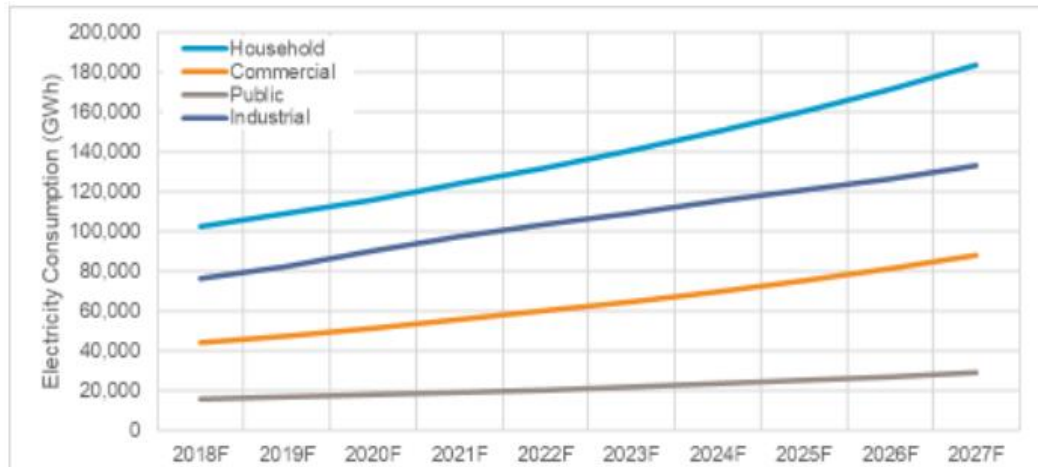


BAB II LANDASAN TEORI

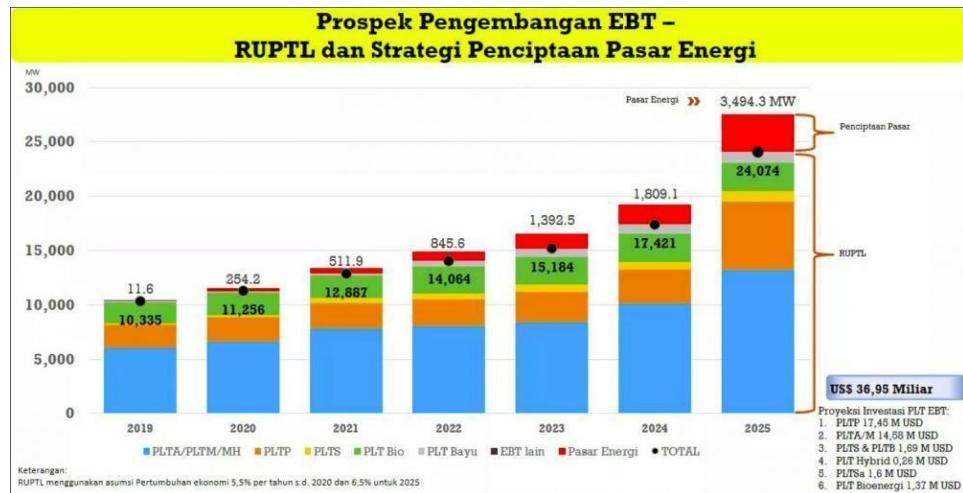
2.1 Energi Listrik

Energi listrik adalah salah satu kebutuhan penting bagi masyarakat dan merupakan sumber daya ekonomi utama yang dibutuhkan dalam berbagai aktivitas. Kebutuhan listrik akan meningkat secara signifikan dan perkembangan baik dari jumlah penduduk, jumlah investasi, perkembangan teknologi, termasuk didalam perkembangan pendidikan untuk semua jenjang (Wahid et al., 2014). Penggunaan listrik di Indonesia, menurut data RUPTL 2018 – 2027 PT PLN (Persero), menyebutkan sektor rumah tangga merupakan penggunaan utama listrik nasional dan proyeksikan menjadi dua kali lipat selama satu dekade ke depan. Seperti terlihat pada Gambar 2.1 (Humas EBTKE, 2021).



Gambar 2. 1 Proyeksi Penggunaan Listrik Indonesia (Humas EBTKE, 2021)

Penggunaan listrik Indonesia terus meningkat secara signifikan pada tahun 2025 kenaikan mencapai 6.653 MW dari tahun 2024 dengan hal itu pemerintah melalui kementerian ESDM merencanakan rencana usaha penyediaan tenaga listrik (RUPTL) 2019 – 2025 seperti pada Gambar 2.2 (RUPTL, Humas EBTKE, 2019)



Gambar 2. 2 Prospek Pengembangan EBT (RUPTL & Humas EBTKE, 2019)

Energi kinetik akan semakin besar seiring dengan meningkatnya intensitas cahaya dan radiasi matahari. Rata – rata nilai dari radiasi surya atmosfer bumi adalah 1.353 W/m^2 , yang dikenal sebagai konstanta surya. Intensitas radiasi surya dipengaruhi oleh siklus perputaran bumi, kondisi cuaca seperti kualitas dan jumlah awan, perubahan musim, serta posisi garis lintang. Di Indonesia, intensitas radiasi sinar matahari berlangsung sekitar 4 hingga 5 jam setiap hari..

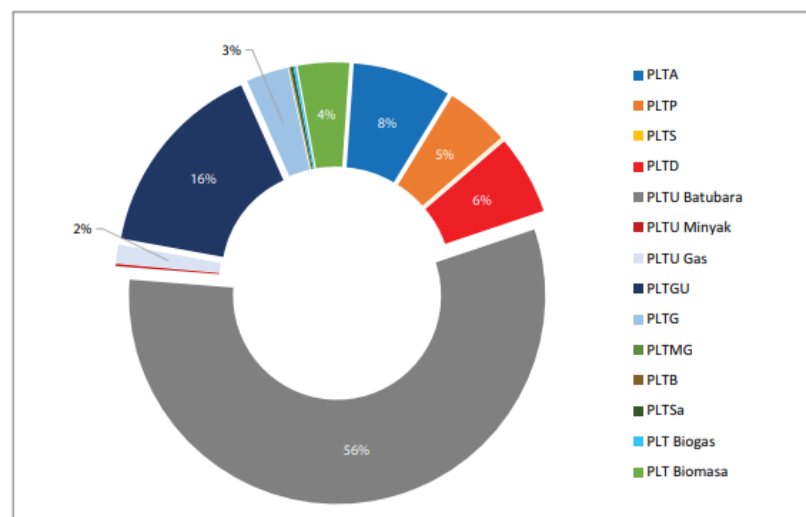
2.2 Potensi Energi Baru Terbarukan Indonesia

Penurunan produksi energi fosil, terutama minyak bumi, serta komitmen global untuk mengurangi emisi gas rumah kaca, mendorong pemerintah untuk terus meningkatkan penggunaan energi baru dan terbarukan sebagai bagian dari upaya menjaga ketahanan dan kemandirian energi. Berdasarkan PP No.79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, target bauran energi baru dan terbarukan pada tahun 2025 minimal mencapai 23%, dan 31% pada tahun 2050. Indonesia mempunyai potensi energi baru terbarukan yang cukup besar untuk mencapai target bauran energi primer tersebut (Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019).

Jenis Energi	Potensi
Tenaga Air	94,3 GW
Panas Bumi	28,5 GW
Bioenergi	PLT Bio : 32,6 GW dan BBN : 200 Ribu Bph
Surya	207,8 GWp
Angin	60,6 GW
Energi Laut	17,9 GW

Tabel 2. 1 Potensi Energi Terbarukan (Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019)

Sebagian besar energi baru terbarukan (EBT) digunakan untuk pembangkit listrik, sementara sisanya dimanfaatkan untuk sektor transportasi, industri, komersial, dan sektor lainnya, seperti bahan baku campuran biodiesel, sampah, dan bioetanol. Sumber penyediaan EBT berasal dari panas bumi, air, surya, angin, biomassa, sampah, bioetanol, dan biodiesel. Pada tahun 2018, total produksi pembangkit listrik mencapai 283,8 TWh, dengan sebagian besar dihasilkan dari pembangkit listrik berbahan bakar batubara sebesar 56,4%, diikuti oleh pembangkit berbahan bakar gas sebesar 20,2%, dan BBM hanya 6,3%, sementara 17,1% berasal dari EBT dapat dilihat pada Gambar 2.3 (Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019).



Gambar 2. 3 Produksi Listrik per Jenis Energi Tahun 2018 (Tim Sekretaris Jenderal Dewan Energi Nasional, 2019)

2.2.1 Potensi Energi Surya

Sumber energi surya di Indonesia dapat dibagi berdasarkan kawasan barat dan timur. Kawasan barat Indonesia memiliki potensi sebesar 4,5 kWh/m² per hari dengan variasi bulanan sekitar 10%, sementara kawasan timur Indonesia memiliki potensi sebesar 5,1 kWh/m² per hari dengan variasi bulanan 9%. Rata-rata potensi energi surya di Indonesia adalah 4,8 kWh/m² per hari dengan variasi bulanan 9%. Potensi energi surya di Indonesia sangat besar, mencapai sekitar 4,8 kWh/m² atau setara dengan 112.000 GWp, namun yang sudah dimanfaatkan baru sekitar 10 MWp. Pemerintah saat ini telah mengeluarkan *roadmap* pemanfaatan energi surya yang menargetkan kapasitas pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) terpasang sebesar 0,87 GW pada tahun 2025, atau sekitar 50 MWp per tahun. Jumlah ini menggambarkan potensi pasar yang cukup besar untuk pengembangan energi surya di masa depan. Komponen utama sistem pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dengan menggunakan teknologi fotovoltaik adalah sel surya (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2012).



Gambar 2. 4 Peta potensi energi surya (Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2012)

Berdasarkan gambar pada 2.4 potensi energi surya di Indonesia per hari. Warna hijau tua mempunyai potensi energi surya 2,81 – 4,20 kWh/m²/hari, warna hijau muda yaitu 4,21 – 4,60 kWh/m²/hari, warna kuning 4,61 – 4,80 kWh/m²/hari, warna orange 4,81 – 5,00 kWh/m²/hari dan warna merah 5,01 – 5,27 kWh/m²/hari.

2.2.2 Potensi PLTS Terapung

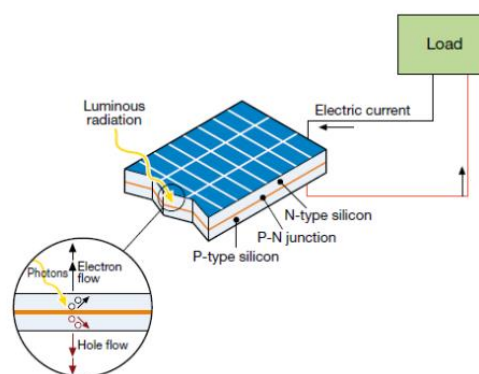
Indonesia yang terletak di garis khatulistiwa memiliki potensi energi matahari yang cukup tinggi, dengan rata-rata potensi mencapai 5 kWh/m² per hari. Sebagai negara agraris dan kepulauan, Indonesia juga memiliki banyak sumber air yang tersebar di hampir seluruh wilayah. Sumber air ini berpotensi dimanfaatkan sebagai lokasi instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) terapung, yang dapat menjadi solusi untuk mengurangi biaya penggunaan lahan dan biaya pembangkitan listrik. Listrik yang dihasilkan oleh PLTS terapung ini kemungkinan akan lebih besar dibandingkan dengan PLTS yang dipasang di atap, karena adanya efek pendinginan dari badan air dengan menggunakan teknologi *floating solar photovoltaic* (Sutanto et al., 2021). Pemerintah Indonesia memperkirakan potensi PLTS terapung dapat mencapai 28.297,6 megawatt (MW). Potensi tersebut berasal dari 211 waduk yang dapat menghasilkan 6.348,1 MW dan 164 danau mencapai 21.849,5 MW (ESDM, 2021).

2.3 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

PLTS adalah suatu pembangkit listrik yang menggunakan sinar matahari melalui modul sel surya (*Photovoltaic*) untuk mengubah radiasi sinar foton matahari menjadi energi listrik arus searah (DC). PLTS memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik DC, yang dapat diubah menjadi listrik AC. Panel sel surya

merupakan suatu sistem yang dapat mengubah energi elektromagnetik dari sinar matahari menjadi energi listrik melalui proses efek fotovoltaiik. Efek fotovoltaiik adalah suatu fenomena dimana munculnya tegangan listrik karena adanya hubungan atau kontak dua elektroda yang dihubungkan dengan sistem padatan atau cairan saat mendapatkan energi cahaya. Konversi ini dapat terjadi pada panel surya yang terdiri dari sel – sel surya , beberapa sel surya dapat disusun dengan rangkaian secara seri. Sistem PLTS umumnya terdiri dari panel surya, *Solar Charger Controller* atau inverter jaringan, baterai, inverter baterai dan beberapa komponen pendukung lainnya.

Prinsip kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) dimulai dengan mekanisme konversi energi cahaya yang terjadi akibat perpindahan elektron bebas di dalam atom. Ketika cahaya matahari mengenai panel surya, elektron valensi pada material sel surya akan bergerak dari area tipe N ke tipe P, menghasilkan aliran energi listrik pada kutub terminal output panel surya. Besarnya energi listrik yang dihasilkan bergantung pada jumlah sel surya yang digabungkan dalam panel dan intensitas radiasi matahari yang mengenai panel tersebut. Penjelasan mekanisme ini dapat dilihat lebih jelas pada Gambar 2.5, yang menunjukkan proses pergerakan *electron* dan aliran listrik menuju beban (*load*).



Gambar 2. 5 Susunan Lapisan Polar

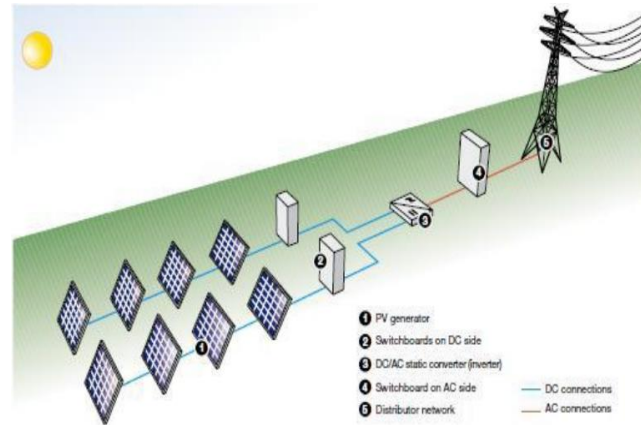
2.4 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Sistem PLTS dapat dibedakan menjadi beberapa jenis berdasarkan aplikasi dan konfigurasi. Namun, secara umum PLTS dapat dibagi menjadi dua yaitu sistem PLTS yang terhubung dengan jaringan dan sistem PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan atau sering disebut dengan PLTS yang berdiri sendiri. PLTS yang berdiri sendiri atau PLTS *stand-alone* ini dapat beroperasi secara mandiri dan juga dapat ditunjang oleh sumber daya lain seperti tenaga angin, generator set, ataupun tenaga air serta tenaga mikro hidro yang disebut sebagai sistem PLTS *hybrid*. Berdasarkan lokasi pemasangannya, sistem PLTS dapat dibagi menjadi dua yaitu sistem PLTS pola tersebar dan sistem PLTS pola terpusat (Baskara F, 2021).

2.4.1 PLTS On-Grid

Sistem PLTS grid-connected (*PV system*) atau yang sering disebut PLTS on-grid pada dasarnya menghubungkan PLTS dengan jaringan listrik (PLN). Komponen utama dalam sistem ini adalah power conditioning unit (PCU) atau inverter, yang berfungsi untuk mengubah daya DC yang dihasilkan oleh PLTS menjadi daya AC yang sesuai dengan persyaratan jaringan listrik yang terhubung. Sistem PLTS on-grid ini dibagi menjadi dua jenis berdasarkan pola operasi penyaluran tenaga listrik, yaitu sistem dengan penyimpanan yang menggunakan baterai sebagai cadangan energi, yang dikenal sebagai grid-connected *PV with battery backup*, dan sistem tanpa penyimpanan energi yang tidak menggunakan baterai, yang disebut grid-connected *PV without battery backup*. Baterai ini berfungsi untuk sebagai penyimpan cadangan listrik atau suplai tenaga listrik jika jaringan mengalami kegagalan maupun sebagai suplai tenaga listrik ke jaringan (PLN) jika PLTS memiliki kelebihan daya (Abdul K, 2018). Penjelasan alur sistem PLTS on-grid

ditunjukkan pada Gambar 2.6, yang memperlihatkan komponen utama seperti PV generator, inverter, hingga jaringan distribusi listrik (PLN).

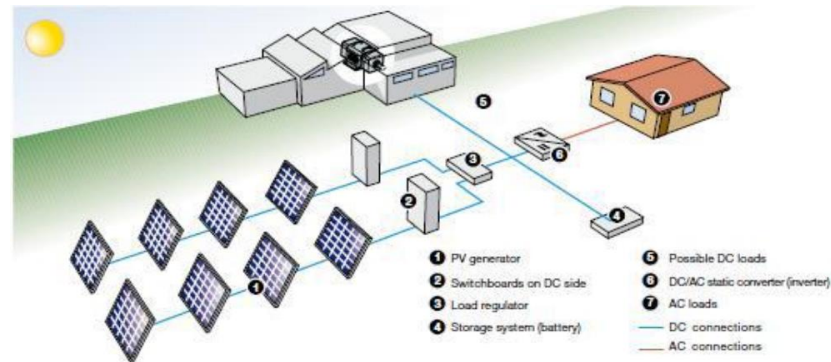


Gambar 2. 6 Prinsip Kerja PLTS *On-Grid* (Abdul K, 2018)

2.4.2 PLTS Off-Grid

Sistem PLTS off-grid dirancang untuk beroperasi secara mandiri agar dapat memasok beban AC maupun DC. Sistem pembangkit listrik ini cocok dibangun di daerah terpencil/pelosok yang jauh atau sulit untuk dijangkau oleh jaringan PLN. Pada sistem PLTS off-grid juga dapat menggunakan baterai untuk penyimpanan energi listrik yang dihasilkan oleh matahari, maka ketersediaan pasokan listrik akan terjamin walau dalam keadaan cuaca kurang mendukung. Sistem PLTS terpusat disebut juga *Stand Alone PV System* yaitu sistem pembangkit yang hanya mengandalkan energi matahari sebagai satu – satunya sumber energi utama dengan menggunakan rangkaian *photovoltaic* module untuk menghasilkan energi listrik sesuai kebutuhan. Secara umum prinsip kerja PLTS terpusat dapat dilihat pada Gambar 2.7 prinsip kerja PLTS terpusat ini yaitu energi listrik yang dihasilkan oleh modul surya pada siang hari akan disimpan pada baterai yang mana proses pengisian tersebut akan diatur oleh solar charge *controller*. Tujuan digunakannya *solar charge controller* ini adalah agar saat pengisian baterai tidak terjadi kelebihan pengisian atau

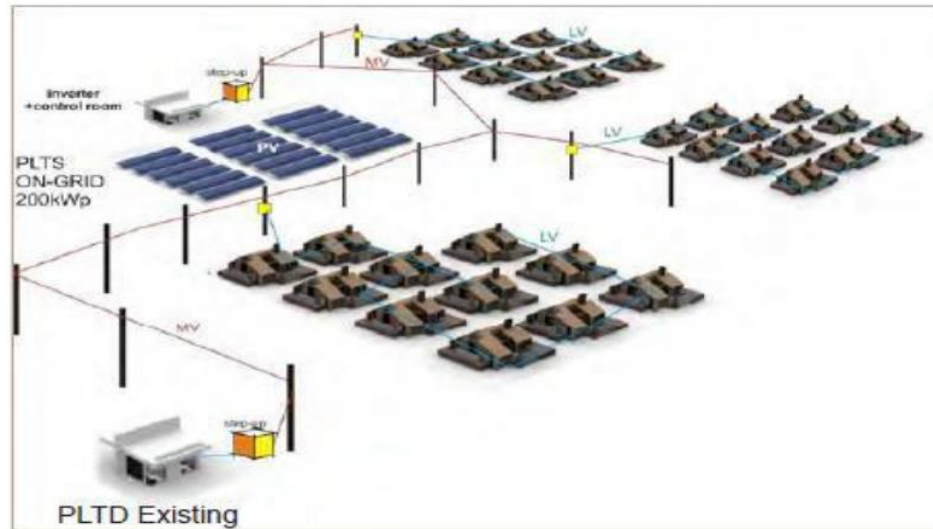
over charge. Besarnya energi yang dapat dihasilkan oleh modul surya dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti intensitas cahaya, Panjang gelombang cahaya yang jatuh pada sel surya dan efisiensi sel (Abdul K, 2018).



Gambar 2. 7 Prinsip Kerja PLTS Off-Grid (Abdul K, 2018)

2.4.3 PLTS Hybrid

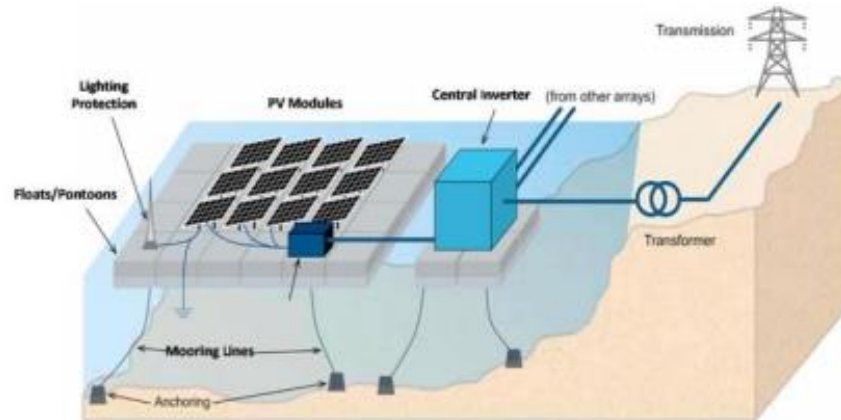
PLTS hybrid merupakan sistem yang melibatkan dua atau lebih sistem pembangkit listrik, umumnya digunakan untuk hybrid adalah genset, PLTS, mikrohidro, dan tenaga angin. PLTS ini bertujuan agar sistem dapat meningkatkan keandalan serta mampu bekerja secara berkelanjutan dalam memasok listrik untuk beban – beban listrik walaupun tidak terhubung dengan jaringan. Contoh dari PLTS hybrid adalah PLTS dengan PLTB, PLTS dengan PLTA, PLTS dengan PLTMH, serta PLTS dengan genset. Di Indonesia sistem hybrid telah banyak digunakan, baik PLTS Genset, PLTS Mikrohidro, maupun PLTS tenaga angin-mikrohidro. Namun yang paling banyak dipakai hybrid ialah PLTS-Genset (Abdul K, 2018). Skema sistem hybrid ini digambarkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Skema *Hybrid Photovoltaic Power System* (Abdul K, 2018)

2.5 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terapung

PLTS terapung merupakan sistem modul surya skala besar yang dipasang terapung pada *platform* di permukaan perairan, baik pada danau, waduk, danau irigasi, area pengelolaan air buangan (*water treatment pond*), ataupun lepas pantai. PLTS terapung menggunakan lahan perairan terbuka. Hal ini akan mengurangi biaya pengadaan lahan yang merupakan permasalahan investasi tertinggi untuk pembangunan PLTS terapung. Selain meminimalkan investasi lahan, PLTS terapung memiliki keuntungan lain yaitu terhindar dari pepohonan, mengurangi pertumbuhan tanaman liar, serta mendapatkan tambahan pendinginan akibat evaporasi air di bawah sel surya (Nandini & Sutanto, 2021). Gambar 2.9 Contoh *layout* PLTS terapung dan komponen-komponen penyusun. Gambar ini menunjukkan susunan komponen utama PLTS terapung, seperti modul surya, platform terapung, kabel penghubung, dan struktur penahan, yang dirancang untuk memanfaatkan potensi energi matahari di area perairan terbuka.



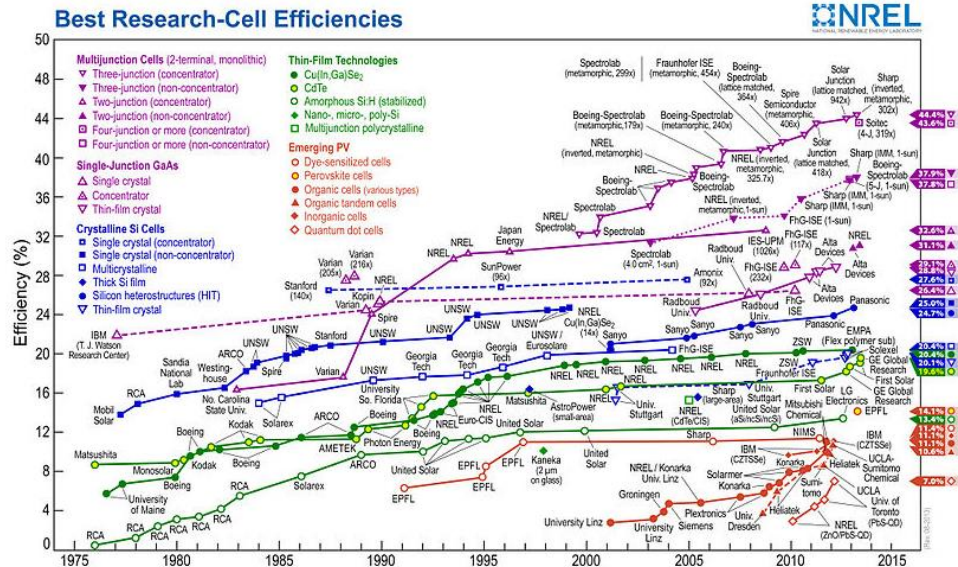
Gambar 2. 9 Contoh *layout* PLTS terapung dan komponen-komponen penyusun (K. ESDM, 2021)

2.6 Komponen – komponen Sistem PLTS terapung

Pemanfaatan tenaga surya sebagai pembangkit listrik, terdiri dari komponen – komponen utama sebagai berikut.

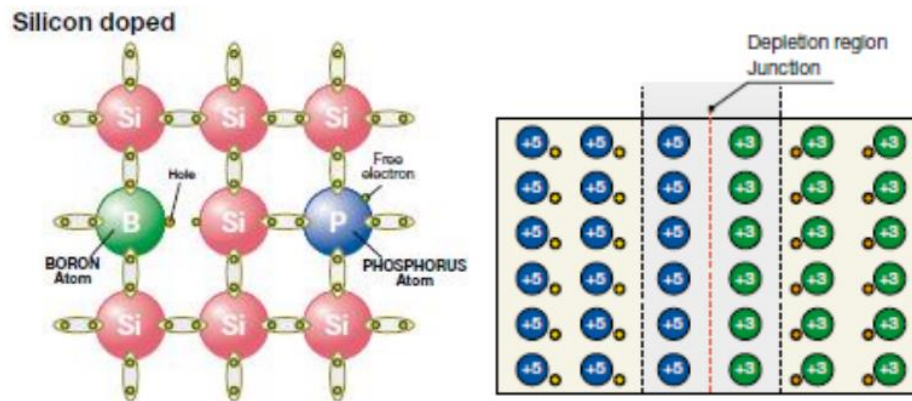
2.6.1 Solar Cell (*Photovoltaic*)

Sistem PV adalah sistem pembangkit listrik yang mengubah foton dari matahari menjadi listrik. Sistem PV adalah salah satu program pemerintah untuk meningkatkan persentase energi terbarukan untuk ketersediaan energi. Tingginya penggunaan sistem PV berdampak pada penurunan instalasi biaya dan biaya modul panel surya. Salah satu alasan penurunan biaya pemasangan adalah permintaan konsumen yang tinggi ditunjukkan pada Gambar 2.7 perkembangan studi PV (1975-2020). Evolusi PV sejak tahun 1975 telah membuat kemajuan signifikan. Dimulai dengan PV jenis film tipis dengan efisiensi kurang 10% berkembang menjadi PV *type Crystalline Si Cells* mulai dari efisiensi 15% pada tahun 1977, kemudian sel PV tipe multijunction mulai dari efisiensi sekitar 16% pada tahun 1983, muncul PV dimulai pada efisiensi 5% pada tahun 1991 dan pada tahun 2015 semua jenis PV mengalami efisiensi meningkat, seperti pada Gambar 2.10 (Hiron et al., 2021).



Gambar 2. 10 Perkembangan riset efisiensi PV berbagai jenis tipe dari tahun 1975 hingga 2020 (Hiron et al., 2021)

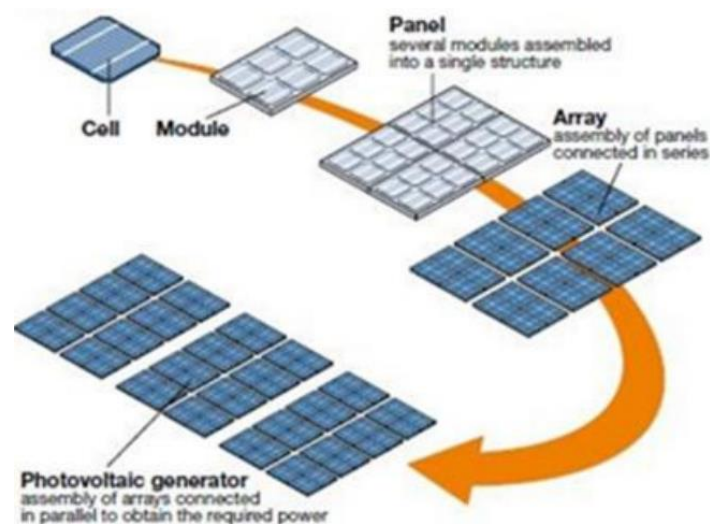
Komponen utama dari PLTS adalah sel surya, yang berfungsi untuk mengkonversi radiasi matahari menjadi arus listrik. Sel ini terbuat dari lapisan tipis bahan semikonduktor, yang umumnya berupa silikon dengan ketebalan sekitar 0,3 mm dan permukaan antara 100-225 cm². Silikon memiliki 4 elektron valensi (tetravalensi) yang didoping dengan atom trivalensi (misalnya boron untuk doping tipe P) pada satu lapisan dan atom pentavalensi (misalnya fosfor untuk doping tipe N) pada lapisan lainnya. Akibatnya, daerah tipe-P memiliki kelebihan lubang (*holes*), sementara daerah tipe-N memiliki kelebihan elektron. Perpindahan elektron ini terjadi ketika sel surya terkena sinar matahari. Gambar 2.11 memperlihatkan tampilan dari sel fotovoltaik (Baskara F, 2021).



Gambar 2. 11 Sel Fotovoltaik (Baskara F, 2021).

2.6.2 Photovoltaic Module (Modul Surya)

Modul surya tersedia di pasaran terdiri dari sekumpulan sel. Paling umum meliputi 36 sel dalam baris paralel yang terhubung seri dengan luas 0,5 m² hingga 1 m². Dalam sebuah modul terdiri dari beberapa buah sel. Jika kemudian dua buah modul atau lebih disusun ke dalam sebuah struktur tunggal, disebut dengan panel. Gambar 2.12 menunjukkan diagram hubungan sel surya, modul, panel, dan *array* sebagai pembangkit listrik (Baskara F, 2021).

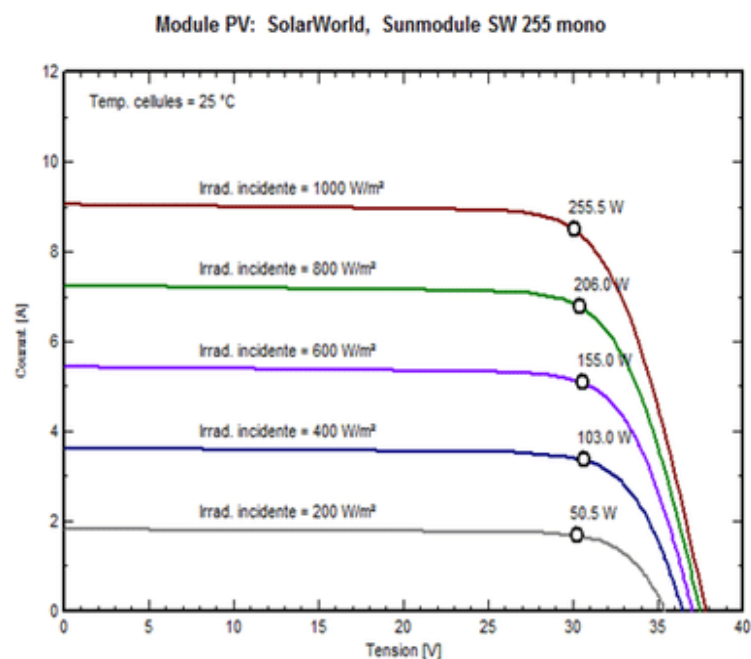


Gambar 2. 12 Diagram hubungan antara *Solar Cell*, Modul, Panel dan *Array* (Baskara F, 2021)

Terdapat 3 jenis PV module berdasarkan jenis dan bentuk susunan atom penyusunnya, yaitu monokristal, polikristal dan amorphous.

1. Monokristal (*mono-crystalline*)

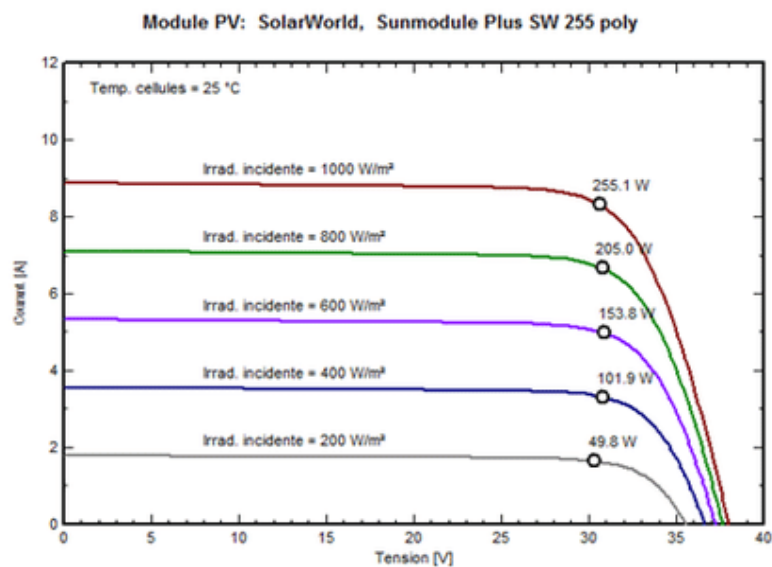
Monokristal adalah modul fotovoltaik (PV) yang paling efisien, dibuat dengan teknologi terbaru dan menghasilkan daya listrik per satuan luas yang paling tinggi. Modul ini dirancang untuk penggunaan yang memerlukan konsumsi listrik besar, terutama di tempat-tempat dengan iklim ekstrim dan kondisi alam yang keras. Efisiensi monokristal dapat mencapai antara 14% hingga 17%. Serta dapat bertahan lama digunakan secara efektif hingga 20 tahun lebih. Kelemahan dari PV module ini adalah tidak akan berfungsi di tempat yang pencahayaannya kurang. Gambar 2.13 menunjukkan karakteristik jenis PV module *mono-crystalline*.



Gambar 2. 13 Karakteristik keluaran dari *Monocrystalline* -Si yang digunakan : Karakteristik I-V dan Karakteristik P-V (Elamim et al., 2017)

2. Polikristal (*Poly-crystalline*)

Poly-crystalline terbuat dari batang silikon yang dihasilkan dengan cara dilelehkan dan dicetak oleh pipa parallel, lalu wafers sel surya ini biasanya berbentuk persegi dengan ketebalan 180-300 μm . Polikristal dibuat dengan tujuan untuk menurunkan harga produksi, sehingga memperoleh sel surya dengan harga yang lebih murah, namun tingkat efisiensi sel surya ini tidak lebih baik dari polikristal sebesar 12 – 14%. Gambar 2.14. menunjukkan karakteristik PV module polikristal.

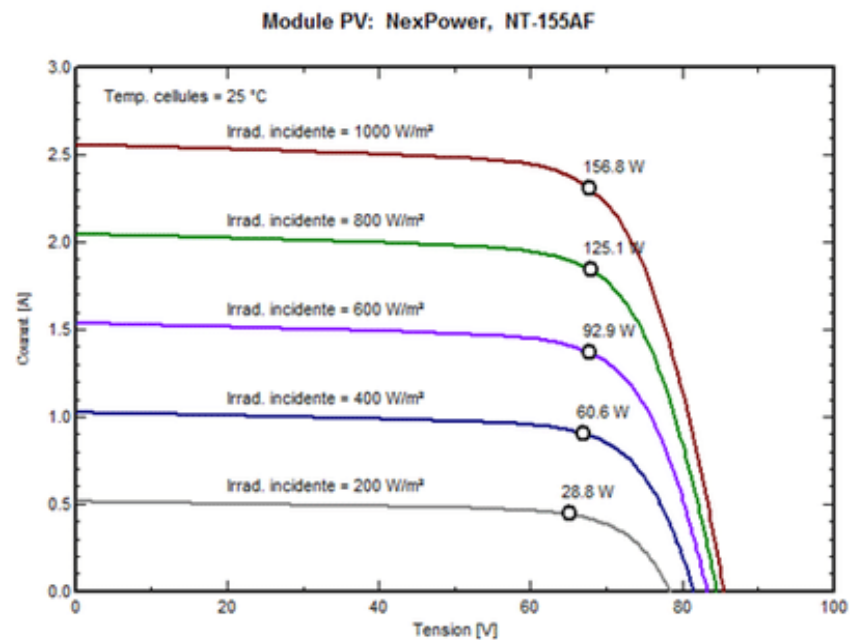


Gambar 2. 14 Karakteristik keluaran dari polikristalin-Si yang digunakan :
Karakteristik I-V dan Karakteristik P-V (Elamim et al., 2017)

3. Amorphous

Amorphous silicon (a-Si) sebagai film menawarkan kesempatan memiliki teknologi sel surya yang rendah biaya dibanding dengan *crystalline silicon*, tetapi efisiensi sel ini cenderung lebih buruk. *Amorphous silicon* juga bisa disemprotkan pada lembar tipis atau bahan fleksibel lainnya. Dilihat dari segi efisiensi, *amorphous silicon* memiliki efisiensi yang sangat rendah yaitu

sebesar 5 – 6% sangat rendah. Rendahnya efisiensi jenis ini disebabkan karena banyaknya resistansi yang dialami elektron pada diksinya. Gambar 2.15 menunjukkan jenis PV module *amorphous silicon*.



Gambar 2. 15 karakteristik keluaran dari *amorphous Si* : karakteristik I-V dan karakteristik P-V (Elamim et al., 2017)

4. Perbedaan Monokristal, Polikristal dan *Amorphous*

Tipe solar panel	Kelebihan	Kekurangan
Monokristal	<ul style="list-style-type: none"> - Memiliki tingkat efisiensi tertinggi pada 15-20% - Bisa bertahan selama 25 tahun 	<ul style="list-style-type: none"> - Harga mahal
Polikristal	<ul style="list-style-type: none"> - Proses yang digunakan dalam pembuatan silikon polikristal lebih sederhana dan murah - Bisa bertahan selama 25 tahun 	<ul style="list-style-type: none"> - Efisiensi hanya mencapai 13-16% - Suhu yang lebih tinggi mempengaruhi produktivitas dan ketahanan

<i>Amorphous</i>	<ul style="list-style-type: none"> - Suhu tinggi hanya memiliki dampak kecil pada produktivitas - Ringan - Biaya rendah 	<ul style="list-style-type: none"> - Efisiensi rendah - Jangka hidup lebih pendek dari mono dan poli
------------------	--	--

Tabel 2. 2 Perbedaan Monokristal, Polikristal dan *Amorphous*

2.6.3 Solar Charge Controller

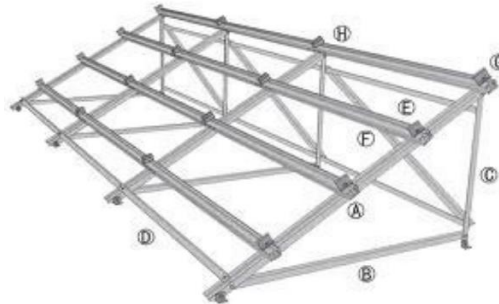
Solar Charge Controller (SCC) adalah perangkat elektronik yang berfungsi untuk mengatur aliran arus DC dari panel surya ke baterai, serta mengendalikan penyaluran arus dari baterai ke peralatan listrik (beban). SCC berperan penting dalam mengendalikan proses pengisian baterai yang berasal dari sistem fotovoltaik (PV *Array*). Peran utama SCC adalah melindungi baterai dan mengotomatisasi proses pengisian, dengan tujuan untuk mengoptimalkan kinerja sistem serta memaksimalkan umur pakai baterai

Solar Charge Controller (SCC) dilengkapi dengan kemampuan untuk mendeteksi kapasitas baterai melalui pemantauan level tegangan baterai. Selain itu, SCC juga memiliki sensor suhu baterai untuk memantau kondisi baterai secara lebih akurat. Dengan adanya SCC, proses pengisian baterai dapat terkontrol dengan baik, mencegah terjadinya *overcharging* (pengisian berlebihan yang dapat merusak baterai akibat tegangan yang sudah mencapai maksimum) serta mencegah *over discharge* (pengosongan berlebih) dengan cara memutuskan hubungan antara baterai dan beban ketika baterai mencapai kondisi *low state of charge* (tingkat pengisian yang sangat rendah) (M Hafidz, 2015).

2.6.4 Penyangga PV Module

Penyangga PV modul berfungsi sebagai *support* untuk menyimpan dan penyangga modul surya sesuai dengan posisi dan kemiringan yang telah ditentukan.

Terbuat dari besi yang *galvanized* untuk melindungi dari karat. Gambar 2.16 penyangga PV modul untuk PLTS terapung (K. ESDM, 2021).

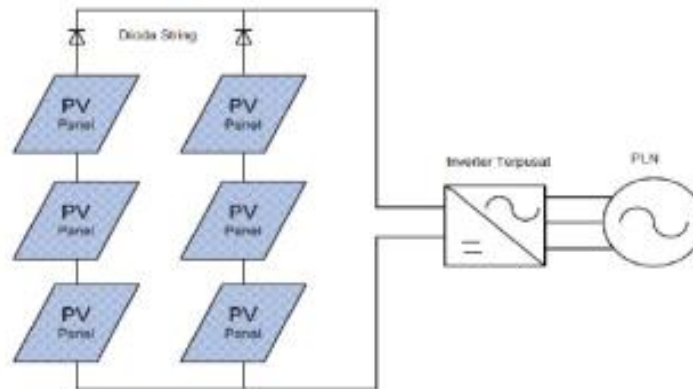


Gambar 2. 16 Penyangga PV Modul (K. ESDM, 2021).

2.6.5 Inverter

Inverter merupakan suatu alat yang berfungsi untuk mengubah arus DC menjadi arus AC. Pada PLTS, inverter yang ditunjukkan oleh Gambar 2.10 berfungsi sebagai pengkondisi tenaga listrik dan sistem kontrol yang merubah arus listrik searah (DC) yang dihasilkan oleh solar modul menjadi listrik arus bolak – balik (AC), yang nantinya akan mengontrol kualitas daya listrik yang dikeluarkan untuk dikirim ke beban atau jaringan listrik. Terdapat dua macam sistem inverter pada PLTS yaitu

1. Inverter 1 fasa untuk sistem PLTS yang bebannya kecil.
2. Inverter 3 fasa untuk sistem PLTS yang besar dan terhubung dengan jaringan PLN.



Gambar 2. 17 Konfigurasi Fotovoltaik Inverter Terpusat (Baskara F, 2021)

Gambar 2.17 memperlihatkan konfigurasi fotovoltaik dengan inverter terpusat, di mana satu inverter besar digunakan untuk mengelola output dari beberapa string modul surya, memungkinkan efisiensi dan pengelolaan daya yang lebih terpusat.

Konfigurasi inverter terpusat yang relatif sederhana dari PLTS fotovoltaik. Topologi penyambungan tipe ini paling murah karena hanya memiliki satu inverter DC ke AC terpusat untuk string modul fotovoltaik yang dihubungkan secara seri dan paralel untuk menghasilkan tegangan dan arus tertentu. Pada saat ini inverter yang digunakan pada PLTS memiliki dua jenis yaitu inverter yang bekerja secara mandiri (Off-Grid) dan inverter yang bekerja dengan tersambung ke jala – jala listrik PLN (On-Grid). Pada PLTS off-Grid menggunakan jenis inverter biasa, dan pada PLTS On-Grid menggunakan jenis *Grid Tie Inverter* (GTI). GTI merupakan salah satu inverter yang secara otomatis dapat mensinkronkan tegangan DC yang bersumber dari panel PV dengan tegangan jala – jala PLN (*Grid*). GTI mampu menghasilkan tegangan yang sama dan mengoptimalkan keluaran energi yang akan dibangkitkan oleh panel surya.

2.6.6 Komponen Pendukung

System PV juga memiliki beberapa aksesoris dan komponen pendukung lainnya, meliputi kabel fotovoltaik, kabel baterai, kabel tahan air dan kabel power lainnya tergantung jenis aplikasinya, yang terdiri dari modul, kabel penghubung komputer untuk memonitoring sistem dan peralatan listrik lainnya (K. ESDM, 2021). Kabel yang cocok untuk PLTS terapung yaitu kabel Na2xSeby karena memiliki 3 lapis yang terdiri dari lapisan pelindung (*ground*), lapisan anti tanah, dan anti air. Kabel tipe ini juga memiliki double proteksi. Gambar 2.18 menunjukkan kabel sebagai salah satu komponen penghubung penting dalam sistem PLTS terapung.



Gambar 2. 18 Kabel sebagai Komponen Penghubung (K. ESDM, 2021).

2.6.7 Rumah Pembangkit (Power House)

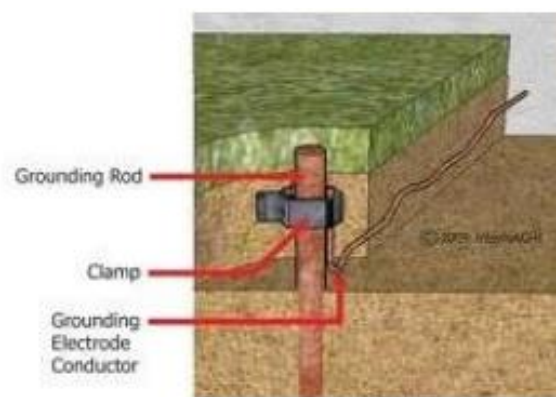
Merupakan bangunan / rumah yang berfungsi untuk penempatan peralatan dan tempat kegiatan operasional pembangkit seperti pada gambar 2.19 (K. ESDM, 2021).



Gambar 2. 19 Rumah Pembangkit / *Power House* (K. ESDM, 2021).

2.6.8 Sistem pentanahan dan penangkal petir

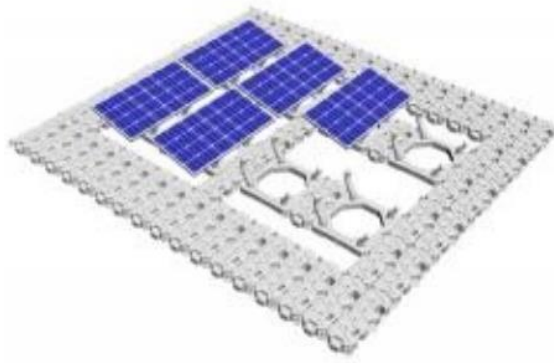
Sistem pentanahan peralatan dibuat dengan menggunakan *rod* tembaga. Penangkal petir berfungsi untuk melindungi peralatan PV *array* dan rumah baterai / inverter dari sambaran petir seperti pada gambar 2.19 (KE. ESDM, 2021).



Gambar 2. 20 Penangkal Petir (K. ESDM, 2021).

2.6.9 Floater

Floater adalah tempat pemasangan modul fotovoltaik di atas permukaan air. Floater ini memungkinkan akses yang tersedia di permukaan air untuk pemasangan dan pemeliharaan sistem. Biasanya, *floater* terbuat dari bahan yang memiliki karakteristik kuat, tahan terhadap UV, korosi, serta mudah dirawat, agar dapat bertahan lama di lingkungan air yang menantang (K. ESDM, 2021). Gambar 2.21 menunjukkan desain *floater* yang digunakan dalam sistem PLTS terapung, dengan bahan dan struktur yang disesuaikan untuk kebutuhan operasional jangka panjang.



Gambar 2. 21 Floater (K. ESDM, 2021).

2.6.10 Combiner Box

Salah satu komponen yang penting di perencanaan PLTS ini adalah *Combiner box*. *Combiner Box* atau panel *existing* adalah panel DC yang berfungsi menggabungkan output dari beberapa String PV menjadi satu, dan dapat berfungsi juga sebagai panel isolasi dan proteksi terhadap arus/tegangan lebih dan petir (K.ESDM, 2021).

Berikut komponen – komponen didalam *combiner box*:

- a. Perangkat proteksi string panel surya digunakan untuk melindungi individual pada string modul surya terhadap arus berlebih.
- b. Busbar adalah titik sambung untuk beberapa string modul surya dan perangkat ini membawa beberapa string ke konduktor yang sama. Busbar DC terbuat dari konduktor tembaga yang berlapis timah untuk perlindungan terhadap korosi.
- c. Sakelar pemutus memungkinkan kotak penggabung terputus secara aman dari *Solar Charge Controller* atau inverter jaringan saat pemeliharaan dilakukan.
- d. Perangkat proteksi tenaga surja (*Surge Protection Device*) digunakan untuk pengaman terhadap tegangan surja akibat sambaran petir. Perangkat ini dihubungkan ke kutub positif bus DC, kutub negatif bus DC dan Pembumian.

- e. Selingkup pelindung (*Enclosure*) merupakan rumah dari komponen listrik dengan fungsi untuk melindungi komponen dari paparan langsung terhadap lingkungan dan mencegah gangguan dari luar.
- f. Batang pembumian (*Grounding Bar*) memberi sambungan pembumian untuk selingkup pelindung (jika kontak logam digunakan) dan untuk menyalurkan surja ke pembumian dengan menggunakan perangkat proteksi tegangan surja (Trengganusari, 2021)

2.6.11 kWh Meter Exim

Meteran Exim adalah alat yang berfungsi mengukur surplus listrik yang masuk ke jaringan PLN. Meteran exim ini juga berfungsi sama dengan kWh meter biasanya yang dimiliki PLN, namun mempunyai fungsi tambahan juga yaitu dapat membaca kWh yang diimpor dari PLTS ke PLN. Meteran Exim ini dapat menghitung berapa listrik yang dikirim ke PLN dan berapa pemakaian listrik PLN. Gambar 2.22 menunjukkan desain dan fungsi meteran exim dalam mendukung pengelolaan energi pada sistem PLTS.



Gambar 2. 22 kWh EXIM

2.6.12 Jangkar dan Tali Jangkar

Jangkar (*Anchor*) dan tali jangkar (*Mooring*) digunakan untuk menahan pergerakan PLTS terapung agar tetap stabil dan tidak berpindah. Jangkar biasanya terbuat dari beton, yang memberikan bobot dan kestabilan, sementara tali jangkar terbuat dari besi atau material kuat lainnya, yang berfungsi untuk mengikat jangkar ke struktur PLTS terapung dan menjaga posisi sistem tetap di tempatnya (K. ESDM, 2021).

2.7 Faktor – faktor yang mempengaruhi produksi PLTS Terapung

PLTS dalam memproduksi energi listriknya dipengaruhi oleh beberapa faktor antara lain sebagai berikut.

2.7.1 Iradiasi Surya

Iradiasi adalah proses dimana suatu objek dapat terpapar radiasi, sedangkan radiasi adalah pancaran energi melalui suatu materi atau ruang dalam bentuk panas, partikel atau gelombang cahaya dari sumber radiasi. Nilai iradians surya harian merupakan salah satu faktor yang menentukan kelayakan sebuah proyek PLTS Terapung. Pada saat iradiasi (intensitas cahaya matahari) menurun, arus yang dihasilkan oleh modul surya akan berkurang secara proporsional dengan penurunan iradiasi tersebut. Namun, penurunan tegangan tanpa beban (*open circuit voltage*) relatif lebih kecil dibandingkan dengan penurunan arus listrik. Hal ini berarti bahwa meskipun intensitas cahaya yang diterima panel surya berkurang, tegangan yang dihasilkan tetap lebih stabil, sementara arus listrik cenderung lebih sensitif terhadap perubahan intensitas cahaya. Penurunan arus ini terjadi karena arus merupakan hasil langsung dari jumlah foton yang diserap oleh sel surya, yang berkurang seiring dengan berkurangnya cahaya matahari. Gambar 2.21 menampilkan hubungan antara

fungsi iradiasi terhadap modul surya terkait dengan arus dan tegangan yang dihasilkannya (Baskara F, 2021).

2.7.1 Suhu Permukaan

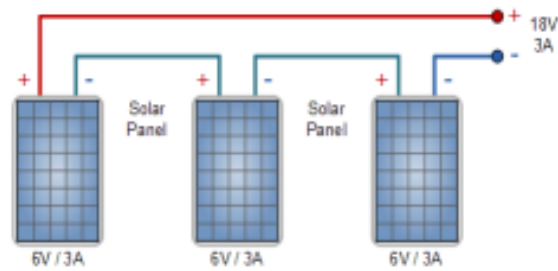
Berkebalikan dengan pengaruh iradiasi, ketika suhu modul meningkat, arus yang dihasilkan mengalami kenaikan sangat sedikit atau dapat dikatakan praktis tidak berubah, sedangkan tegangan menurun dan dengan demikian kemampuan modul dalam menghasilkan energi listrik juga menurun. Penurunan efisiensi adalah berkisar 0,4 hingga 0,6 untuk setiap peningkatan 1°C ditunjukkan oleh Gambar 2.23 (Baskara F, 2021).

2.7.2 Modul

Suhu modul meningkat, arus listrik yang dihasilkan mengalami kenaikan sangat sedikit atau dapat dikatakan praktis tidak berubah, sedangkan tegangan menurun. Namun PLTS Terapung ini yang terletak di atas air akan membantu suhu modul tidak terlalu meningkat, karena PLTS yang di atas akan lebih sejuk dari suhu tanah dan lebih optimal. Modul surya yang disusun seri bertujuan untuk meningkatkan tegangan yang dihasilkan tiap sel, sedangkan arus dapat didesain sesuai kebutuhan dengan memperhatikan luas permukaan sel, berikut macam – macam rangkaian dari modul surya:

a. Rangkaian Seri Modul Surya

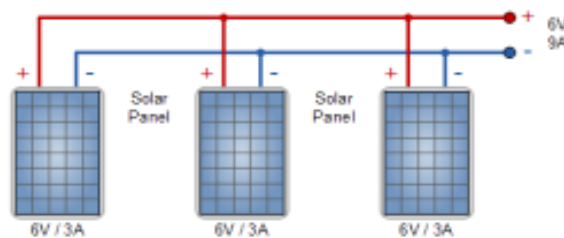
Hubungan seri suatu modul surya didapatkan dengan cara menghubungkan kutub yang berbeda yaitu negatif dengan positif seperti Gambar 2.23 Hasil dari hubungan seri ini yaitu penjumlahan dari nilai tegangan setiap module tetapi nilai arus tetap.



Gambar 2. 23 Rangkaian Modul Surya Seri (Evan, 2019).

b. Rangkaian Paralel Modul Surya

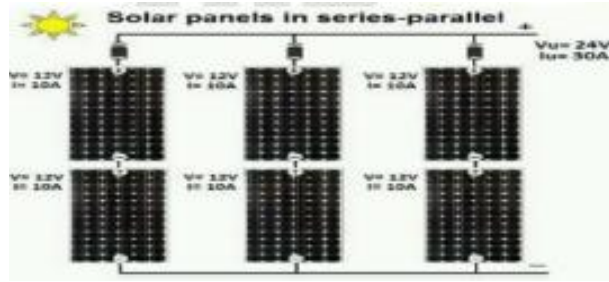
Hubungan seri suatu modul surya didapatkan dengan cara menghubungkan kutub yang sama yaitu negatif dan positif dengan positif seperti Gambar 2.24 Hasil dari hubungan paralel ini yaitu penjumlahan dari nilai arus setiap module tetapi nilai tetap.



Gambar 2. 24 Rangkaian Modul Surya Panel Paralel (Evan, 2019).

c. Rangkaian Seri-Paralel Modul Surya

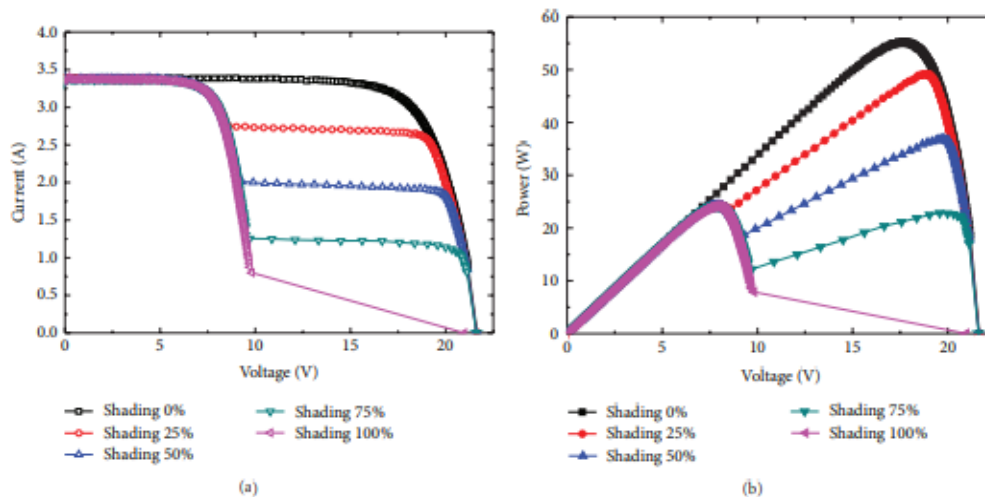
Hubungan seri-paralel suatu modul surya didapatkan dengan cara menggabungkan rangkaian seri dan rangkaian paralel seperti Gambar 2.25 hasil dari hubungan seri-paralel ini yaitu penjumlahan dari nilai arus setiap rangkaian paralel dan penjumlahan dari nilai tegangan setiap rangkaian seri.



Gambar 2. 25 Rangkaian Modul Surya Seri – Paralel (Evan, 2019).

2.7.3 Bayangan (Shading) dari area sekitar

Pada saat bayangan menutupi modul, hubungan P-N pada sel surya berhenti menghasilkan energi dan menjadi beban pasif. PLTS Terapung umumnya diuntungkan dengan area permukaan air yang cukup terbuka sehingga potensi terjadinya efek bayangan terhadap sistem dapat diminimalisir. Namun, peletakan inverter juga harus di perhatikan yang berada di tengah susunan modul surya PLTS Terapung. Keberadaan inverter di tengah platform dapat menimbulkan efek bayangan. Sebagai alternatif, peletakan inverter dapat dipasang di tepi perairan, namun hal ini dapat menimbulkan *DC losses* pada sistem. Selain itu, beberapa wilayah di perairan mungkin terletak di daerah pegunungan, dimana bayangan horizontal dari lokasi yang jauh tetap perlu diperhatikan. Jika terdapat bayangan dari sekitar ada atau minimal, maka lokasi dianggap memenuhi. Namun jika terdapat bayangan sekitar, lakukan analisis lebih jauh dan mendetail. Bahkan jika diperlukan, melakukan penyesuaian desain layout sistem untuk meminimalisir bayangan. Gambar 2.26 karakteristik keluaran Modul PV KC50T-1 di bawah naungan 0%, 25%, 50%, 75%, dan 100% pada sel surya tunggal di salah satu dua kelompok yang terhubung paralel dengan dua diode *bypass* (Sun et al., 2014).

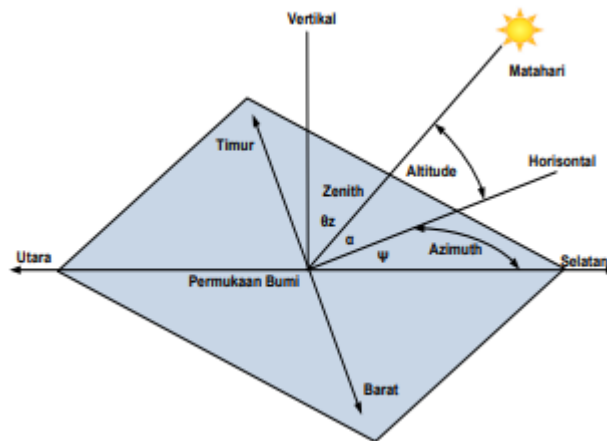


Gambar 2. 26 karakteristik keluaran Modul PV KC50T-1 di bawah naungan (a) kurva I-V dan (b) kurva P-V. (Sun et al., 2014).

2.8 Perhitungan Perancangan Floating PV

2.8.1 Kemiringan Sudut Matahari dengan Panel Surya (Kontur)

Jika sudut kemiringan ideal atau optimum maka keluaran daya dari modul berpengaruh terhadap produksi energi PLTS. Posisi matahari di langit terhadap bumi kita berada sesuai dengan letak geografis lintang dan bujur dapat dihitung dengan persamaan zenith. Zenith dinyatakan satuan derajat, zenith bernilai negatif pada pagi hari, bernilai positif untuk sore hari dan bernilai nol pada saat tengah hari. Untuk nilai zenith kurang dari -90° diartikan matahari belum terbit dan bila nilainya lebih dari 90° diartikan matahari sudah terbenam. Ilustrasi zenith dan posisi matahari terhadap permukaan bumi dapat dilihat pada gambar 2.27 (Prasetyono et al., 2015).



Gambar 2. 27 Zenith dan sistem koordinatnya pada bumi (Prasetyono et al., 2015).

- a. Sudut latitude ϕ merupakan sudut lintang utara atau selatan dari garis ekuator, yang bernilai positif untuk lintang utara, $(-90^\circ \leq \phi \leq 90^\circ)$.
- b. Sudut deklinasi δ merupakan sudut deklinasi matahari, sudut ini selalu bergeser sedikit demi sedikit sepanjang tahun mengikuti pola rotasi bumi mengelilingi matahari, sudut deklinasi ini dapat dihitung melalui persamaan 2.4 $(-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ)$

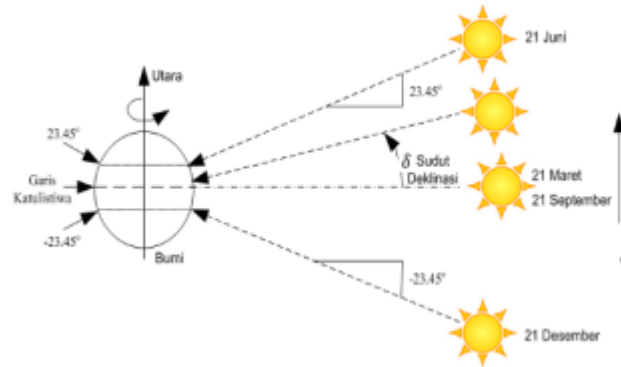
$$\delta = 23.45^\circ \sin \left(360^\circ \frac{284+n}{365} \right) \dots \dots \dots (2.1)$$

Sudut deklinasi δ merupakan fungsi yang dipengaruhi oleh hari ke- n dalam setahun, dimana nilai n antara 1 sampai 365, nilai 1 untuk tanggal 1 Januari dan nilai 365 untuk tanggal 31 Desember. Sedangkan untuk kabisat dengan bulan Februari 29 hari, maka diabaikan sehingga tanggal 31 Desember tetap hari ke 365. Sudut deklinasi matahari terhadap bumi diilustrasikan seperti gambar 2.29 (Prasetyono et al., 2015).

- c. Sudut tilt/slope β merupakan sudut kemiringan suatu bidang (seperti panel surya) terhadap garis horizontal, $(0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ)$. Arah kemiringan dari

bidang dipilih dengan mengatur sudut tilt/slope (β) menggunakan persamaan 2.5.

$$\beta = |\phi - \delta| \dots \dots \dots (2.2)$$



Gambar 2. 28 Sudut Deklinasi posisi matahari terhadap bumi (Prasetyono et al., 2015)

- d. Sudut azimuth (γ) merupakan sudut arah mata angin yang diukur dari Utara (0°) Searah jarum jam hingga proyeksi tegak lurus permukaan bidang terhadap tanah datar (horizontal), dengan rentang sudut ($0^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$).
- e. Sudut jam atau hour angle (ω), merupakan perubahan sudut matahari dari arah timur atau barat akibat rotasi bumi, yang saat pagi bernilai negatif dan sore bernilai positif. Sangat erat kaitannya dengan waktu lokal, sehingga kesalahan nilai ini akan menyebabkan kesalahan yang signifikan. Nilai ini akan bernilai 0 pada tengah hari, bernilai negatif pada pagi hari dan bernilai positif pada sore hari. Berikut persamaan untuk menghitung hour angle.

$$\omega = (Solar\ time - 12) \times 15^\circ \dots \dots \dots (2.3)$$

Nilai solar time dapat dicari dengan perasamaan.

$$solar\ time = waktu\ lokal + \frac{(LSM - Longitude) \times 4' + EoT}{60} \dots \dots \dots (2.4)$$

Dimana,

$LSTM = Local\ Standard\ Time\ Meridian$

$EoT =$ Faktor koreksi waktu sesuai rotasi bumi terhadap matahari

Nilai LSTM dapat dihitung menggunakan persamaan

$$LSTM = 15^\circ \times \Delta T$$

Dimana,

$T_{GMT} =$ Selisih waktu secara time zone

Sedangkan EoT dicari dengan menggunakan persamaan

$$EoT = 9.87 \sin(2x) = -7.53 \cos(x) - 1.5 \sin(x)$$

Dimana nilai x bisa didapat menggunakan persamaan

$$x = \frac{360}{365}n - 81 \dots \dots \dots (2.5)$$

2.8.2 Perhitungan Potensi Energi dari Modul Surya

Menghitung jumlah modul panel surya yang digunakan dapat menggunakan persamaan (2.6)

$$\text{jumlah panel surya} = \frac{\text{kapasitas pembangkit yang direncanakan}}{P_{mpp}(\text{panel surya})} \dots \dots \dots (2.6)$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan inverter yang digunakan dipersamaan 2.7

$$\text{jumlah inverter} = \frac{\text{kapasitas yang direncanakan}}{P_{MaxDCInverter}} \dots \dots \dots (2.7)$$

Keterangan :

$P_{Max} DC Inverter =$ Daya DC maksimum input inverter (Watt)

Adapun rumus untuk menghitung energi listrik (E) yang dihasilkan oleh panel surya berdasarkan intensitas radiasi matahari dan posisi sudut antara matahari

dan panel, dapat dilakukan penghitungan manual dengan menggunakan data yang didapat saat melakukan percobaan menggunakan persamaan 2.8.

$$E = A \cdot G_T \cdot \eta \cdot \cos(\theta^1 - \theta^2) \dots\dots\dots(2.8)$$

E = Energi listrik yang dihasilkan (watt)

A = Luas permukaan panel surya (m^2)

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

η = Efisiensi panel surya

θ^1 = Sudut datang radiasi matahari terhadap bidang horizontal

θ^2 = Sudut kemiringan atau orientasi panel surya

2.8.3 Perhitungan Densitas Energi Matahari dan Keluaran Panel Surya

Densitas energi adalah kemampuan sebuah sistem dalam menangkap energi listrik dalam satuan luas panel. Penggunaan panel surya sangat bergantung terhadap cuaca, sudut arah alat dan posisi, maka diperlukan penelitian tentang perbandingan hasil yang didapat dengan luasan proyeksi tempat (densitas) energi pada sistem tersebut. Persamaan 2.9 densitas energi adalah sebagai berikut:

$$\rho = \frac{E}{S} \dots\dots\dots(2.9)$$

Dengan:

ρ = Densitas Energi(kWh/m^2)

E = Energi Panel(kWh)

S = Luas panel (m^2)

2.8.4 Perhitungan Perencanaan PLTS

Penyesuaian jumlah arus *output* dari panel surya ke *input* inverter maka modul dirangkai seri untuk memperoleh arus yang besar dan dirangkai paralel untuk memperoleh tegangan yang besar. Perhitungan langkah ini dengan menggunakan persamaan berikut

1. Rangkaian seri

$$\text{Min. modul per Array} = \frac{V_{DC Max}}{V_{oc}} \dots\dots\dots(2.10)$$

$$\text{Max. modul per Array} = \frac{V_{DC Min}}{V_{mpp}} \dots\dots\dots(2.11)$$

2. Rangkain paralel

$$\text{Min. modul Paralel per Array} = \frac{I_{DC Min}}{I_{SC}} \dots\dots\dots(2.12)$$

Keterangan:

$V_{DC Max}$	= Tegangan Maksimum DC diinverter (Volt)
$V_{DC Min}$	= Tegangan Minimum DC diinverter (Volt)
$I_{DC Max}$	= Arus Maksimum DC diinverter (Ampere)
$I_{DC Min}$	= Arus Minimum DC diinverter (Ampere)
V_{OC}	= Tegangan Open Circuit di Modul Surya (Volt)
V_{mpp}	= Tegangan mpp di Modul surya (Ampere)
I_{SC}	= Arus mpp di Modul Surya (Ampere)
I_{Mpp}	= Arus mpp di Modul Surya (Ampere)

2.8.5 Performance Ratio (PR)

Performance Ratio (PR) atau rasio kinerja merupakan *presentase* dari total potensi energy PV array yang dapat dikonversikan menjadi energi listrik dalam bentuk arus listrik bolak-balik.

$$PR = \frac{\text{Energy to Grid (Wh)}}{POA \text{ irradiance } \left(\frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}\right) \times \frac{DC \text{ Nameplate (W)}}{STC(1000\text{W}/\text{m}^2)}} \dots\dots\dots(2.13)$$

Dengan:

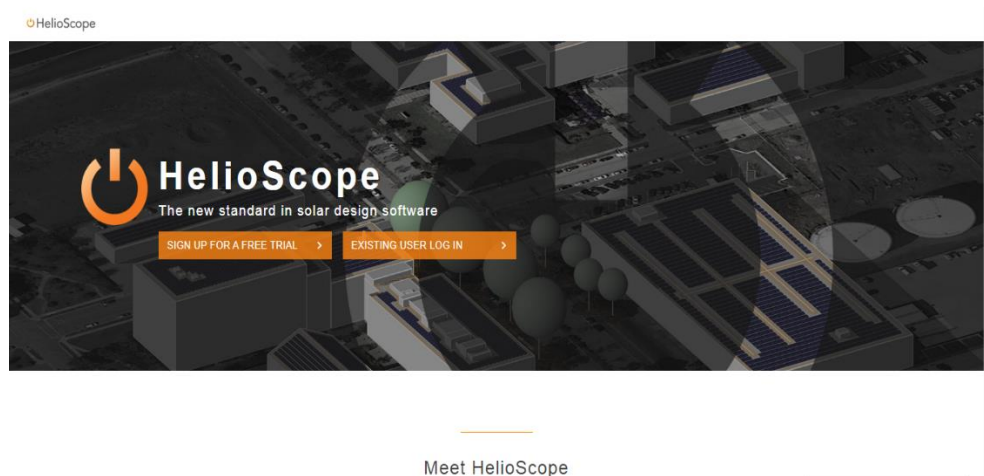
E_{PV} : Energi ke jaringan (kWh_{AC})

P_o : Daya puncak (kWp_{DC})

2.9 Helioscope

Helioscope merupakan suatu program simulasi yang bersifat open *software* berbasis website berfungsi untuk merancang *x* dengan melakukan simulasi lengkap perencanaan berupa tampilan 3D. Helioscope adalah perangkat lunak yang dikembangkan oleh *Folsom Labs USA*, yang memungkinkan pengguna untuk memprediksi produksi energi serta menghitung kerugian yang disebabkan oleh faktor cuaca dan iklim. Prinsip kerja simulasi ini mencakup analisis bayangan (*shading*), pengkabelan (*wiring*), efisiensi komponen, kesesuaian panel, jumlah dan jenis modul yang akan digunakan, serta luas area yang diperlukan untuk instalasi PLTS. Data lokasi, seperti koordinat di lingkungan Waduk Cirata, juga dapat dimasukkan untuk memberikan hasil simulasi yang lebih akurat. Software ini menyajikan produksi tahunan, *library data* cuaca, *performance ratio*, sumber rugi – rugi dan parameter – parameter sistem lain pada hasil simulasi Perangkat lunak ini memungkinkan pengguna untuk memperkirakan produksi energi yang menghitung atas kerugian akibat cuaca dan iklim. *Shading*, pengkabelan, efisiensi komponen, ketidakcocokan panel dan penggunaan lama bisa dianalisis untuk memberikan rekomendasi untuk peralatan dan tata letak susunan. Alat ini menampilkan produksi tahunan, kumpulan data cuaca, rasio kinerja dan parameter sistem lainnya untuk hasil simulasi (Baskara F, 2021).

Berikut merupakan tampilan *software* helioscope yang ditunjukkan oleh gambar 2.29.



Gambar 2. 29 Tampilan Helioscope (HelioScope, 2022)

Pada penelitian ini, digunakan helioscope, yang memungkinkan pengguna untuk memasukkan lokasi bangunan yang akan diteliti dan langsung terhubung dengan *Google Earth*. Hal ini mempermudah proses simulasi produksi energi PLTS pada bangunan yang akan diterapkan. Selain itu, helioscope juga menyediakan database panel surya dan inverter, sehingga pengguna dapat memilih komponen PLTS yang sesuai dengan kebutuhan dan spesifikasi proyek. Dengan fitur ini, proses desain dan perencanaan sistem PLTS menjadi lebih efisien dan akurat.