merupakan aliran pemasukan dan pengeluaran dana pada periode waktu tertentu. *Cash Flow* meliputi:

1. Cash in (Pemasukan), yaitu berasal dari keuntungan penjualan produk atau keuntungan yang didapat dari manfaat produk.
2. Cash Out (Pengeluaran), yaitu nilai total biaya / cost yang dikeluarkan dalam proses operasional.

Menurut sudut pandang ekonomi adalah *cash flow* investasi umumnya akan dihitung pada saat perencanaan suatu investasi. Jadi diperlukan perhitungan perkiraan atau estimasi yang sekiranya akan terjadi jika investasi dijalankan (Giatman, 2022).

2.8.2 *Net Present Value* (NPV)

Net Present Value adalah suatu teknik perhitungan yang mengasumsikan nilai bersih pada waktu sekarang. Sehingga diasumsikan waktu sekarang merupakan waktu awal perhitungan yang mana bertepatan dengan waktu dilakukannya evaluasi, atau pada periode tahun ke nol (0) dalam perhitungan cash flow suatu investasi (Avinda & Darjat, 2022). *Present Worth of Benefit* (PWB) adalah cash flow yang memperhitungkan sisi pemasukan saja. Sedangkan perhitungan arus pengeluaran disebut sebagai *Present Worth of Cost* (PWC). Sementara itu nilai dari NPV sendiri diperoleh dari selisih antara PWB dengan PWC. Berikut rumus untuk menghitung NPV, PWB, dan PWC:

$$PWB = \sum_{t=0}^n Cb_t(FBP)_t \quad (2.12)$$

$$PWC = \sum_{t=0}^n Cc_t(FBP)_t \quad (2.13)$$

$$NPV = PWB - PWC \quad (2.14)$$

Dimana:

PWB = Present Worth Benefit

PWC = Present Worth Cost

Cb = Cash flow benefit

Cc = Cash flow cost

FBP = Faktor Bunga Present

T = periode waktu

n = Usia investasi

Metode NPV memiliki dua kriteria untuk menentukan kelayakan ekonomi suatu investasi, yaitu:

1. $NPV > 0$, maka investasi dapat dikatakan layak / *feasible*.
2. $NPV < 0$, maka investasi dapat dikatakan tidak layak / *unfeasible*.

2.8.3 *Benefit Cost Ratio* (BCR)

Perhitungan *Benefit Cost Ratio* (BCR) termasuk salah satu cara yang sering digunakan dalam mengevaluasi perencanaan investasi suatu proyek pekerjaan. BCR juga menjadi metode analisa tambahan untuk memvalidasi hasil metode perhitungan kelayakan ekonomi lainnya (Avinda & Darjat, 2022). Metode perhitungan nilai BCR menggunakan persamaan berikut:

$$BCR = \frac{PWB}{PWC} \quad (2.15)$$

2.8.4 *Payback Period* (PBP)

Analisis *payback period* merupakan metode untuk mencari jangka waktu pengembalian modal investasi dengan memperhitungkan discount faktor dari arus kas bersih kumulatif yang ditaksir akan sama dengan investasi awal (J.PH., 2022). Untuk menentukan *payback period* terdapat beberapa kondisi yaitu:

1. *Payback period* yang memiliki jangka waktu pendek daripada perkiraan umur proyek, maka dapat dikatakan layak / *feasible*.
2. *Payback period* yang memiliki jangka waktu yang lebih panjang dari perkiraan usia proyek, maka dapat dikatakan tidak layak.

Pay back period dapat dihitung dengan menggunakan persamaan rumus berikut sebagai berikut (Giatman, 2022):

$$PBP = n + \frac{\text{Arus kas kumulatif tahun } (n-1)}{\text{Arus kas bersih tahun } n} \quad (2.16)$$