

BAB II LANDASAN TEORI

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

PLTS adalah suatu pembangkit listrik yang menggunakan sinar matahari melalui sel surya (*photovoltaic*) untuk mengubah radiasi sinar foton matahari menjadi energi listrik. Sel surya merupakan lapisan-lapisan tipis dari bahan semikonduktor silikon (Si) murni dan bahan semikonduktor lainnya. PLTS memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik DC, yang dapat di ubah menjadi listrik AC apabila diperlukan. PLTS tetap dapat menghasilkan listrik dalam cuaca mendung selama masih terdapat cahaya.

Sistem PLTS dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa jenis. Berdasarkan aplikasi dan konfigurasinya, secara umum PLTS dapat dibagi menjadi dua, yaitu sistem PLTS yang terhubung dengan jaringan (*on-grid PV system*) dan sistem PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan (*off-grid PV system*) atau PLTS yang berdiri sendiri (*stand-alone*). PLTS *stand-alone* ini selain dapat beroperasi secara mandiri, juga dapat di tunjang oleh sumber daya lain seperti tenaga angin, generator set, maupun tenaga air serta tenaga mikro hidro yang disebut sebagai sistem PLTS hybrid (Kumara et al., 2018).

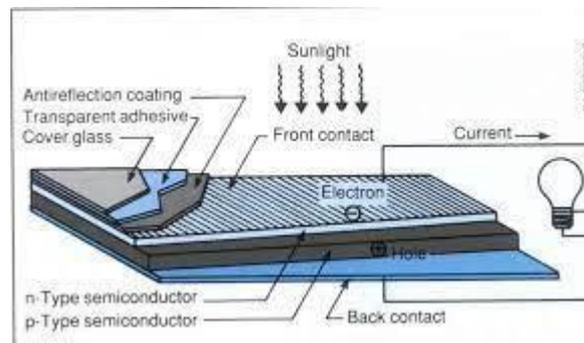
2.2 Struktur Umum Sel Surya

bahan kimia khusus untuk membentuk dasar dari sel surya. Sel surya pada umumnya memiliki ketebalan minimum 0,3 mm yang terbuat dari irisan bahan semikonduktor dengan kutub positif dan negatif. Tiap sel surya biasanyaSel surya terbuat dari potongan silikon yang sangat kecil dengan dilapisi menghasilkan tegangan 0,5 volt. Sel surya merupakan elemen aktif(semikonduktor) yang

memanfaatkan efek fotovoltaik untuk merubah energi suryamenjadi energi listrik (Wulandari Handini, 2008).

Struktur inti dari sel surya pada umumnya terdiri dari satu atau lebih jenis material semikonduktor dengan dua daerah berbeda yaitu, daerah positif dan negatif. Dua sisi yang berlainan ini berfungsi sebagai elektroda. Untuk menghasilkan dua daerah muatan yang berbeda umumnya digunakan *dopant* dengan golongan periodik yang berbeda. Hal ini dimaksudkan agar *dopant* pada daerah negatif akan berfungsi sebagai pendonor *electron*, sedangkan *dopant* pada daerah positif akan berfungsi sebagai *acceptor* elektron (Wulandari Handini, 2008).

Selain itu pada sel surya terdapat lapisan antirefleksi, dan substrat logam sebagai tempat mengalirnya arus dari lapisan tipe-n (elektron) dan tipe-p (hole). Skema sederhana struktur sel surya diilustrasikan pada gambar 2.1.

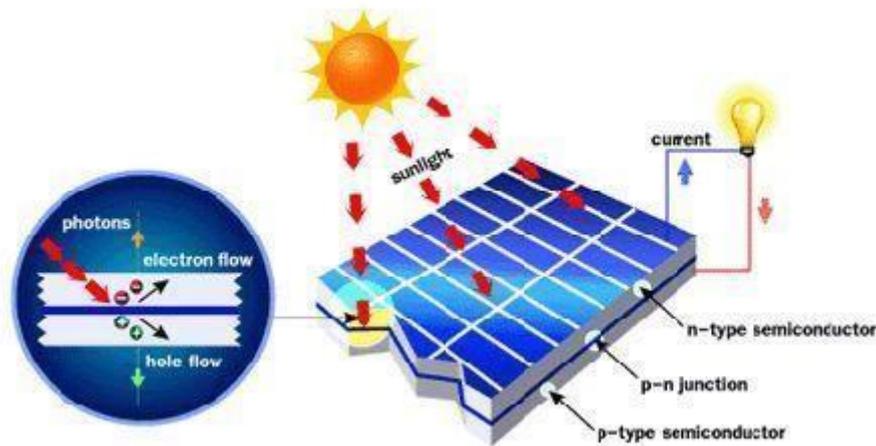


Gambar 2. 1 susunan lapisan solar cell secara umum (Wulandari Handini, 2008)

2.3 Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga surya (PLTS)

Ketika sinar matahari menyinari panel surya maka elektron pada pita valensi akan meloncat ke pita konduksi. Apabila sel surya dihubungkan dengan sirkuit luar maka akan terjadi gerakan elektron. Arus listrik yang dihasilkan pada sel surya merupakan arus DC (Nurosyid et al., n.d.).

Pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) pada umumnya dapat bekerja apabila menerima cahaya foton dari matahari dan cahaya foton tersebut diterima oleh sel surya dimana pada sel surya dapat mengkonversikan energi foton menjadi energi listrik. Proses perubahan atau konversi cahaya matahari menjadi listrik ini dimungkinkan karena bahan material yang menyusun sel surya fotovoltaik berupa semikonduktor. Sel surya tersusun dari dua lapisan semikonduktor dengan muatan yang berbeda. Lapisan atas sel surya bermuatan negative (n) sedangkan lapisan bawahnya bermuatan positive (p) (Natsir, n.d.).



Gambar 2. 2 Ilustrasi proses terjadinya listrik pada sel surya (Natsir, n.d.)

Silikon adalah bahan semi konduktor yang paling umum digunakan untuk selsurya. Apabila permukaan sel surya dikenai cahaya maka dihasilkan pasangan elektron dan hole. Elektron akan meninggalkan sel surya dan akan mengalir pada rangkaian luar sehingga timbul arus listrik. Arus listrik yang dihasilkan oleh sel surya dapat dimanfaatkan langsung atau disimpan dulu dalam baterai untuk digunakan kemudian (Natsir, n.d.).

Besarnya pasangan elektron dan hole yang dihasilkan, atau besarnya arus yang dihasilkan tergantung pada intensitas cahaya maupun panjang gelombang

cahaya yang jatuh pada sel surya. Intensitas cahaya menentukan jumlah foton, makin besar intensitas cahaya yang mengenai permukaan sel surya makin besar pula foton yang dimiliki sehingga makin banyak pasangan elektron dan hole yang dihasilkan yang akan mengakibatkan besarnya arus yang mengalir. Makin pendek panjang gelombang cahaya maka makin tinggi energi fotonnya sehingga makin besar energi elektron yang dihasilkan, dan juga berimplikasi pada makin besarnya arus yang mengalir (Natsir, n.d.).

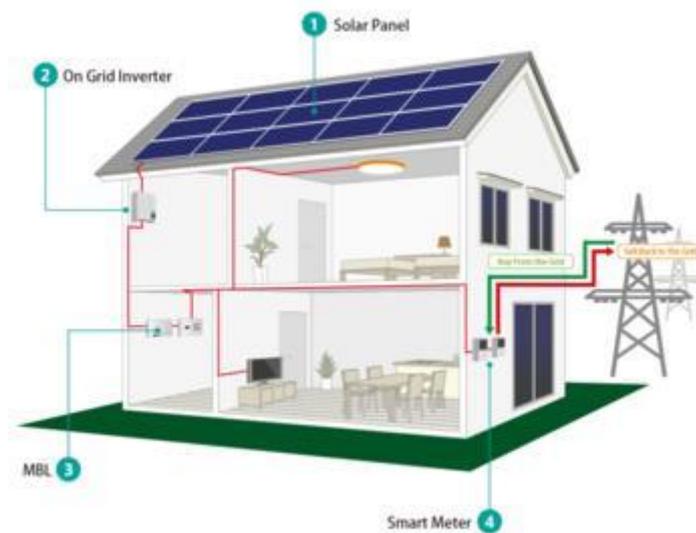
2.4 Klasifikasi Pembangkit Listrik Tenaga surya (PLTS)

2.4.1 Berdasarkan teknologi

Pemasangan PLTS berdasarkan teknologi terdapat tiga jenis, yaitu roof-mounted, ground-mounted dan Reservoir / lake based floating solar sistem. Penjelasan tentang ketiga dan teknologi PLTS adalah sebagai berikut ini.

a. Roof-Mounted

Metode instalasi *roof-mounted* merupakan instalasi PLTS yang memanfaatkan lahan bebas penghalang di atap bangunan. Atap berfungsi sebagai struktur penopang instalasi PLTS, namun dibutuhkan persiapan untuk mengatasi permasalahan cuaca. Metode teknologi *roof-mounted* efektif untuk kapasitas pembangkitan yang kecil, penghematan tagihan listrik dengan adanya sistem ekspor impor, aplikasi energi baru terbarukan modern, dan membantu mengurangi dampak perubahan iklim (ICED, 2020). Metode teknologi *roof-mounted* seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 PLTS Roof-Mounted atau PLTS Rooftop (Adyasolar, 2018)

b. Ground-Mounted

Metode instalasi ground-mounted memanfaatkan bidang tanah kosong tanpa halangan yang datar dan stabil. Tonggak dan balok baja diperlukan sebagai struktur penopang dan analisis untuk mengetahui stabilitas tanah dalam jangka waktu yang panjang. Metode instalasi ground-mounted efektif untuk kapasitas pembangkitan skala besar. Kelebihan dari panel surya yang dipasang di atas tanah yaitu mempunyai rata rata temperatur panel surya lebih stabil karena adanya cooling dari tanah yang bisa menyerap panas. Adapun kelemahan pada sistem diatas tanah yaitu harus mempunyai lahan yang cukup luas serta adanya debu dan kotoran karena posisi nya lebih rendah sehingga dekat dengan tanah, jika debu menutupi seluruh bagian pada panel surya akan terjadi pengurangan output produksi panel surya sebesar 20%. Adapun solusi pada masalah ini panel surya dibersihkan dalam rentang waktu empat bulan sekali (Fauzi Wibowo & Rokhmat, 2019).

Teknologi ground-mounted seperti pada Gambar 2.4.



Gambar 2. 4 PLTS Ground-Mounted (ESDM, 2019)

c. *Reservoir / lake based floating solar system*

Metode instalasi floating solar photovoltaic yaitu dengan memanfaatkan permukaan air dengan menggunakan sistem apung. *Floating solar system* dapat dipasang di atas permukaan air seperti laut, waduk, danau dan lain – lain. Pemanfaatan reservoir / *laked based floating solar system* sangat berpotensi dikarenakan permukaan air mempunyai sistem pendinginan evaporatif alami yang menjaga suhu panel lebih rendah dan meningkatkan efisiensi panel sampai 11% dibandingkan *ground-mounted pv system* (Sahu et al., 2016).

Metode instalasi ini juga memiliki jumlah yang lebih rendah terhadap halangan yang menyebabkan *shading losses* dan lebih sedikit efek debu yang dapat menurunkan performa panel (Golroodbari & van Sark, 2020).



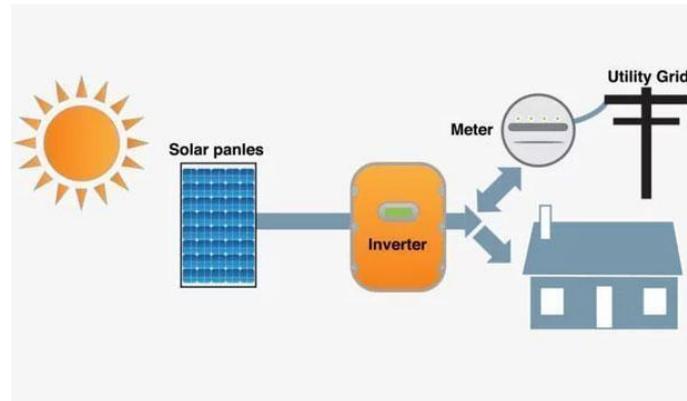
Gambar 2. 5 PLTS Floating solar system (Sujoy et al., 2017)

2.4.2 Berdasarkan koneksi sistem terhadap grid

PLTS secara umum dibagi menjadi 2 berdasarkan teknologinya, yaitu grid connection dan off grid. Penjelasan tentang kedua jenis PLTS berdasarkan teknologinya adalah sebagai berikut ini:

a. Grid Connection System

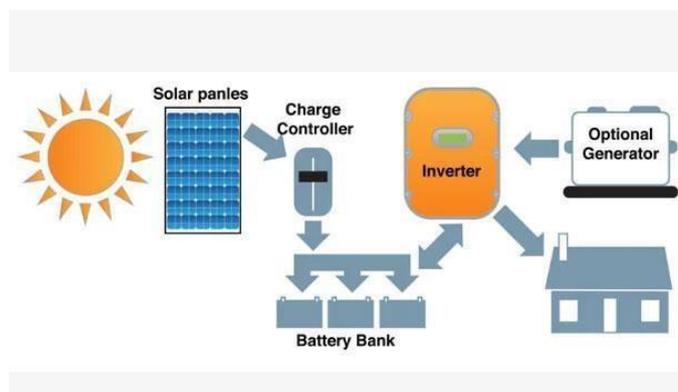
PLTS On Grid adalah suatu model instalasi yang terdiri dari dua sumber energi listrik yaitu jaringan listrik PLN dan panel surya yang dijadikan satu. Penggunaan panel surya / PLTS yang terhubung pada jaringan listrik untuk mensuplai energi listrik di rumah tangga atau industri. Sistem tersebut menggunakan panel surya sebagai pembangkit yang bebas gas emisi buang atau ramah lingkungan. Sistem Grid Connection juga tetap terkoneksi dengan jaringan PLN dengan tujuan mengoptimalkan pemanfaatan energi panel surya yang menghasilkan energi secara maksimal dan juga mengurangi tagihan listrik (Anggara, 2018). Teknologi PLTS On Grid ditunjukkan pada gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Skema Konfigurasi PLTS *ON-Grid connected* (ICED, 2020).

b. *Off – Grid System*

Sistem *Off-Grid* atau biasa disebut stand alone adalah sistem yang hanya mengandalkan energi matahari sebagai sumber energi utama penyedia energi yang dikonversi menjadi energi listrik. Sistem *Off Grid* menggunakan rangkaian modul surya untuk menghasilkan energi listrik sesuai dengan kebutuhan beban tanpa terhubung dengan jaringan listrik PLN. Sistem *Off-Grid* ada yang bekerja berdampingan dengan pembangkit lain atau bisa disebut dengan hybrid sistem. Tujuan hybrid sistem sama dengan grid connection yaitu menjaga keseimbangan pembangkit daya. Sistem PLTS *Off-Grid* umumnya digunakan pada daerah/ wilayah yang jauh / tidak terjangkau jaringan listrik PLN (Asy & Purnama, 2011). Teknologi PLTS *Off – Grid* ditunjukkan pada gambar 2.7.

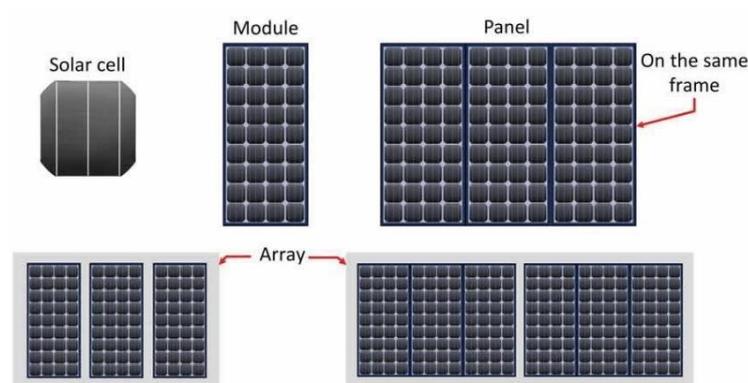


Gambar 2. 7 Skema Konfigurasi PLTS *Off – Grid* (ICED, 2020)

2.5 Komponen Penyusun Pembangkit Listrik Tenaga surya (PLTS)

2.5.1 Modul Surya

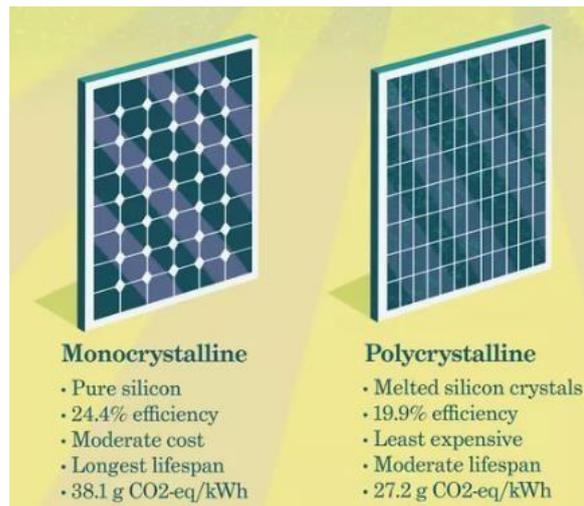
Modul surya atau modul Photovoltaic adalah salah satu komponen utama dalam PLTS. Modul surya atau modul photovoltaic akan disambung secara seri untuk membentuk suatu rangkaian yang kemudian akan diparalel untuk membentuk sebuah array atau susunan dalam proses instalasi. Ditunjukkan pada gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Susunan Modul Surya (ICED, 2020)

Kapasitas daya merupakan spesifikasi modul surya yang menyatakan besarnya daya yang bisa dihasilkan oleh modul surya saat intensitas radiasi yang diterima sebesar 1000 W/m^2 dan kondisi suhu lingkungan 25°C . Kapasitas daya modul surya diukur dalam satuan Watt – peak (Wp). Daya dan arus listrik yang dihasilkan modul surya berubah – ubah tergantung pada besarnya intensitas radiasi surya yang diterima (Hasan, 2012).

Terdapat dua jenis sel surya dibedakan berdasarkan bahan penyusun semikonduktor yang bervariasi dan Silikon yang secara Individu (chip) banyak digunakan diantaranya:



Gambar 2. 9 Jenis – jenis panel surya (Emilyrhode,2021)

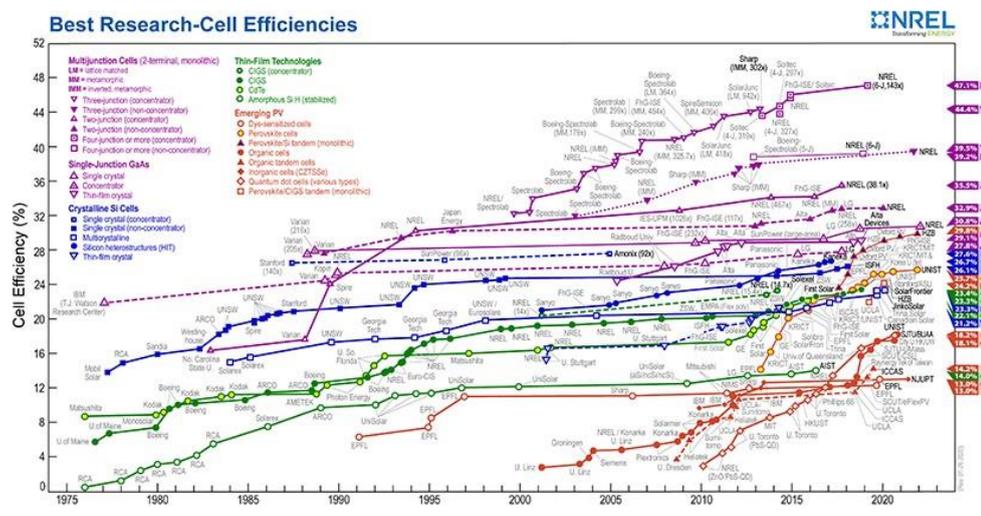
a. *Monocrystalline* (Si)

Monocrystalline biasanya dibuat menggunakan proses *Czochralski*. Lapisan ini cenderung mahal karena mereka dipotong silinderingot (mirip bundar/lingkaran), ciri-ciri fisik solar cell ini adalah bentuknya yang segidelapan cenderung bulat dan warnanya yang agak gelap. Sekarang Mono-crystalline dapat dibuat setebal 200 mikron, dengan nilai efisiensi sekitar 24%.

b. *Polycrystalline*

Dibuat dari peleburan silikon dalam tungku keramik, kemudian pendinginan perlahan untuk mendapatkan bahan campuran silikon yang akan timbul diatas lapisan silikon. Sel ini kurang efektif dibanding dengan sel Polycrystalline (efektivitas 18%), tetapi biaya lebih murah (Asy & Purnama, 2011).

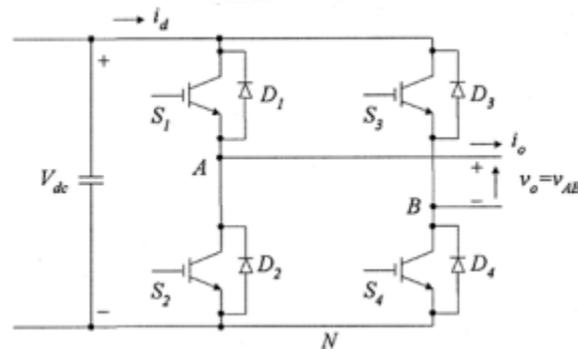
Sejarah Perkembangan Efisiensi PV



Gambar 2. 10 perkembangan studi tentang panel surya dari tahun 1975 sampai 2020.(Hiron et al., 2021)

Gambar 2.10 menunjukkan pengembangan studi tentang solar panel atau photovoltaic (1975-2020) dari National Renewable Energy Laboratory (NREL). Evolusi dari solar panel mengalami progress yang signifikan dari tahun 1975. Dimulai tipe thin-film yang mempunyai efisiensi kurang dari 10%, kemudian tipe Crystalline Si Cell yang mempunyai efisiensi dimulai dari 15% (1977), lalu multijunction tipe PV yang mempunyai efisiensi dimulai dari 16% (1983) dan muncul PV yang mempunyai efisiensi 5% (1991). Pada tahun 2015, semua PV mengalami peningkatan efisien. Tipe khusus multijunction cell PV (three-junction concentrator) mencapai 46% (Hiron et al., 2021).

2.5.2 Inverter



Gambar 2. 11 Topologi Inverter (ekafirmansyah,2014)

Inverter merupakan komponen penting dalam sistem PLTS yang spesifikasinya harus diperhatikan dengan baik dan sesuai dengan kebutuhan. Inverter merupakan salah satu bagian dari power conditioning yang berfungsi mengubah tegangan output DC dari panel surya ataupun baterai menjadi tegangan AC. Inverter terdiri dari komponen sakelar elektronik, dan komponen filter pasif. Pada bagian input terdiri dari kapasitor elektrolit besar, yang bertanggung jawab untuk menghasilkan tegangan DC yang stabil.

Penggunaan inverter pada saat ini pada PLTS memiliki dua jenis yaitu inverter yang bekerja secara mandiri (Off-Grid) dan inverter yang bekerja dengan tersambung jala-jala listrik PLN (On-Grid). Pada PLTS Off-Grid digunakan jenis inverter biasa, sedangkan pada PLTS On-Grid menggunakan jenis Grid Tied 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 persis dengan tegangan jala-jala pada waktu yang sama dan mengoptimalkan keluaran energi yang dibangkitkan oleh panel surya (Safri Nahela, 2019).

Inverter merupakan peralatan yang menjadi link antara solar modul dengan

jaringan listrik. Terdapat beberapa jenis inverter berdasarkan fungsinya.

- a. Central inverter: digunakan untuk PLTS dengan struktur yang homogen (modul PV dengan tipe yang sama), digunakan untuk sistem dengan kapasitas daya diatas 100 kW.
- b. String inverter: digunakan pada string, dimana PV dibagi dalam beberapa string dan masing-masing string menggunakan satu inverter. Teknologi ini akan menurunkan biaya dan memudahkan pekerjaan instalasi, meningkatkan energi yang dihasilkan serta meningkatkan availability system.
- c. Module inverter: setiap modul PV menggunakan satu buah inverter mikro dengan biaya yang relatif murah.
- d. Smart Inverter: inverter yang mampu untuk dapat diintegrasikan dengan jaringan listrik publik, karena dilengkapi dengan sensor yang dapat memonitor dan mengontrol jaringan listrik publik sehingga bisa menjaga kestabilannya dan sinkron dengan tegangan listrik publik. (Gardini Lambang Purbaya, 2019)

Inverter dapat dibedakan menjadi tiga berdasarkan bentuk gelombang outputnya, yaitu pure sine wave inverter, sine wave modified inverter dan square ave inverter. Penjelasan dari ketiga jenis inverter tersebut adalah sebagai berikutini.

- a. Pure Sine Wave Inverter Pure Sine Wave Inverter adalah inverter yang memiliki tegangan output dengan bentuk gelombang sinus murni. Inverter jenis ini dapat memberikan supply tegangan ke beban (Induktor) atau motor listrik dengan efisiensi daya yang baik.

- b. Sine Wave Modified Inverter Sine Wave Modified Inverter adalah inverter dengan tegangan output berbentuk gelombang kotak yang dimodifikasi sehingga menyerupai gelombang sinus. Inverter 13 jenis ini memiliki efisiensi daya yang rendah apabila digunakan untuk mensuplay beban induktor atau motor listrik.
- c. Square Wave Inverter Square Wave Inverter adalah inverter dengan output berbentuk gelombang kotak. Inverter jenis ini tidak dapat digunakan untuk mensupply tegangan ke beban induktif atau motor listrik (Shinta & Febriani, 2020).

2.5.3 Kabel

Manajemen kabel pada instalasi PLTS Terapung membutuhkan perencanaan yang baik, baik selama masa perencanaan ataupun proses instalasi. Panjang kabel dan rute kabel perlu direncanakan dan dihitung dengan hati-hati. Elastisitas kabel harus dapat mengakomodasi gerakan platform terapung dan perubahan ketinggian permukaan air yang mungkin terjadi. Jika tidak, gaya tegang dapat menyebabkannya kabel menjadi putus dan pecah.

Dengan memperhatikan perbedaan modul surya, orientasi modul surya (landscape/portrait), serta dimensi platform floater, pengembang proyek dapat mengidentifikasi apakah panjang kabel dari junction box yang disediakan oleh pabrikan sudah cukup panjang atau belum. Jika belum cukup, maka modifikasi panjang kabel mungkin dibutuhkan saat merencanakan dan melakukan pengadaan komponen-komponen PLTS (ESDM, 2021).

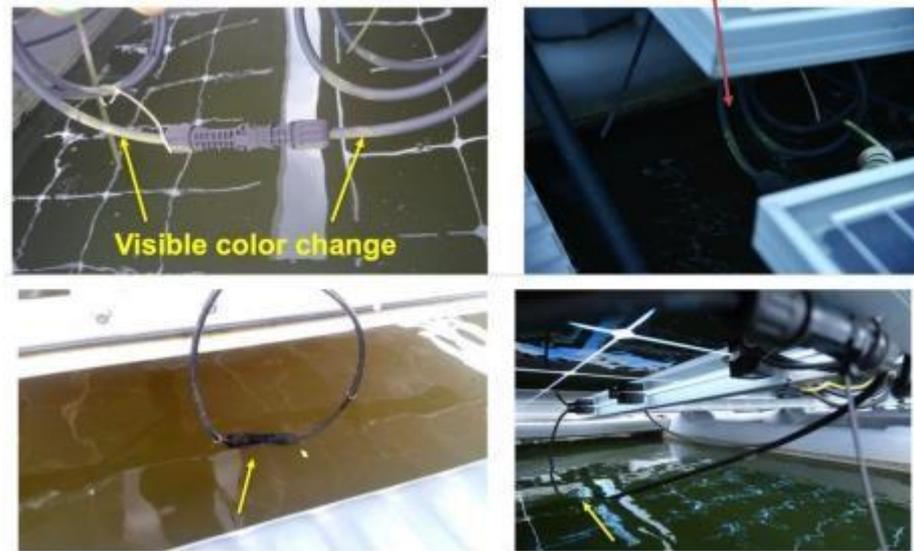


Gambar 2. 12 Rute kabel yang berbentuk S (ESDM, 2021)

Selain itu, kabel juga harus diikat secara tepat dengan pengikat kabel yang tahan sinar ultraviolet atau baja tahan karat. Kabel juga perlu diarahkan dan dilindungi sehingga tetap ada rongga sisa untuk menjaga kabel agar tidak terkena air. Pada tahap perencanaan, harus dipertimbangkan rute kabel (*cable routing*) dan desain platform. Rute kabel yang baik dapat dilakukan dengan membentuk huruf S (ESDM, 2021).

Instalasi kabel di permukaan air lebih berpotensi menimbulkan permasalahan dan kerusakan dibandingkan dengan instalasi pada daratan. Beberapa permasalahan yang seringkali ditemukan antara lain:

- a. Kabel DC dan kabel string menyentuh permukaan air. Kondisi ini biasanya disebabkan oleh terlalu rendahnya jarak antara modul surya dan muka air, ketidaktepatan pengukuran panjang kabel, serta adanya gelombang air yang disebabkan oleh angin atau aktivitas kapal pada muka air. Kondisi ini seharusnya dihindari karena dapat menyebabkan degradasi dan korosi kabel DC dan konektor kabel, adanya potensi kebocoran kabel serta menurunnya kualitas insulasi kabel yang digunakan (ESDM, 2021).



Gambar 2. 13 Kabel DC menyentuh permukaan air (ESDM, 2021)

- b. Kabel dan conduit kabel dari platform terapung menuju lokasi di tepi badan air atau lokasi inverter terendam di dalam air. Kondisi ini biasanya disebabkan oleh desain kabel yang digunakan lebih panjang daripada yang seharusnya dibutuhkan dengan tujuan semula agar dapat kondisis pergerakan platform terapung yang berlebihan tetap dapat diakomodasi. Kondisi ini dapat membahayakan keselamatan ketenagalistrikan bahkan menimbulkan potensi kebakaran (ESDM, 2021).



Gambar 2. 14 Kabel dan conduit yang terendam air (ESDM, 2021)

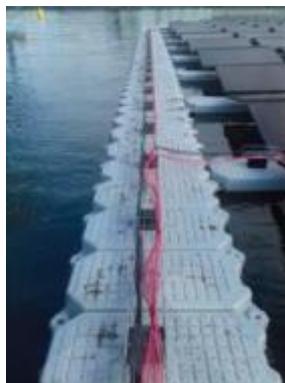
- c. Penumpukan vegetasi perairan (biofouling) pada kabel yang berpotensi meningkatkan beban dan tarikan pada kabel.



Gambar 2. 15 Biofouling pada kabel (ESDM, 2021)

Selain sistem manajemen kabel, kabel-kabel yang digunakan pada sistem PLTS Terapung sebaiknya memenuhi ketentuan sebagai berikut:

1. *Marine grade DC cables* (AD 8, IP 68) (Gambar 2.16)
2. *Cable ducts*
3. Bending radius sesuai dengan ketentuan
4. Sistem pengkabelan diberikan label untuk kemudahan ketelusuran
5. *High abrasion resistant*
6. UV dan ozone resistant
7. Certificate EN/TUV/UL



Gambar 2. 16 Marine grade DC cable (ESDM, 2021)

2.5.4 Combiner Box



Gambar 2. 17 *Combiner Box* (sunwind,2022)

Salah satu komponen penting di perencanaan PLTS ini yaitu Combiner box. Combiner box atau panel *existing* berfungsi untuk menggabungkan string photovoltaic untuk mendapatkan arus keluaran dari photovoltaic yang lebih besar.

Berikut komponen-komponen didalam *combiner box*:

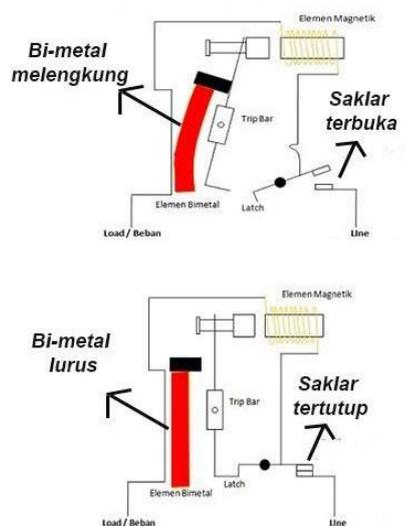
- a. Perangkat proteksi string panel surya digunakan untuk melindungi individual *string* modul surya terhadap arus berlebih. Untuk tujuan ini biasanya digunakan sekering atau MCB.
- b. *Busbar* adalah titik sambungan untuk beberapa *String* modul surya. Perangkat ini membawa beberapa *String* ke konduktor yang sama. *Busbar* DC terbuat dari konduktor tembaga pada dan 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 sebagai pengaman terhadap tegangan surja akibat sambaran petir. Perangkat ini dihubungkan ke kutub positif bus DC, kutub negative 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 kotak logam digunakan) dan untuk menyalurkan surja ke pembumian dengan menggunakan perangkat proteksi tegangan surja (Trengganusari, 2021).

2.5.5 Alat Proteksi (pengaman)

Alat proteksi (pengaman) berfungsi untuk mengantisipasi terjadinya gangguan atau mencegah terjadinya kerusakan yang akan terjadi terhadap peralatan listrik yang ada. maka diperlukannya alat proteksi dalam sistem PLTS yaitu Mini Circuit Breaker (MCB), Molded Case Circuit Breaker (MCCB) dan Surge Protection Device (SPD) (Trengganusari, 2021). Berikut penjelasan dari masing – masing alat proteksi.

1. MCB (*Miniature Circuit Breaker*)

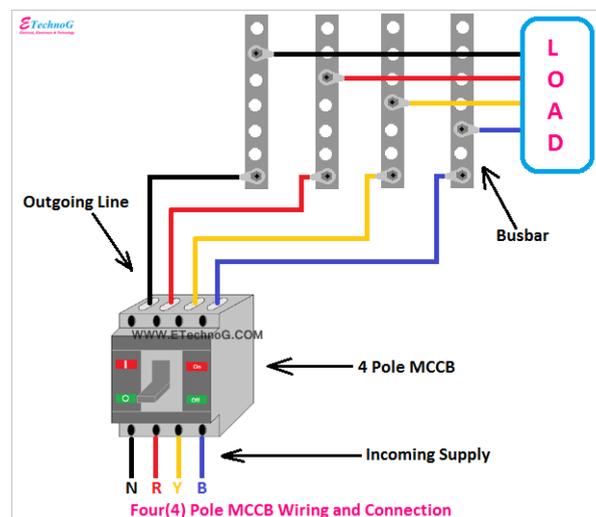


Gambar 2. 18 Skema trip MCB (alf, 2021)

Fungsi dari MCB sendiri adalah sebagai proteksi dan pemutus arus apabila terjadi kelebihan beban ataupun terjadi hubung singkat. MCB menjadi hal yang sangat penting karena kegagalan fungsi dari MCB dapat menimbulkan kebakaran. MCB memiliki kapasitas arus yang kecil, hanya sampai 63 Amps. MCB mempunyai *Trip Level*, *Trip Level* adalah batas ambang arus yang melewati CB yang menyebabkan CB itu untuk *switch off*. Jumlah arus yang melebihi jumlah sebenarnya adalah hal yang sering menyebabkan kebakaran pada bangunan, sehingga CB penting untuk berfungsi dengan baik. Pada MCB listrik, *Trip Level* tidak bisa diatur.

Interrupting Capacity adalah batas arus yang melewati CB sebelum CB tersebut rusak. Jika arus melewati lebih dari batas *interrupting Capacity*, maka CB tidak akan berfungsi. MCB nilai yang rendah dibawah MCCB. MCB diperuntukan pemakaian rumahan atau komersil (se.com, 2019).

2. MCCB (*Molded Case Circuit Breaker*)

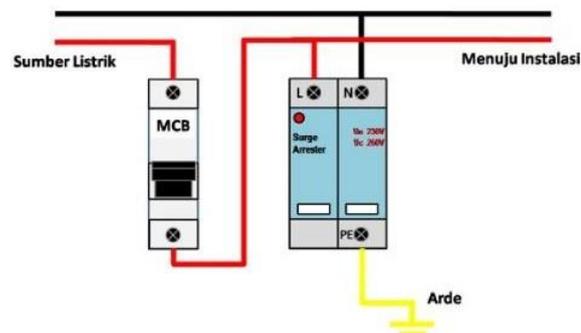


Gambar 2. 19 Instalasi MCCB (etechnog,2021)

MCCB memiliki fungsi yang sama dengan MCB, tetapi memiliki perbedaan

dalam spesifikasinya yaitu kapasitas rating arus yang mencapai 1000 Amps c yang cocok untuk penggunaan industri, *Trip level* yang dapat diatur sesuai kebutuhan, *Interrupting capacity* MCCB memiliki nilai yang lebih tinggi daripada MCB, MCCB memiliki kemampuan untuk berfungsi *under voltage trip* (ketika tegangan lebih rendah dari batas yang ditentukan) dan *shunt trip* (dapat memutus arus dari sumber eksternal, bukan hanya melebihi arus yang diperolehkan) (se.com, 2019).

3. Surge Arrester



Gambar 2. 20 instalasi surge arrester (rahmad azly, 2018)

Surge Arrester berfungsi sebagai alat pelindung dari lonjakan arus dan kondisi tegangan lebih yang dipasang pada jaringan listrik. Alat ini melindungi apabila terjadi lonjakan tegangan listrik melebihi batas yang telah ditentukan dengan membelokkan tegangan tersebut ke grounding. Pada umumnya terjadi akibat sambaran petir. Adapun penyebab lainnya adanya lonjakan tegangan listrik secara tiba – tiba yaitu permasalahan pada pembangkit listrik, terjadi korsleting, lonjakan pada switching, dan lain sebagainya. Cara kerja surge arrester yaitu ketika tegangan listrik mengalir dengan normal, arrester tidak bekerja. Alat ini hanya dapat bekerja ketika ada lonjakan tegangan listrik yang terjadi tiba-tiba. Ketika ada

lonjakan tegangan arus listrik yang besar pada jaringan kabel listrik, sisi kutub anoda arrester akan langsung melepaskan lonjakan tegangan listrik ke arah katode yang terhubung dengan grounding (stellamariscollege, 2022).

2.5.6 kWh Meter Exim

Fungsi dari kWh meter exim sebenarnya sama dengan kWh meter biasa milik PLN. Fungsi tambahannya adalah dapat membaca kWh yang diimpor dari PLTS ke PLN. Dengan cara ini, pengurangan tagihan listrik pelanggan yang memiliki PLTS dapat dihitung, yang biasa disebut dengan sistem Net Metering. Net Metering adalah sistem pelayanan yang dapat mentransmisikan kelebihan daya yang dihasilkan oleh PLTS ke jaringan distribusi PLN. Berdasarkan Peraturan Menteri ESDM Nomor 49 Tahun 2018 pada Bab III Pasal 6 Ayat 1, mengatakan bahwa untuk energi listrik pada pelanggan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Atap diekspor dan dihitung berdasarkan nilai kWh ekspor yang tercatat pada kWh-Exim dikali dengan 65% (ESDM, 2019).

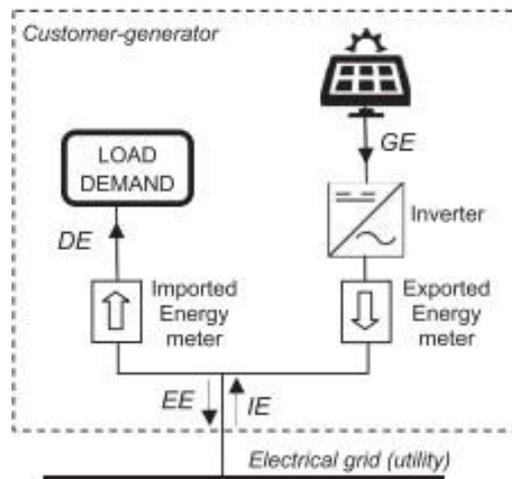


Gambar 2. 21 KWH EXIM (ingenu,2021)

PLN tidak menghalangi konsumen yang ingin memasang PLTS, hal ini juga

telah dikuatkan dengan adanya regulasi tentang net metering oleh PLN. Namun perlu diketahui dalam memasang PLTS harus disesuaikan dengan kebutuhan agar tidak mengenai rekening minimum PLN. Keberadaan net metering mengacu pada regulasi:

1. Peraturan Direksi PLN 0733.K/DIR/2013, 19 November 2013 tentang Pemanfaatan Energi Listrik dari Fotovoltaik oleh Pelanggan.
2. SPLN D5.005-1:2015, 13 Mei 2016 yaitu Persyaratan Teknik Interkoneksi Sistem Photovoltaic (PV) pada jaringan distribusi tegangan rendah (JTR) dengan kapasitas hingga 30 kWp. (ESDM, 2019)



Gambar 2. 22 skema pengukuran export import (Dufo-López & Bernal-Agustín, 2015)

Berdasarkan Gambar 2.22 terdapat beberapa penjelasan yaitu:

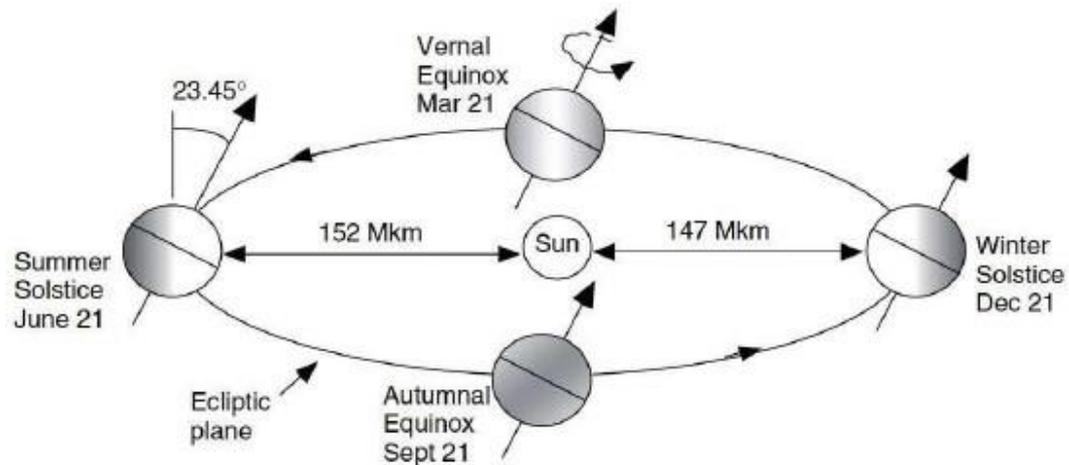
1. Pengukuran bersih (sederhana): ada meteran dua arah untuk mengukur perbedaan antara IE dan EE selama periode penagihan (biasanya satu atau dua bulan).
 - a. Jika $IE - EE > 0$: pembangkit pelanggan harus membayar utilitas untuk perbedaan.

- b. Jika $IE \leq EE$: generator pelanggan tidak menerima kompensasi.
2. Pengukuran bersih dengan pembelian kembali: jika $IE - EE < 0$ pembangkit pelanggan dibayar untuk kelebihan energi ($EE - IE$) yang dihasilkan selama periode penagihan, yang dapat dinilai di bawah tarif eceran (Biasanya menghindari biaya pembangkitan, yaitu tarif grosir atau biaya utilitas), tarif eceran, atau di atas tarif eceran.
3. Pengukuran bersih dengan kredit bergulir: periode perbankan diperpanjang selama periode penagihan (biasanya satu tahun). Jika selama penagihan periode ada kelebihan energi ($IE - EE < 0$), nilai ini ($EE - IE$) adalah digunakan sebagai kredit untuk mengurangi tagihan di periode penagihan mendatang.
4. Pengukuran bersih dengan kredit bergulir dan pembelian kembali: kombinasi dari 2 dan 3 (Dufo-López & Bernal-Agustín, 2015).

2.6 Orientasi matahari terhadap pv dan efek Kemiringan Permukaan PV

2.6.1 Orbit bumi

Orbit bumi terhadap matahari membentuk bidang elips dalam sekali revolusi bernilai 365,25 hari. Nyatanya tingkat elips orbit bumi kecil dan bisa dikatakan hampir mendekati bentuk bulat melingkar. Titik terdekat antara bumi dan matahari terjadi pada tanggal 2 Januari dengan nilai 147 juta kilometer. Titik terjauh terjadi pada tanggal 3 Juli dengan jarak sekitar 152 juta kilometer terhadap matahari.



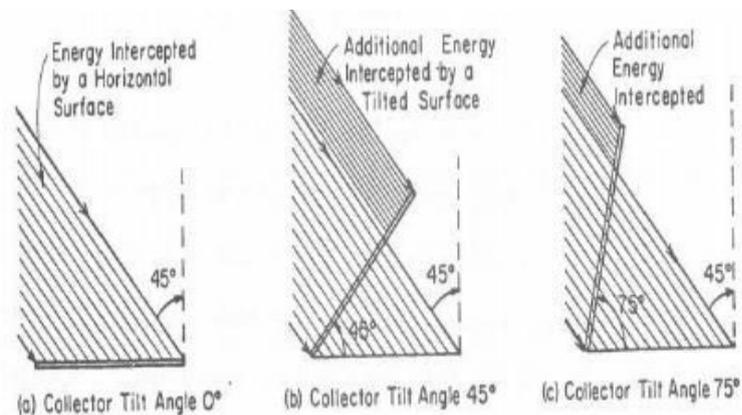
Gambar 2. 1 sudut putar bumi terhadap orbit (Gilbert M. Masters,2013)

Setiap hari bumi berputar pada sumbunya seraya melakukan orbit sepanjang elips. Seperti gambar 2.1 dimana sepanjang bidang orbit bumi disebut bidang eliptik. Bumi berputar dengan kemiringan 23.45° terhadap bidang edar dengan sudut kemiringan tersebut. Hal ini yang menyebabkan pergantian musim dimana saat 21 maret dan 21 september garis dari pusat ke matahari ke bumi melewati equator diseluruh bagian bumi sehingga terjadi pola equinok, dimana terjadi kesetaraan waktu antara siang dan malam yaitu 12 jam. Pada tanggal 21 desember musim dingin terjadi di utara bumi, dimana kemiringan kutur utara mencapai sudut tertinggi terhadap matahari (23.45°) sementara pada 21 juni terjadi proses sebaliknya (Gilbert M. Masters,2013).

2.6.2 efek kemiringan PV

Efek kemiringan permukaan atau kemiringan modul menjadi faktor penting dalam desain PLTS. Faktor kemiringan mempunyai pengaruh terhadap energi listrik yang dihasilkan. Desain yang dilakukan sebisa mungkin selalu tegak lurus dengan arah datangnya matahari. Sehingga perlu dilakukan perhitungan sudut kemiringan yang efektif dalam melakukan desain sistem PLTS. Usaha yang selama

ini dilakukan adalah mengupayakan modul PV agar selalu mengikuti cahaya matahari yang datang, hal ini biasa disebut dengan tracking. Tracking dapat dilakukan namun dalam prakteknya tidak memungkinkan digunakan pada sistem skala besar.



Gambar 2. 23 Efek Kemiringan Modul Surya (Karaki S, 1978)

Karena alasan inilah, upaya yang bisa dilakukan untuk memaksimalkan cahaya matahari yang diterima adalah dengan mengatur sudut penerimaan modul terhadap matahari berdasarkan data intensitas radiasi matahari setiap bulan. Untuk bulan Oktober hingga Maret, sudut datang matahari bervariasi antara 5° hingga 23° dibawah garis putus-putus pada sudut tegak lurus terhadap lokasi lintang. Untuk memaksimalkan selama musim panas kemiringan sudut modul PV diatur lebih besar 15° (Abdul Kodir Albahar, 2020).

Terdapat beberapa parameter sudut – sudut yang penting dalam menentukan posisi matahari yaitu:

- 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 posisi matahari saat solar noon (ketika

matahari berada tepat di atas posisi lokal suatu daerah) terhadap garis ekuator/khatulistiwa, yang bernilai positif untuk saat matahari di wilayah utara, ($- 23,45^\circ \leq \delta \leq 23,45^\circ$).

- c. Sudut tilt/slope (β), merupakan sudut kemiringan suatu bidang terhadap garis horizontal, ($0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$) (Ilham Lubis, 2018).
- d. Sudut elevasi (α), merupakan 0° pada saat matahari terbit dan 90° saat matahari berada tepat di atas kepala.

Terdapat beberapa persamaan untuk menentukan sudut bidang miring terhadap radiasi matahari. Persamaan 1 menunjukkan sudut deklinasi (δ) dari matahari di permukaan bumi sebagai fungsi dari n (urutan hari dari 1 Januari).

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

Pengaturan kemiringan terdapat di persamaan 2 yang didasarkan pada koordinat garis lintang wilayah tersebut atau sudut latitude (ϕ) dan sudut deklinasi (δ) matahari pada saat itu (Bayu Sutanto, 2021).

Meskipun sudut deklinasi (δ) merupakan fungsi dari hari (persamaan 2.1), namun pengaturan sudut tilt/slope (β) dapat dilakukan dengan hanya mengambil nilai hari pada pertengahan bulan (misalnya pada tanggal 15).

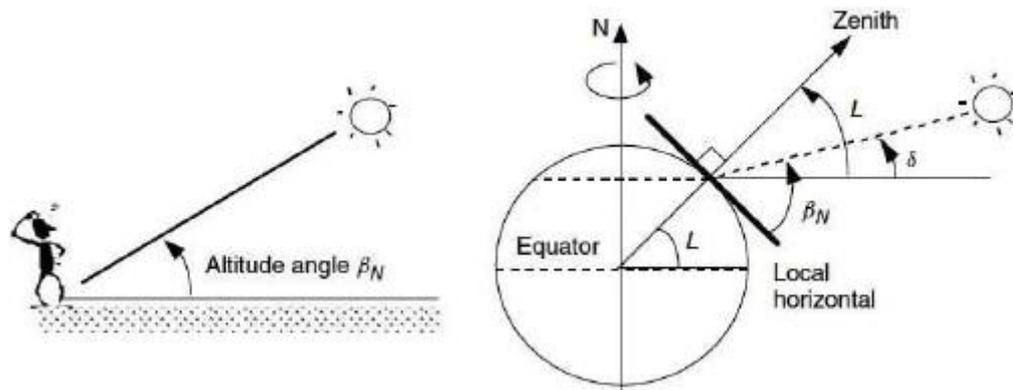
$$\beta = |\phi - \delta| \quad (2.2)$$

Dimana:

β = Sudut *tilt/slope*

ϕ = Sudut *latitude* lokasi penempatan PLTS

δ = Sudut deklinasi



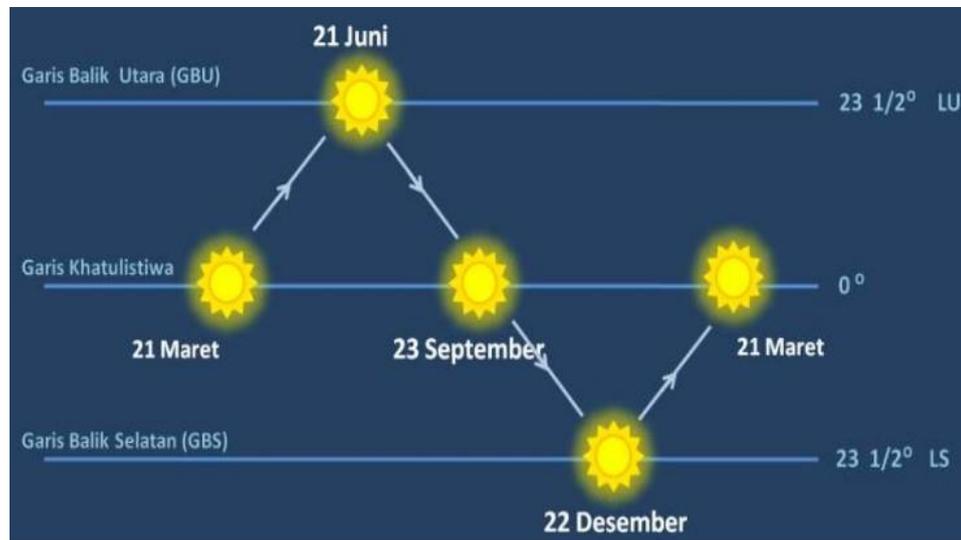
Gambar 2. 2 *altitude angle* saat matahari siang hari (Gilbert M. Masters,2013)

2.6.3 Jalur matahari (*sun path*)

Pergeseran sudut optimum panel surya dipengaruhi oleh pergerakan matahari dilangit, yang ikut mempengaruhi sudut kemiringan panel surya sehingga perubahan tersebut ikut mempengaruhi terhadap penerimaan jumlah radiasi matahari pada panel surya. Jumlah radiasi langsung dengan posisi datang tegak lurus terhadap panel atau membentuk sudut 90° . Saat jalur pergerakan matahari berada di sebelah utara bumi, maka panel harus diarahkan ke utara dan saat itu bernilai positif. Saat jalur pergerakan matahari berada dibelahan selatan bumi, maka panel menghadap ke selatan, dan bernilai negatif seperti pada gambar 2.3 (Duffie J,2014).

Dengan memahami jalur pergerakan matahari kita juga dapat menentukan pola bayangan yang akan terjadi pada benda, sehingga dalam perencanaan instalasi panel surya, hal ini juga harus diperhatikan. Bila bayangan yang akan terjadi menghalangi permukaan panel, maka posisi permukaan panel dapat dipindahkan dari sumber bayangan didepannya. Analisa bayangan perlu dilakukan dengan

rentang waktu selama 12 bulan, atau masa satu tahun (Gilbert M. Masters ,2013).



Gambar 2. 3 posisi jalur matahari dalam waktu satu tahun (Duffie J,2013)

2.7 Efek partial shading pada PV

Partial shading terjadi ketika modul PV menerima radiasi matahari yang berbeda- beda akibat perubahan cuaca lokal atau keadaan lingkungan sekitar sehingga PV tertutup oleh awan, bayangan bangunan atau pepohonan. Kondisi ini menyebabkan daya keluaran dari PV array menurun. Berdasarkan kurva PV, Partial shading menimbulkan efek langsung yang dihasilkan sehingga penurunan tegangan atau arus menyebabkan penurunan daya keluaran dari PV (Sundareswaran et al., 2014).

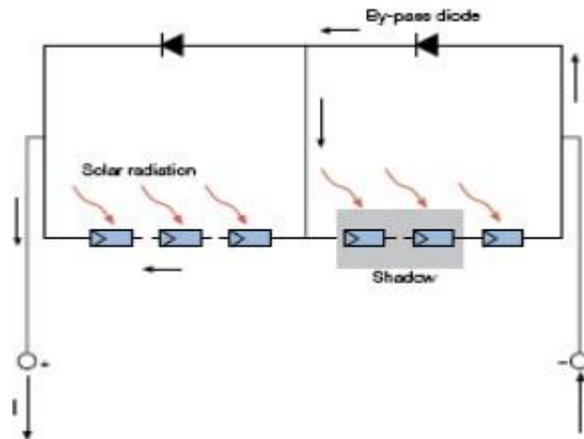
Efek *partial shading* dapat mengakibatkan penurunan keluaran daya yang dihasilkan sebesar 88% dari total daya jika panel sel surya tertutup total. Untuk mencegah *partial shading*, perencanaan PLTS Terapung situ gede diletakkan di area permukaan air yang cukup terbuka sehingga potensi terjadinya efek bayangan terhadap sistem dapat di minimalisir (Sri Aprillia et al., 2019).

Tabel dibawah ini menunjukkan efek yang sangat ekstrim oleh *effect shading* pada satu sel dari modul panel surya single crystalline yang tidak memiliki internal bypass diode. Untuk mengatasi hal tersebut solar cell panel dipasang bypass diode, bypass diode untuk arus mengalir ke satu arah, mencegah silicon terkena bayangan (Wiranda, 2015).

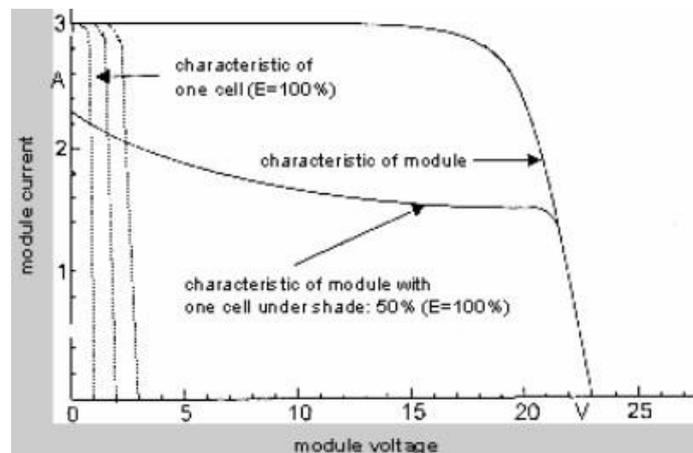
Persentase dari bayangan pada satu sel	Pesentase dari loss solar panel modul
0%	0%
25%	55%
50%	50%
75%	66%
100%	75%
3 sel terkena bayangan	93

Gambar 2. 24 Persentase Pengaruh Shading (Wiranda, 2015)

Dalam kasus bayangan, sel PV terdiri dari persimpangan P-N berhenti menghasilkan energi dan menjadi pasif beban. Sel ini berperilaku sebagai dioda yang memblokir saat di produksi oleh sel-sel lain yang terhubung secara seri dengan demikian membahayakan seluruh produksi modul. Apalagi dioda tunduk pada tegangan yang lain sel-sel yang dapat menyebabkan perforasi persimpangan karena terlalu panas lokal (hot spot) dan kerusakan pada modul. Untuk menghindari itu satu atau lebih sel yang diarsir menggagalkan produksi seluruh string, beberapa dioda yang by-pass bagian modul yang teduh atau rusak dimasukkan pada tingkat modul. Dengan demikian fungsi modul adalah dijamin walaupun dengan efisiensi berkurang. Secara teori itu akan diperlukan untuk memasukkan dioda by-pass secara paralel untuk setiap sel tunggal, tetapi ini akan terlalu berat untuk rasio biaya/manfaat. Oleh karena itu 2 ÷ 4 dioda bypass adalah biasanya dipasang untuk setiap modul (Gambar 2.25) (ABB, 2010).



Gambar 2. 25 Efek Bayangan (ABB, 2010)



Gambar 2. 26 Karakteristik Arus-Tegangan Akibat Effect Shading (Wiranda, 2015)

Masalah yang umum timbul akibat efek bayangan antara lain:

- Berkurangnya luasan daya dari keluaran daya nominal, karena isolasi berkurang sehingga photo-current dari matahari pun berkurang. Arus tiap sel menurun, karena sel disusun secara seri.
- Stress akibat panas yang tidak merata pada permukaan modul akan meningkatkan suhu pada sel secara dramatis (hotspot), sehingga timbul overheating pada sel-sel tertentu (Wiranda, 2015).

2.8 Faktor pengoperasian Sel Surya

Pengoperasian maksimum sel surya sangat tergantung pada 2 faktor yaitu ambient air temperature dan radiasi solar matahari. Penjelasan tentang kedua faktor pengoperasian sel surya adalah sebagai berikut ini:

- a. Ambient air temperature Sel surya dapat beroperasi secara maksimum jika temperatur sel tetap normal (pada 25 derajat Celsius), kenaikan temperatur lebih tinggi dari temperature normal pada PV sel akan melemahkan voltage (Voc). Kenaikan temperatur sel surya 1 derajat celsius (dari 25 derajat) akan berkurang sekitar 0,5 % pada total tenaga yang dihasilkan atau akan melemah 2x lipat untuk kenaikan temperatur sel per 1 derajat C (Hurley, 2000).
- b. Cuaca berpengaruh pada suhu lingkungan. Menurut BMKG pada saat cuaca cerah pada siang hari pukul 10.00 WIB – 14.00 suhu lingkungan berkisar antara 30°C - 34°C. Cuaca mendung pada siang hari pukul 10.00 WIB – 14.00 WIB suhu lingkungan berkisar antara 28°C – 30°C. Cuaca buruk atau hujan suhu lingkungan relatif lebih rendah berkisar antara 26°C - 29°C pada pukul 10.00 WIB – 14.00 WIB.
- c. Radiasi solar matahari (insolation) Radiasi solar matahari di bumi dan berbagai lokasi bervariasi dan sangat tergantung keadaan spektrum solar ke bumi. Insolation solar matahari akan banyak berpengaruh pada current (I) sedikit pada volt (Hurley, 2000).

2.9 Floating Solar Photovoltaic (FSPV)

Floating solar Photovoltaic adalah konsep instalasi PLTS yang memanfaatkan badan air menggunakan teknologi apung. Floating Solar

Photovoltaic adalah kombinasi teknologi photovoltaic dan teknologi apung yang menghasilkan pembangkit listrik.

FSPV adalah ide baru pada produksi energi terbarukan tanpa menambah beban pada sumber daya air dan tanah. FSPV memiliki temperature ambien lebih rendah untuk efek pendinginan air karena di pasang di atas air, akibatnya efisiensi panel surya terapung adalah 11% lebih tinggi dibandingkan dengan panel surya yang dipasang di tanah (Gotmare & Prayagi, n.d.).

2.10 Perancangan Teknologi Floating PV

Perancangan teknologi Photovoltaic terapung terdapat beberapa langkah yaitu komponen tambahan, konstruksi floater, menghitung kapasitas PLTS, perhitungan daya dan perhitungan jumlah panel surya yang diperlukan. Penjelasan langkah – langkah perancangan teknologi PV adalah sebagai berikut ini.

2.10.1 komponen tambahan pada floating pv

Beberapa komponen – komponen utama pada PLTS terapung (*Floating PV*) yaitu:

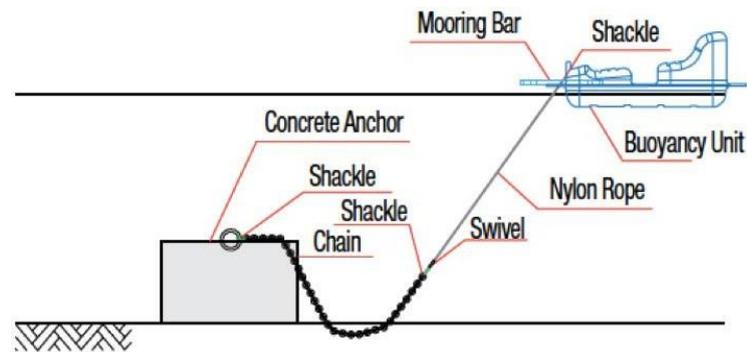
- a. Poonton / Struktur apung adalah alat pelampung dengan daya apung yang cukup untuk mengapung dengan sendirinya maupun dengan beban yang berat. Platform ini dirancang untuk menampung jumlah modul yang sesuai dalam kombinasi paralel seri sesuai dengan kebutuhan dan ketersediaan ruang.
- b. *Mooring System* / Sistem penambatan adalah sistem tambatan permanen pada struktur terapung dapat diamankan. Sistem tambatan berfungsi untuk mencengah gerakan bebas struktur apung diatas air. Sistem penambatan jangar memperbaiki posisi struktur yanf relative terhadap dasar bidang air di suatu titik.

- c. Solar modul. Sebuah Solar modul hanya dapat menghasilkan jumlah daya yang terbatas, umumnya instalasi berisi beberapa modul. Sebagian besar modul Crystalline solar PV digunakan untuk Floating solar sistem.
- d. Kabel. Dalam pembanguna Floating Solar sistem kabel bawah air untuk menstransmisikan listrik melalui bawah air, sehingga dibutuhkan kabel yang tahan air.

2.10.2 Sistem penjangkaran

Skema sistem penjangkaran Floating PV dibagi menjadi 2 jenis yaitu tipe structural dan tipe all in one buoyancy. Perbedaan diantara keduanya terlihat pada struktur apung yang digunakan. Tipe struktur memanfaatkan kerangka logam tahan karat sebagai dudukan modul PV dan modul apung menggunakan tangki yang di dalamnya diisi dengan Styrofoam sebagai antisipasi jika tangki mengalami kebocoran. Tipe struktur mampu mengakomodasi kedalaman tambat hingga 60 m. Sedangkan Tipe all in one buoyancy memanfaatkan platform buoyancy yang sudah terintegrasi dengan dudukan modul PV. Tipe all in one buoyancy lebih mudah dalam proses pemasangan dan perawatan. Tipe all in one buoyancy mampu mengakomodasi kedalaman tambat hingga 20 m. Struktur sistem penjangkaran dengan tipe all in one buoyancy terdiri dari:

1. Modul apung utama sebagai dudukan modul PV
2. Modul apung sekunder untuk memfasilitasi proses perawatan
3. Rel pemandu untuk mengunci posisi modul PV
4. Titik penyambungan dan pengunci untuk menghubungkan modul apung satudengan yang lain (Sujay et al., 2017).

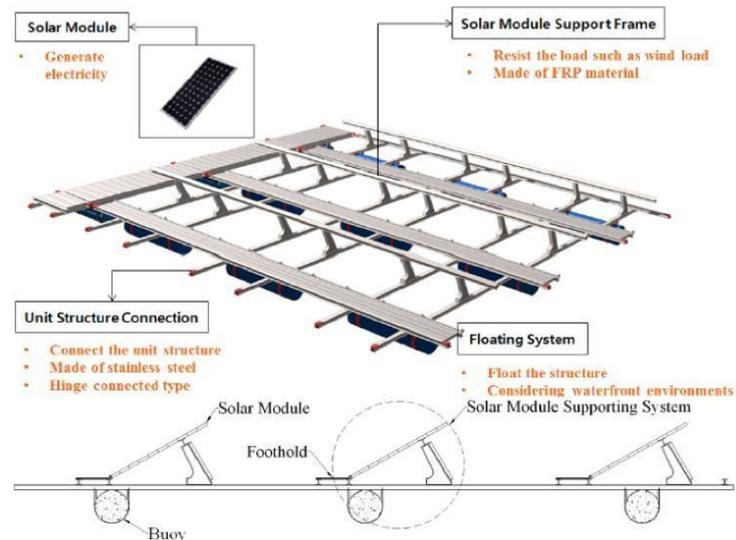


Gambar 2. 27 Konstruksi sistem penjangkaran (Sujay et al., 2017)

Komponen sistem penjangkaran terdiri:

1. Jangkar beton
2. Rantai tahan karat
3. Lengan ayun
4. Tali jerat nylon
5. Shackle
6. Mooring bar

Struktur setiap unit apung unit terdiri dari modul surya, sistem struktural untuk menopang modul PV (yang terdiri atas komponen penyusun struktur utama), sistem apung, dan perangkat penghubung.



Gambar 2. 28 Desain Struktur Unit Apung (Sahu et al., 2016)

Komponen penyusun struktur Solar Floating dikategorikan menjadi komponen vertikal, komponen penopang, komponen penyambung, komponen pijakan dan komponen utama. Semua komponen struktur dihubungkan menggunakan baut stainless steel (Sahu et al., 2016).

2.10.3 Perhitungan perancangan Floating PV

A. Perhitungan Potensi Energi dari Modul Surya

Perhitungan pertama dilakukan dengan menghitung jumlah modul panel surya yang digunakan, hal ini dapat dihitung menggunakan persamaan 2.6 (Gardini Lambang Purbaya, 2019).

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

Selanjutnya dilakukan perhitungan inverter yang digunakan di persamaan 2.7

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

Keterangan :

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

Daya (Watt Peak) yang dibangkitkan PLTS untuk memenuhi kebutuhan energi, diperhitungkan dengan persamaan – persamaan berikut

B. Perhitungan Densitas Energi Matahari dan keluaran panel surya

Densitas energi matahari adalah perbandingan antara rata – rata daya dengan luasan proyeksi tempat instalasi. Perhitungan densitas energi matahari menggunakan persamaan 2.8

$$\rho = \frac{E}{S} = \frac{\text{Rata – rata daya}}{\text{Luas lahan}} \quad (2.8)$$

Perhitungan keluaran panel surya menggunakan persamaan 2.9 :

$$P_{pv} = f_{pv} y_{pv} \text{ PSH}$$

Keterangan :

P_{pv} = Keluaran pada PV (kWh/d)

f_{pv} = Pv derating factor (0,7-0,85)

y_{pv} = Daya PV array (kW)

PSH = Peak Sun Hour (jam)

C. Perhitungan Jumlah Rangkaian Modul Surya

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 2.8, 2.9 dan 2.10 (Gardini Lambang Purbaya, 2019).

1. Rangkaian seri

$$\text{Min. modul per Array} = \frac{V_{DC \text{ Max}}}{V_{OC}} \quad (2.8)$$

$$\text{Max. modul per Array} = \frac{V_{DC \text{ Min}}}{V_{mpp}} \quad (2.9)$$

2. Rangkaian paralel

$$\text{Min. modul Paralel per Array} = \frac{I_{DC \text{ Min}}}{V_{sc}} \quad (2.10)$$

Keterangan :

$V_{DC \text{ Max}}$ = Tenggangan maksimum DC di inverter (Volt)

$V_{DC \text{ Min}}$ = Tenggangan minimum DC di inverter (Volt)

$I_{DC \text{ Max}}$ = Arus maksimum DC di inverter (Ampere)

$I_{DC \text{ Min}}$ = Arus minimum DC di inverter (Ampere)

V_{OC} = Tenggangan *open circuit* di modul surya (Volt)

V_{mpp} = Tenggangan mpp di modul surya (Ampere)

I_{sc} = Arus mpp di modul surya (Ampere)

I_{Mpp} = Arus mpp di modul surya (Ampere)

D. Perhitungan Area Array

Perhitungan area Array (PV area) menggunakan persamaan 2.11 dan 2.12 (Gardini Lambang Purbaya, 2019).

$$L = (N \times L_{mod}) + (N - 1) \times C \quad (2.11)$$

$$W = (R \times W_{mod}) + (R - W_{mod}) + (R - 1) \times C \quad (2.12)$$

Keterangan :

L	= Panjang area panel surya / <i>string</i> (meter)
W	= Lebar area panel surya / <i>string</i> (meter)
L_{mod}	= Panjang panel surya (meter)
W_{mod}	= Lebar panel surya (meter)
N	= Jumlah panel surya (di rangkai seri)
R	= Jumlah baris (jumlah rangkaian paralel per <i>string</i>)
C	= Jarak antara masing – masing modul ($C = 0.02$ meter)

Sehingga untuk menghitung area total dari panel dikalikan dengan jumlah *string*nyadan jarak per masing-masing *string*. Jarak masing-masing *string* dapat dihitung dengan persamaan 2.13(Gardini Lambang Purbaya, 2019).

$$d = W \times \left(\cos\alpha + \frac{\sin\alpha}{\tan\beta} \right) \quad (2.13)$$

Keterangan :

W	= Lebar modul (meter)
α	= Sudut kemiringan modul
β	= 66.56 – garis lintang

E. Menghitung *Losses*

Perencanaan PLTS harus memperhitungkan *losses* yang ada pada panel surya (penggunaan panel surya berkapasitas 100 Wp tidak diterima diinverter sebesar 100 Wp karena dipengaruhi *losses* temperatur, jenis modul, kotoran pada panel surya, *shading* dan sebagainya)(Gardini Lambang Purbaya, 2019).

Perhitungan daya yang dihasilkan energi dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini.

$$P_{mod} = P_{manufacture} \times \eta_{PV} \times \Delta_{losses\ pv} \quad (2.14)$$

$$P_{PSH} = P_{mod} \times \text{Jumlah modul} \times PSH \quad (2.15)$$

$$E_y = [P(PSH) \times \text{Losses System} \times \text{efisiensi Inverter}] \times 365 \text{ hari} \quad (2.16)$$

$$SY = \frac{E_{sys}}{P_{Array_STC}} \quad (2.17)$$

Keterangan :

P_{Mod} = Daya yang di hasilkan yang masuk ke inverter, W

$P_{manufacture}$ = Daya berdasarkan spesifikasi modul, W

η_{PV} = Efisiensi berdasarkan spesifikasi

$\Delta_{losses\ PV}$ = Losses yang terjadi di PV

P_{PSH} = Daya yang dihasilkan pada saat PSH, W

P_{Mod} = Daya modul , W

PSH = Peak sun Hours 9 jam puncak untuk memperoleh radiasi
1000W/m²

E_y = Energi Sistem

SY = Specifik energi yang di hasilkan per tahun, Wh/Wp

E_{sys} = Energi yang dihasilkan / tahun, Wh/tahun

P_{array_STC} = Daya yang dihasilkan PV saat (STC), W

F. Menentukan *Performance Ratio (PR)*

Setelah mengetahui *energy specific yield* (daya *input* dari panel surya dikalikan dengan PSH (*Peak Sun Hours*) dikurangi dengan semua *losses* kemudian hasilnya dikalikan dengan 365 hari , sehingga dapat mengetahui energi yang dihasilkan selama satu tahun. *Performance ratio* dapat dihitung menggunakan persamaan 2.18(Gardini Lambang Purbaya, 2019).

$$PR = \frac{E_{sys}}{E_{ideal}} \quad (2.18)$$

$$E_{ideal} = P_{array_STC} \times H_{tilt} \quad (2.19)$$

Keterangan :

PR = Performance ratio (%)

E_{ideal} = Energi yang diperoleh dari PV pada saat PSH, Wh

H_{tilt} = Rata-rata radiasi harian, h

Untuk menghitung total daya pada PLTS menggunakan persamaan 2.20

$$Energy\ output\ PV = P_i \times PSH \quad (2.20)$$

P_i = Hasil keluaran daya

PSH = Radiasi matahari

2.11 Software Helioscope

Helioscope merupakan sebuah program berbasis web yang diperkenalkan oleh Folsom Labs yang memungkinkan para insinyur untuk melakukan simulasi lengkap perencanaan berupa tampilan 3D sehingga mampu mengetahui potensi shading ataupun performa masing – masing panel yang akan di tempatkan di berbagai bidang posisi.

Prinsip kerja dari simulasi ini menggunakan data input berupa spesifikasi teknis PLTS seperti teknologi Modul surya, jenis inverter, jumlah dan jenis modul yang akan digunakan, dan luas area PLTS, sedangkan data lokasi PLTS mencakup koordinat, lingkungan sekitar situ gede dan data meteorologi pada situ gede.