

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

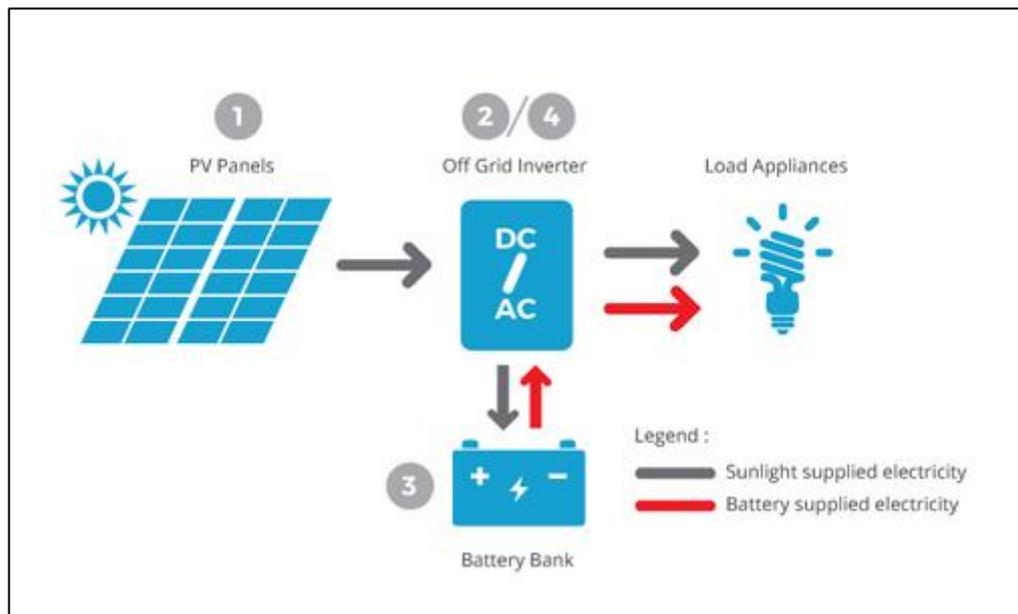
Berdasarkan SNI 8395:2017, PLTS adalah sistem pembangkit listrik yang bersumber dari radiasi matahari, melalui konversi sel fotovoltaik. Sistem fotovoltaik mengubah radiasi sinar matahari menjadi listrik. Semakin tinggi intensitas radiasi matahari yang mengenai sel fotovoltaik, semakin tinggi daya listrik yang dihasilkannya. Dengan kondisi penyinaran matahari di Indonesia yang terletak di daerah tropis dan berada di garis khatulistiwa, PLTS menjadi salah satu teknologi penyediaan tenaga listrik yang potensial untuk diaplikasikan.

PLTS dapat diaplikasikan melalui berbagai bentuk instalasi, dengan konfigurasi system terpusat ataupun tersebar, dimana masing-masing aplikasi tersebut dapat bersifat *on-grid* maupun *off-grid*. Perbedaan kedua sistem tersebut adalah sebagai berikut :

1. Sistem PLTS *off-grid*

Off Grid atau disebut juga stand alone PV (*photovoltaic*) system atau sistem pembangkit listrik yang hanya mengandalkan energi matahari sebagai satu-satunya sumber energi utama dengan menggunakan rangkaian panel surya untuk menghasilkan energi listrik sesuai kebutuhan. Off Grid bersifat mandiri, adapun tipe solar sistem untuk hunian yang menggunakan baterai hanyalah sebagai media penyimpanan atau bank energi. Pada sistem Off Grid, kapasitas baterai harus memperhitungkan cadangan jika kondisi cuaca buruk yang berakibat pada produksi energi sinar matahari kurang optimal. Cara kerja off grid secara singkat adalah

ketika listrik dihasilkan, maka dapat langsung digunakan ke peralatan elektronik, atau jika tidak digunakan maka disimpan dalam baterai/aki. Bisa juga sebagian listrik digunakan dan apabila ada kelebihan daya maka kelebihannya akan disimpan untuk digunakan pada malam hari. Untuk mengatur cara kerja sistem panel surya off grid ini membutuhkan alat solar controller.

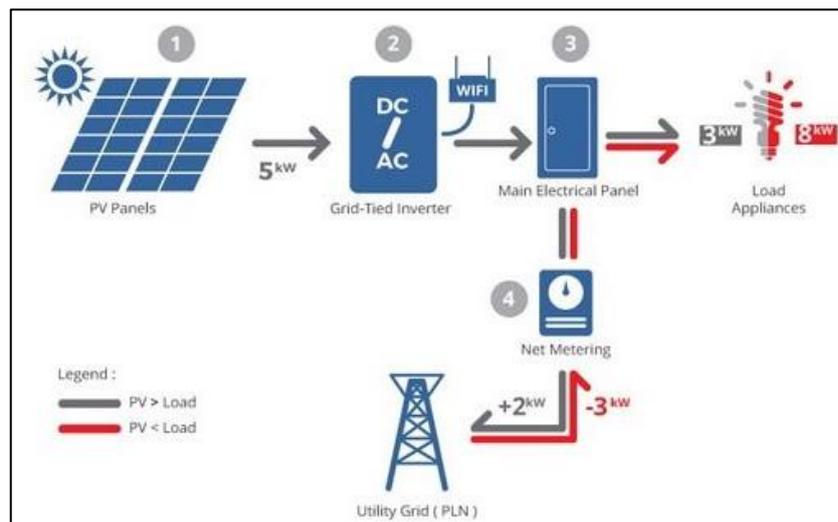


Gambar 2. 1 Skema sistem PLTS *off-grid* (aturrumah. 2021)

2. Sistem PLTS *on-grid*

Sistem On Grid (disebut juga Grid Tie/ Grid Interactive), menggunakan solar panel untuk menghasilkan listrik yang ramah lingkungan dan bebas emisi. Sesuai namanya, rangkaian sistem ini tetap terhubung dengan jaringan PLN dengan mengoptimalkan pemanfaatan energi dari panel surya untuk menghasilkan energi semaksimal mungkin. Dalam sistem On Grid, baterai merupakan hal yang tidak wajib, mengingat tenaga surya bukanlah sumber energi utama. Sesuai namanya, On Grid berarti bekerjasama dengan arus listrik dari PLN. Yakni arus PLN menjadi penghubung atau penyalur arus listrik dari panel surya kepada beban. Sehingga

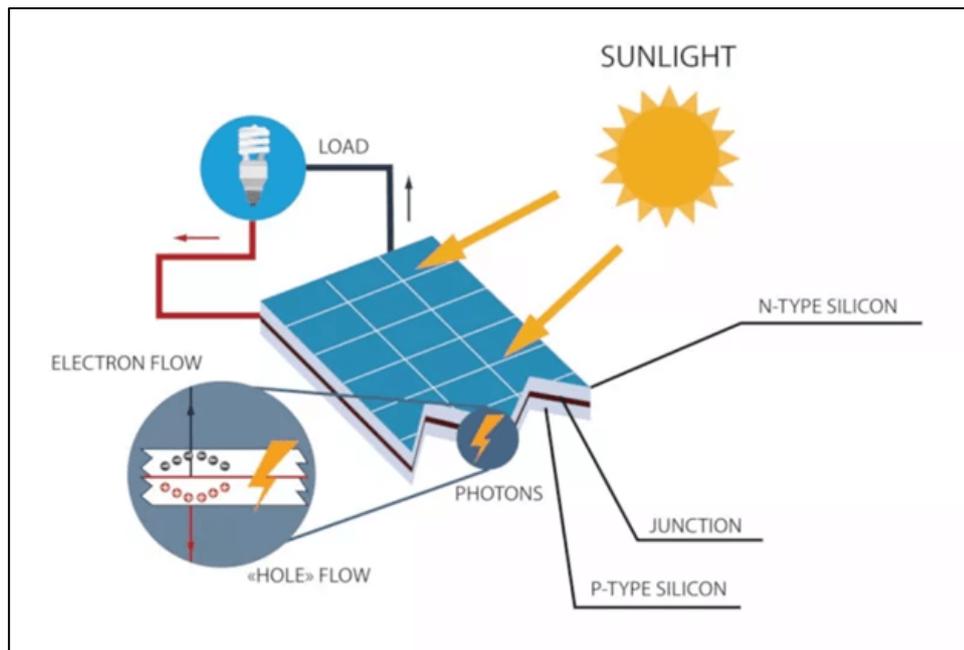
seluruh penggunaan listrik pada waktu siang hari dihasilkan dari energi listrik panel surya. Sedangkan untuk malam hari menggunakan PLN. Prinsip kerja on grid dapat dijalankan dengan sistem kelistrikan PLN. Dalam sistem ini, jaringan listrik PLN berperan sebagai penyalur atau penghubung arus listrik yang berasal dari panel surya yang dialirkan pada beban.(Putri & Meliala, 2020)



Gambar 2. 2 Skema sistem PLTS on-grid (aturrumah. 2021)

2.2 Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *on grid*

Sesuai ketentuan dalam Peraturan Menteri ESDM No.49 tahun 2018, jo. Permen No.13 tahun 2019, jo. Permen No.16 tahun 2019, PLTS atap adalah proses pembangkitan tenaga listrik yang menggunakan modul fotovoltaik, yang diletakkan di atap, dinding, atau bagian lain dari bangunan milik pelanggan PLN. Secara umum PLTS atap memiliki mekanisme dan komponen utama seperti digambarkan pada skema di bawah ini. (Indonesia Clean Energy Development, 2019)



Gambar 2. 3 Mekanisme Sistem PLTS atap (aturrumah,2021)

Penjelasan mekanisme sistem PLTS atap adalah sebagai berikut :

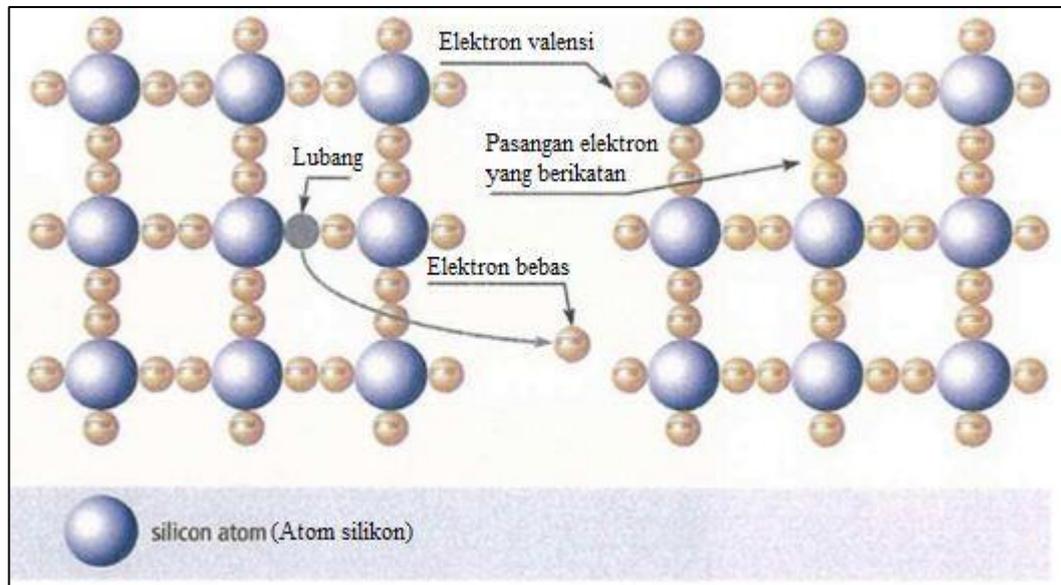
1. Panel surya mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik. Panel surya menghasilkan arus listrik DC.
 2. Arus DC diubah oleh inverter menjadi listrik AC.
 3. Arus AC masuk ke jaringan listrik di dalam rumah melalui AC breaker panel.
 4. Pemakaian energi listrik untuk penerangan atau peralatan elektronik rumah tangga.
 5. Penggunaan kWh meter ekspor impor (exim) dengan menggunakan sistem net metering.
 6. Meter exim akan membaca ekspor listrik dari pelanggan PLTS ke jaringan PLN, dan membaca impor listrik dari jaringan PLN ke pelanggan PLTS.
- (Indonesia Clean Energy Development, 2019)

Sel surya atau juga sering disebut fotovoltaik adalah peralatan yang mampu mengkonversi langsung cahaya matahari menjadi listrik. Sel surya memiliki peran utama untuk memaksimalkan potensi yang sangat besar energi matahari yang sampai ke bumi, walaupun selain dipergunakan melalui radiasinya juga dapat dimaksimalkan energi panasnya melalui sistem solar termal.

Sel surya konvensional bekerja menggunakan prinsip p-n *junction*, yaitu *junction* antara semikonduktor tipe-p dan tipe-n. Semikonduktor ini terdiri dari ikatan-ikatan atom yang dimana terdapat elektron sebagai penyusun dasar. Semikonduktor tipe-n mempunyai kelebihan electron (muatan negatif) sedangkan semikonduktor tipe-p mempunyai kelebihan *hole* (muatan positif) dalam struktur atomnya. Kondisi kelebihan elektron dan *hole* tersebut bisa terjadi dengan mendoping material dengan atom *dopant*. Sebagai contoh untuk mendapatkan material silikon tipe-p, silikon didoping oleh atom boron, sedangkan untuk mendapatkan material silikon tipe-n, silikon didoping oleh atom posfor. Ilustrasi di bawah menggambarkan junction semikonduktor tipe-p dan tipe-n. Peran dari pn junction ini adalah untuk membentuk medan listrik sehingga elektron dan hole bisa diekstrak oleh material kontak untuk menghasilkan listrik.

Ketika semikonduktor tipe-p dan tipe-n terkontak, maka kelebihan elektron akan bergerak dari semikonduktor tipe-n ke tipe-p sehingga membentuk kutub positif pada semikonduktor tipe-n, dan sebaliknya kutub negatif pada semikonduktor tipe-p. Akibat dari elektron dan hole ini maka terbentuk medan listrik ketika cahaya matahari mengenai susunan sambungan p-n maka akan mendorong elektron bergerak dari semikonduktor menuju kontak negatif, yang selanjutnya dimanfaatkan sebagai listrik dan sebaliknya hole bergerak menuju

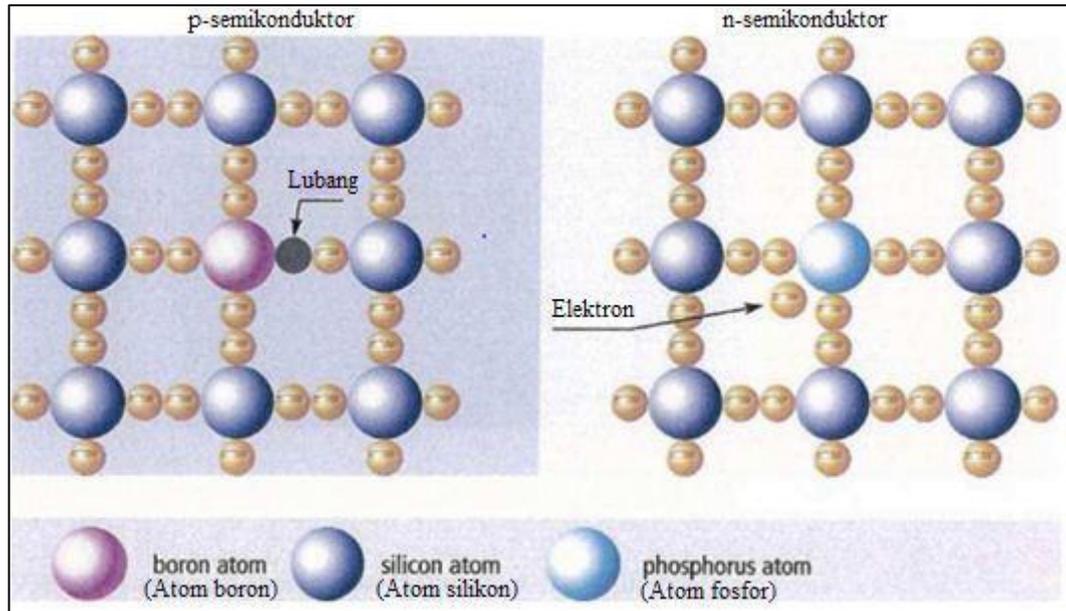
kontak positif menunggu elektron datang, seperti diilustrasikan pada gambar 2.4 di bawah.



Gambar 2. 4 hole bergerak menuju kontak positif menunggu elektron datang

(Romario Hutahaean, 2018)

Konduktivitas intrinsik tidak dapat digunakan untuk menghasilkan listrik. Agar material silikon dapat digunakan untuk menghasilkan energi, pengotoran (doping) sengaja dilakukan ke dalam kisi kristal. Ini dikenal sebagai atom doping. Atom-atom ini memiliki satu elektron lebih (fosfor) atau satu electron kurang (boron) dari silikon di kulit elektron terluarnya. Dengan demikian, atom doping menghasilkan 'atom pengotor' dalam kisi kristal.



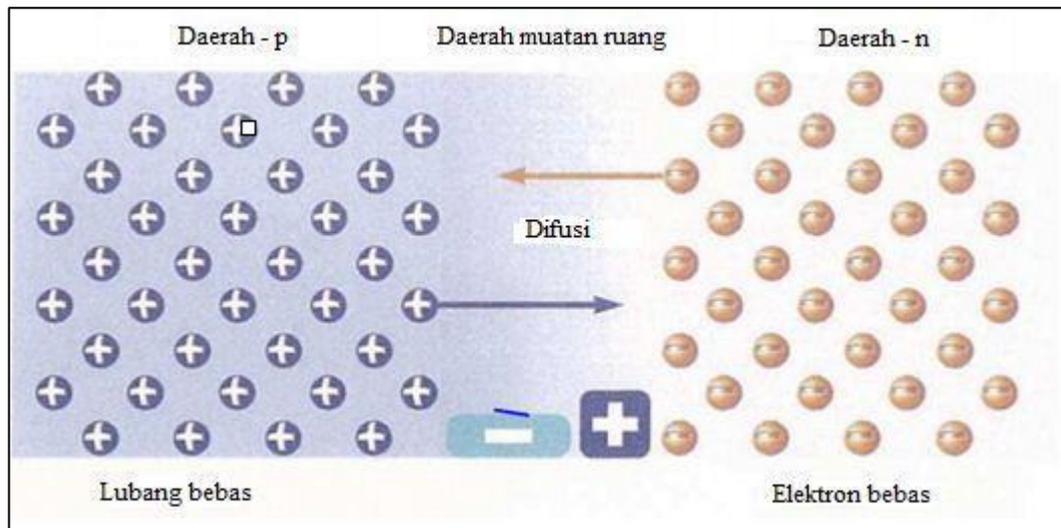
Gambar 2. 5 Konduksi ekstrinsik di dalam silikon dengan doping p dan n

(Romario Hutahaean, 2018)

Dalam Gambar 2.5 memperlihatkan konduksi ekstrinsik di dalam silikon dengan *doping* p dan n. Pada kondisi fosfor sebagai *doping* n, maka ada kelebihan elektron untuk setiap atom fosfor di kisi. Elektron ini dapat bergerak dengan bebas di dalam kristal dan oleh karena itu mengangkut muatan listrik. Dengan boron sebagai *doping* p, maka ada lubang (ikatan elektron yang hilang) untuk setiap atom boron dalam kisi. Elektron dari atom silikon tetangga (terdekat) dapat mengisi lubang ini, menciptakan sebuah lubang (*hole*) baru di tempat lain. Metode konduksi berdasarkan atom *doping* dikenal sebagai konduksi pengotor atau konduksi ekstrinsik. Dengan mempertimbangkan material *doping* p atau n, muatan bebas tidak memiliki arah yang untuk pergerakan mereka.

Jika lapisan semikonduktor dengan *doping* p dan n dibawa bersama, sebuah sambungan p-n (positif-negatif) terbentuk. Pada sambungan (*junction*) ini, elektron yang berlebih dari semikonduktor n berdifusi ke dalam lapisan semikonduktor p. Hal ini menciptakan suatu daerah dengan beberapa pembawa muatan bebas.

Wilayah ini dikenal sebagai daerah muatan ruang. Atom *doping* bermuatan positif tetap di wilayah n dan atom doping bermuatan negatif tetap di wilayah p dalam periode transisi. Medan listrik yang diciptakan berlawanan dengan gerakan pembawa muatan, akibatnya difusi tidak berlanjut terus menerus.

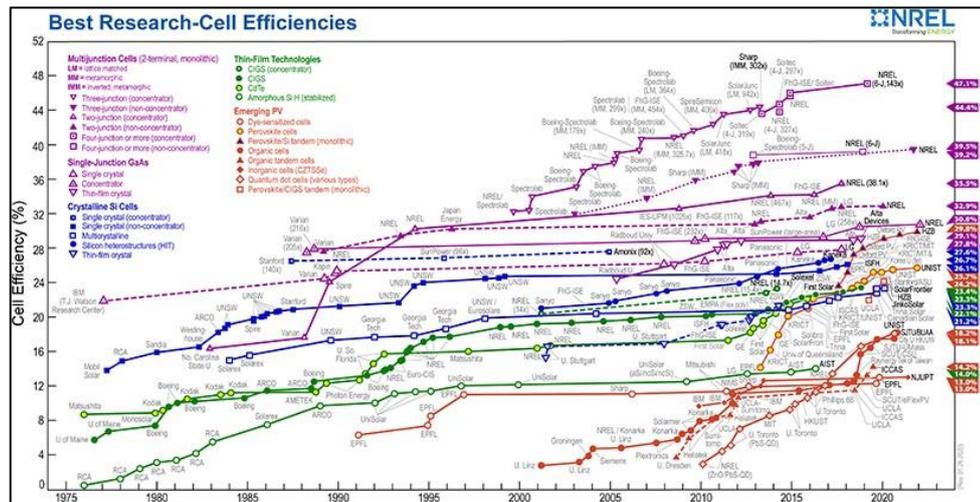


Gambar 2. 6 Daerah ruang muatan sambungan p-n

(Romario Hutahaean, 2018)

Dalam Gambar 2.6 memperlihatkan bentuk daerah ruang muatan pada sambungan p-n. Jika semikonduktor p-n (sel surya) terkena cahaya, foton diserap oleh elektron. Energi yang masuk tersebut memecah ikatan elektron sehingga elektron yang terlepas ditarik melalui medan listrik ke wilayah n. Lubang yang terbentuk bermigrasi dalam arah yang berlawanan ke wilayah p. Proses ini secara keseluruhan disebut efek fotovoltaiik. Penyebaran pembawa muatan ke kontak listrik menyebabkan tegangan timbul pada sel surya. Pada keadaan tanpa beban, tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) timbul pada sel surya. Jika rangkaian listrik tertutup, maka arus listrik akan mengalir. (Romario Hutahaean, 2018)

2.3 Sejarah Perkembangan Efisiensi PV



Gambar 2. 7 Perkembangan studi tentang panel surya dari tahun 1975 sampai 2020 (Hiron et al.,2021)

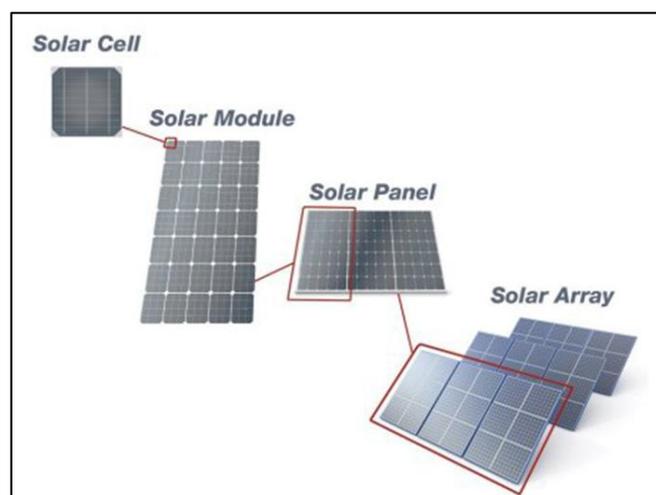
Gambar 2.7 menunjukkan pengembangan studi tentang solar panel atau photovoltaic (1975-2020) dari National Renewable Energy Laboratory (NREL). Evolusi dari solar panel mengalami progress yang signifikan dari tahun 1975. Dimulai tipe thin-film yang mempunyai efisiensi kurang dari 10%, kemudian tipe Crystalline 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)

2.4 Komponen Penyusun Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya *on-grid* memiliki beberapa komponen utama yang menyusun sistem tersebut, diantaranya adalah panel surya, dan inverter.

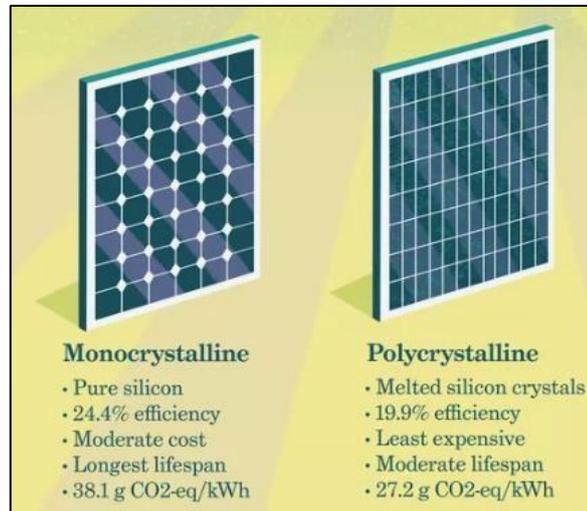
2.4.1 Panel Surya

Panel surya atau Photovoltaic merupakan sistem yang didesain mengenai sel photovoltaic. Sel photovoltaic menyerap sinar matahari sebagai sumber energi untuk membangkitkan listrik. Sel fotovoltaiik memproduksi daya kurang dari 3 Watt pada tegangan sekitar 0,5 Volt DC sehingga sel fotovoltaiik harus dirangkai menjadi konfigurasi seri-paralel untuk memproduksi daya yang cukup. Sel fotovoltaiik disusun secara seri membentuk modul fotovoltaiik supaya tegangan output yang dihasilkan memadai untuk kebutuhan. Modul fotovoltaiik biasanya didesain pada tegangan 12 Volt karena sistem fotovoltaiik biasanya beroperasi pada tegangan tersebut. Jika *output* yang dihasilkan dari sebuah modul dianggap tidak memadai untuk menyuplai daya maka modul akan disusun menjadi *array*. Ketika modul disusun membentuk *array* dengan susunan seri maka modul diharapkan menghasilkan daya *output* maksimal dengan kondisi arus yang sama, sedangkan ketika modul disusun membentuk *array* dengan susunan paralel maka modul diharapkan menghasilkan daya *output* maksimal dengan kondisi tegangan yang sama. (Gede Civavisna Brahma et al., 2021)



Gambar 2. 8 Susunan Panel Surya (sanspower,2021)

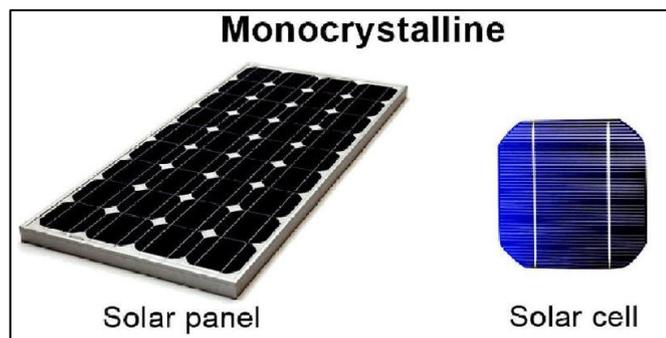
Terdapat dua jenis sel surya dibedakan berdasarkan bahan penyusun semikonduktor yang bervariasi dan Silikon yang secara Individu (chip) banyak digunakan diantaranya:



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

a. *Monocrystalline*

Sel monocrystalline biasanya terbuat dari batang silikon tunggal berbentuk silinder, yang kemudian diiris tipis menjadi bentuk wafers dengan ketebalan sekitar 200-250 μm , dan pada permukaan atasnya dibuat alur-alur mikro (microgrooves) yang bertujuan untuk meminimalkan rugi-rugi refleksi atau pantulan. Keunggulan utama dari jenis ini yaitu efisiensinya yang lebih baik (14-17%), serta lebih tahan lama (efektif hingga 20 tahun lebih penggunaan). (Anak Agung Gede Maharta P, 2016)



Gambar 2. 10 Panel surya monocrystalline (shabrina, 2016)

b. *Polycrystalline*

Polycrystalline terbuat dari batang silikon yang dihasilkan dengan cara dilelehkan dan dicetak oleh pipa paralel, lalu wafers sel surya ini biasanya berbentuk persegi dengan ketebalan 180-300 μm . Polycrystalline 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 polycrystalline yaitu sebesar 12-14%. (Anak Agung Gede Maharta P, 2016)



Gambar 2. 11 Panel Polycrystalline (shabrina, 2018)

c. *Thin Film*

Thin-Film mempunyai lapisan untuk menyerap sinar matahari yang dengan ketebalan 1 mikron, lain halnya dengan tipe silicon-wafer cell yang memiliki lapisan untuk menyerap sinar matahari dengan ketebalannya sekitar 350 mikron. Material yang digunakan Thin-Film Solar Cel diantaranya adalah cadmium telluride (CdTe), copper indium gallium deselenide (CIGS), dan amorphous silicon (a-Si). Tetapi Thin-Film mempunyai beberapa kekurangan dengan material dari amorphous silicon (a-Si) dimana dipasaran silicon sulit untuk didapatkan. Selain dari pada itu berupa efisiensi yang relative kecil, dan Ketika panel surya diberi pancaran energi dari sinar matahari itu sendiri menyebabkan penurunan daya output. Sampai sekarang, perkembangan dari Thin-Film sendiri mengalami perkembangan yang cukup pesat dengan material bahan berupa copper indium gallium deselenide (CIGS) dan cadmium telluride (CdTe).

Panel surya Thin-Film ini mempunyai 3 tipe untuk lapisan penyerap pada cahaya matahari yaitu CdTe, a-Si dan CiGs. Total keseluruhan dari tipe ini mempunyai fungsi lapisan yang sama. Contohnya berupa materi Al:Zno berfungsi untuk lapisan penyangganya diantara lapisan penyerapan juga sebagai pelindung sel dari arus listrik dan kontak logam. Terjadi perbedaan pada tipe CiGs, dimana diantara materi kaca dengan lapisan substratnya, dimana lapisan Molybdenum ditambahkan yang berfungsi sebagai meningkatkan efektifitas dari daya listrik yang dikeluarkan. (Berlian Aji S, 2020)

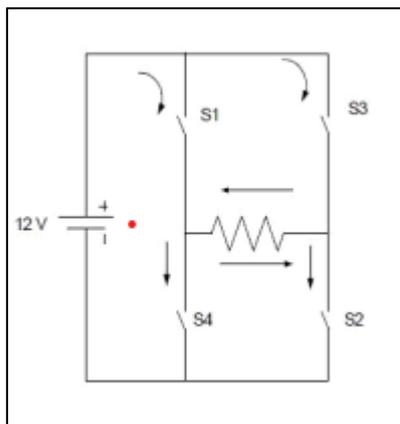


Gambar 2. 12 Thin Film Solar panel (Athanasios, 2016)

2.4.2 Inverter

Power Inverter atau biasanya disebut dengan Inverter adalah suatu rangkaian atau perangkat elektronika yang dapat mengubah arus listrik searah (DC) ke arus listrik bolak-balik (AC) pada tegangan dan frekuensi yang dibutuhkan sesuai dengan perancangan rangkaiannya. Sumber-sumber arus listrik searah atau arus DC yang merupakan Input dari Power Inverter tersebut dapat berupa Baterai, Aki maupun Sel Surya. Pengaturan tegangan inverter yang umum digunakan adalah dengan metode Modulasi Lebar Pulsa (Pulse Width Modulation, PWM).

Penggunaan inveter harus diperhatikan spesifikasinya dengan baik karena merupakan komponen penting dalam sistem PLTS agar sesuai dengan kebutuhan. 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.



Gambar 2. 13 Prinsip kerja inverter (Yustinus, 2017)

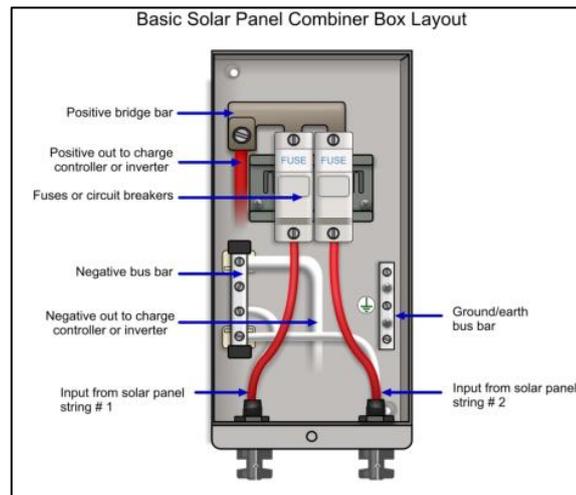
Inverter merupakan peralatan yang menjadi link antara solar modul dengan jaringan listrik. Terdapat beberapa jenis inverter berdasarkan fungsinya.

1. Central inverter: digunakan untuk PLTS dengan struktur yang homogen (modul PV dengan tipe yang sama) , digunakan untuk sistem dengan kapasitas daya diatas 100 kW. 24
2. 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.
3. Module inverter: setiap modul PV menggunakan satu buah inverter mikro dengan biaya yang relatif murah.
4. 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 wave inverter. Penjelasan dari ketiga jenis inverter tersebut adalah sebagai berikut ini.

- 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 mensupply 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)

2.4.3 Combiner Box



Gambar 2. 14 Combiner Box (Paul scott, 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*:

1. Perangkat proteksi string panel surya digunakan untuk melindungi individual *string* modul surya terhadap arus berlebih. Untuk tujuan ini biasanya digunakan sekering atau MCB
2. *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.
3. Sakelar pemutus memungkinkan kotak penggabung terputus secara aman dari *Solar Charge Controller* atau inverter jaringan saat pemeliharaan dilakukan.

4. 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
5. Selingkup pelindung (*Enclosure*) merupakan rumah dari komponen listrik dengan fungsi untuk melindungi komponen dari paparan langsung terhadap lingkungan dan mencegah gangguan dari luar.
6. Batang pembumian (*Grounding Bar*) memberi sambungan pembumian untuk selungkup pelindung (jika kotak logam digunakan) dan untuk menyalurkan surja ke pembumian dengan menggunakan perangkat proteksi tegangan surja. (Trengganusari, 2021)

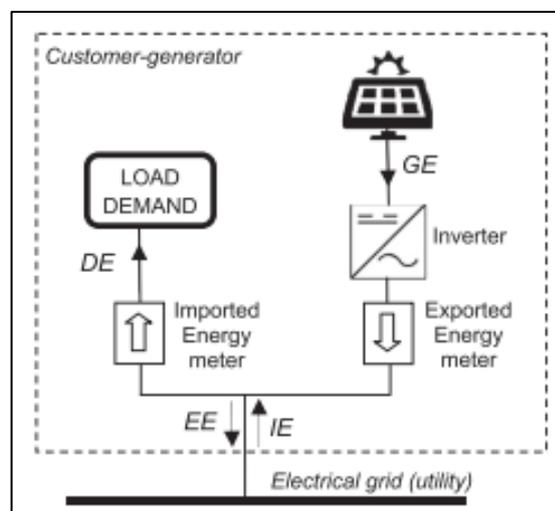
2.4.4 kWh Meter Exim

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)

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. 15 Skema Ekspor impor pada kWh Exim (Dufo-López & Bernal-Agustín, 2015a)

Berdasarkan Gambar 2.15 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 $IE = EE = 0$: 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, 2015b)

2.4.5 Alat Proteksi

a. *Circuit breaker*

Berdasarkan IECV (*internasional Electrotechnical Vocabulary*) 441-14-20 disebutkan bahwa *Circuit Breaker (CB)* atau pemutus tenaga (PMT) merupakan peralatan saklar /*switching* mekanis yang mampu mengalirkan dan memutus arus beban dalam kondisi normal, serta mampu memutus arus beban dalam kondisi abnormal/gangguan seperti kondisi *short circuit*/hubung singkat.

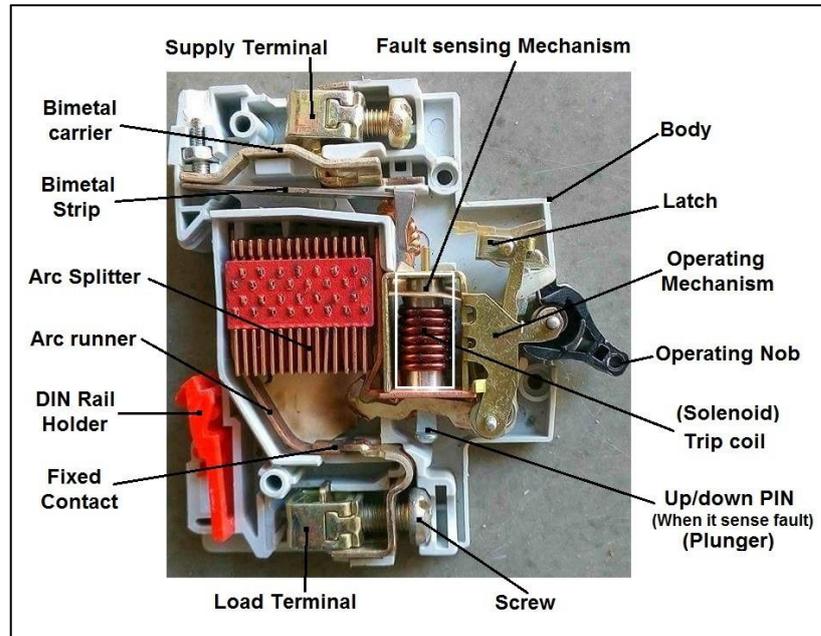
Circuit Breaker (CB) merupakan suatu alat listrik yang berfungsi untuk melindungi sistem tenaga listrik yang berfungsi untuk melindungi sistem tenaga listrik apabila terjadi kesalahan atau gangguan pada sistem tersebut, terjadinya

kesalahan pada sistem akan menimbulkan berbagai efek seperti termis, efek magnetis dan dinamis *stability*.

Fungsi utamanya adalah sebagai alat pembuka dan penutup suatu rangkaian listrik dalam kondisi berbeban, serta mampu membuka atau menutup saat terjadi arus gangguan (hubung singkat) pada jaringan atau peralatan lain.

Syarat-syarat yang harus dipenuhi oleh suatu *Circuit Breaker (CB)* agar dapat melakukan hal-hal diatas, adalah sebagai berikut:

1. Mampu menyalurkan arus maksimum sistem secara terus menerus.
2. Mampu memutuskan dan menutup jaringan dalam keadaan berbeban maupun terhubung singkat tanpa menimbulkan kerusakan pada pemutus tenaga itu sendiri.
3. Dapat memutuskan arus hubung singkat dengan kecepatan tinggi agar arus hubung singkat tidak sampau merusak peralatan sistem, sehingga tidak membuat sistem kehilangan kestabilan dan merusak pemutus tenaga itu sendiri. (Prayogo & Lomi, 2018)



Gambar 2. 16 Bagian-bagian MCB (Electrolibrary,2020)

2.5. Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Sistem PLTS.

Faktor yang mempengaruhi kinerja PLTS mempunyai beberapa faktor yang mempengaruhi kinerja sistem PLTS, diantaranya yaitu:

2.5.1 Potensi Sumber Energi Matahari

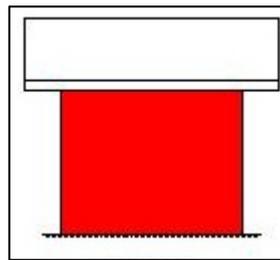
Salah satu potensi alam sebagai sumber energi listrik adalah energi tenaga matahari. Matahari merupakan sumber energi utama yang bersih dan ramah lingkungan bagi sebagian besar proses-proses yang terjadi dipermukaan bumi. Radiasi matahari yang diterima permukaan bumi merupakan masukan fundamental untuk banyak aspek terutama merupakan parameter penting dalam aplikasi *solar sel* sebagai pembangkit listrik. Sel matahari merupakan piranti yang dapat mengkonversi cahaya matahari menjadi energi listrik. (Hurung Anoi et al., 2019)

Energi matahari sangat cocok digunakan pada negara tropis seperti di Indonesia, karena letak geografis Indonesia yang berada di atas garis katulistiwa maka Indonesia memiliki potensi energi surya yang sangat besar. Setiap hari, di

Indonesia dapat diperoleh energi sebesar 4,8-6,0 kWh/m² pada bidang *horizontal* yang tidak terlindung. Energi ini dapat dimanfaatkan secara langsung maupun secara tidak langsung.

2.5.2 Bentuk Atap

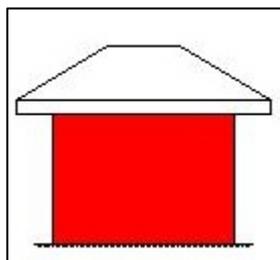
a. Model desain atap pelana



Gambar 2. 17 Jenis atap pelana (Rury et al,2015)

Atap pelana merupakan model atap yang paling umum kita jumpai digunakan pada ke banyak rumah dan sekolah. Bidang pada atap ini hanya terdiri dari 2 sisi yang bertemu di pada bubungan atap. Desain atap pelana memiliki kemiringan 35 derajat sehingga sangat efektif dalam kondisi cuaca panas atau pun hujan karena dapat panas sinar matahari dan juga dapat mengalirkan air hujan langsung ke bawah tanpa tertampung di atap.

b. Model atap perisai

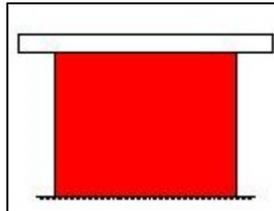


Gambar 2. 18 Jenis atap Perisai (Rury et al,2015)

Atap perisai merupakan pengembangan bentuk dari desain atap pelana. Atap perisai berupa sebuah bidang yang miring di semua sisinya yang terbentuk dari 2 bidang segi tiga dan 2 bidang trapesium. Sudut yang digunakan pada bagian atap

perisai sekitar 30-40 derajat. Keunggulan dari atap ini adalah dapat melindungi semua luar bagian dinding dari sinar matahari maupun terpaan hujan deras. Dan karena bentuknya yang agak miring arah angin akan dibelokkan ke arah atas sehingga dapat mengurangi resiko kerusakan dari struktur bangunan atap.

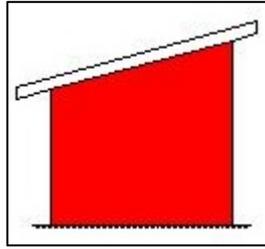
c. Model atap datar



Gambar 2. 19 Jenis atap datar (Rury et al,2015)

Atap datar merupakan desain atap yang paling sederhana. Biasanya atap dengan desain seperti ini terbuat dari beton yang kuat yang langsung dicor ketika proses pembangunan sebuah rumah. Selain itu dari segi biayanya juga bisa dibilang lebih murah karena lebih simpel. Atap model ini sering digunakan untuk membuat area rooftop yang dapat ditempati untuk bersantai. Akan tetapi apabila Anda menggunakan desain atap jenis ini maka kerugiannya adalah tidak bisa mengalirkan air ke bawah sehingga dapat berpotensi menyebabkan genangan yang bisa memicu kebocoran. Oleh karena itu, jika ingin menggunakan atap model ini maka sebaiknya juga menyediakan jalur keluar air dan arahkan kemiringan lantai pada jalur keluar air tersebut agar air dapat mengalir keluar, lantai atap juga sebaiknya di semen halus dan licin untuk mencegah air terserap masuk ke dalam.

d. Model atap sandar

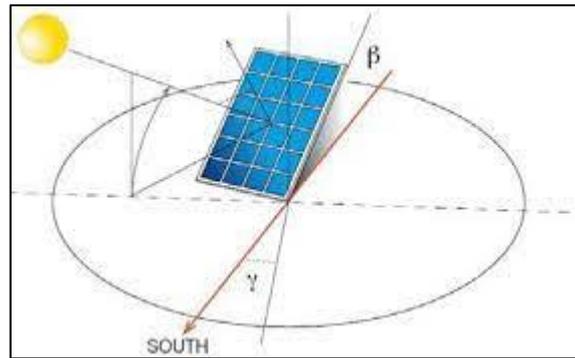


Gambar 2. 20 Jenis atap sandar (Rury et al,2015)

Desain model ini biasanya digunakan pada bangunan tambahan seperti emperan ataupun selasar. Tetapi untuk saat ini model atap ini juga telah digunakan pada rumah yang mengusung tema konsep modern.

2.5.3 Orientasi Panel Surya

Orientasi dari rangkaian panel ke arah matahari secara optimum adalah sangat penting untuk menghasilkan energi yang maksimum. Selain arah orientasi sudut orientasi (*tilt angle*) dari panel juga sangat mempengaruhi hasil energi yang maksimum. Misalnya, untuk lokasi yang terletak di belahan bumi utara maka panel surya (*array*) sebaiknya diorientasikan ke selatan. Begitu pula untuk lokasi yang terletak di belahan bumi selatan maka panel surya (*array*) diorientasikan ke utara. Efisiensi terbesar panel surya tercapai jika sudut datang sinar matahari selalu 90° . Sesungguhnya datangnya sinar matahari bervariasi menurut garis lintang serta deklinasi matahari sepanjang tahun. Karena kemiringan sumbu rotasi bumi sekitar $23,45^\circ$ terhadap bidang orbit bumi terhadap matahari, tempat terbit dan terbenamnya matahari selalu bervariasi setiap harinya. Matahari berada di posisi sudut 90° terhadap permukaan bumi yaitu pada garis khatulistiwa. (Kumara et al., 2018)



Gambar 2. 21 Orientasi Panel Surya terhadap matahari (Kumara et al., 2018)

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, ($0^\circ \leq \beta \leq 180^\circ$).
- d. Sudut *zenith* (θ_z), merupakan saat matahari tidak tegak lurus dengan bidang panel atau membentuk sudut θ , maka panel akan menerima radiasi lebih kecil dengan faktor $\cos \theta$. Posisi matahari dilangit terhadap bumi dimanapun kita berada sesuai dengan letak geografis lintang dan bujur dapat dihitung dengan persamaan *zenith*. *Zenith* dinyatakan dalam 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. Sudut zenith untuk setiap saat terhadap bumi pada suatu titik dengan letak geografis lintang-bujur dapat dihitung dengan persamaan 2.1

$$\cos(\theta z) = \cos(\varphi - \beta) \cos\delta \cos\omega + \sin(\varphi - \beta) \sin\delta \quad (2.1)$$

Dimana:

θz = sudut *zenith*

φ = nilai lintang (longitude) dimana PV dipasang

β = sudut kemiringan PV

δ = sudut deklinasi matahari

ω = sudut jam (*hour angle*)

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).

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (2.2)$$

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. (Kumara et al., 2018)

Sudut deklinasi (δ) merupakan fungsi dari hari (persamaan 2.2), dilakukan dengan hanya mengambil nilai hari pada pertengahan bulan (misalnya pada tanggal 15). Selanjutnya dilakukan perhitungan mengenai pengaturan sudut tilt/slope (β), berikut bentuk perasamaannya.

$$\beta = |\phi - \delta| \quad (2.3)$$

Dimana:

β = Sudut *tilt/slope*

ϕ = Sudut *latitude* lokasi penempatan PLTS

δ = Sudut deklinasi

Untuk ω (*hour angle*) sangat erat kaitannya dengan waktu lokal, sehingga kesalahan pada nilai ω akan menyebabkan kesalahan yang signifikan. Nilai ω akan bernilai 0 pada tengah hari, bernilai negatif pada pagi hari dan bernilai positif pada sore hari. Nilai ω setiap jam nya akan bertambah 15° . Untuk menghitung *hour angel* dapat dihitung melalui persamaan 2.4.

$$\omega = (\text{solar time} - 12) \times 15^\circ \quad (2.4)$$

Untuk nilai *solar time* sendiri dapat dicari dengan persamaan 2.5.

$$\text{solar time} = \text{waktu lokal} + \left(\frac{(\text{LSTM} - \text{Longitude}) \times 4' + \text{EoT}}{60} \right) \quad (2.5)$$

Dimana,

LSTM = Lokal Standard Time Meridian

EoT = Faktor koreksi waktu sesuai rotasi bumi terhadap matahari

Nilai LSTM dapat dihitung dengan persamaan 2.6.

$$\text{LSTM} = 15^\circ \times \Delta T_{GMT} \quad (2.6)$$

Dimana,

T_{GMT} = selisih waktu secara time zone

Sedangkan EoT dicari dengan persamaan 2.7

$$EoT = 9.87 \sin(2x) - 7.53 \cos(x) - 1.5 \sin(x) \quad (2.7)$$

Dimana nilai x didapat dari persamaan 2.8.

$$x = \frac{360}{365}n - 81 \quad (2.8)$$

Setelah mengetahui posisi matahari terhadap bumi atau terhadap PV yang terpasang, kita bisa menghitung besarnya intensitas iradiasi sinar matahari untuk setiap saat sesuai dengan besar kecilnya *hour angel*. Besarnya radiasi matahari dapat dihitung dengan persamaan 2.9.

$$I_o = I_{SC} (1 + 0.033 \cos \frac{2\pi}{365}n) \cos \theta z \quad (2.9)$$

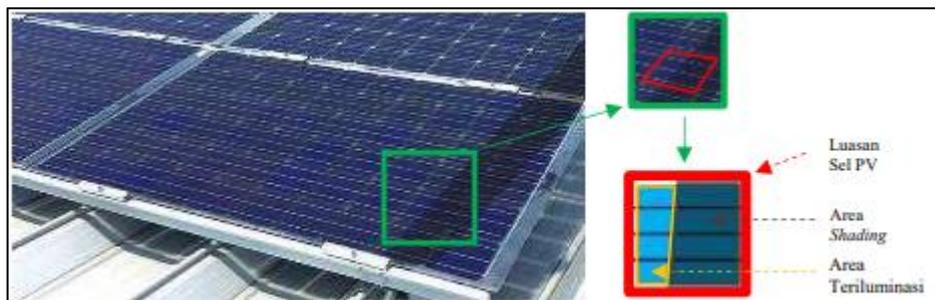
Dimana,

I_o = Iradiasi matahari

I_{SC} = konstanta iradiasi matahari (1367 kW/m²)

2.5.4 Shading Matahari

Efek shading pada PV array menyebabkan berkurangnya penyerapan radiasi matahari dan meningkatnya suhu pada modul-modul pada PV array. Berkurangnya penyerapan radiasi matahari mengakibatkan menurunnya tegangan pada PV string dan mengganggu kinerja sistem PV array. Modul PV yang tidak mendapat radiasi tidak seragam tersebut menjadi beban pada modul PV yang bekerja secara normal. Modul PV yang menjadi beban tersebut akan membuang daya yang dihasilkan melalui panas dan menyebabkan modul PV rusak jika dipaksa bekerja secara terus menerus (Prima et al., n.d.)



Gambar 2. 22 Modul Pv yang mengalami gangguan shading (Jusran et al., n.d.)

Terdapat potensi bayangan jatuh pada panel surya antara lain:

a. Bayangan atap

Di Indonesia, secara umum terdapat dua jenis bentuk atap bangunan, yaitu atap datar dan atap prisma. Bentuk atap datar tidak terlalu berpengaruh terhadap banyak tergantung pemasangan panel disesuaikan dengan Analisa bayangan, sedangkan bentuk prisma terdapat atap yang terdapat bayangan yang signifikan dikarenakan terhalang oleh atap yang terorientasi langsung oleh matahari.

b. Bayangan pohon/vegetasi

Bayangan vegetasi yang berada disekitar bangunan dapat jatuh pada panel dapat menutupi sejumlah panel dikarenakan tinggi atau lebatnya dedaunan dapat menghalangi sinar matahari terhadap panel.

c. Bayangan bangunan/Gedung

Gedung disekitar pemasangan PLTS dapat menghasilkan bayangan jika letak pemasangan PLTS lebih rendah daripada Gedung/bangunan sekitar.

d. Bayangan panel surya

Secara teknis pemasangan, jarak, derajat dan arah kemiringan panel surya juga perlu untuk menghindari bayangan panel surya lain jatuh ke panel surya tertentu. (Indonesia Clean Energy Development, 2019)

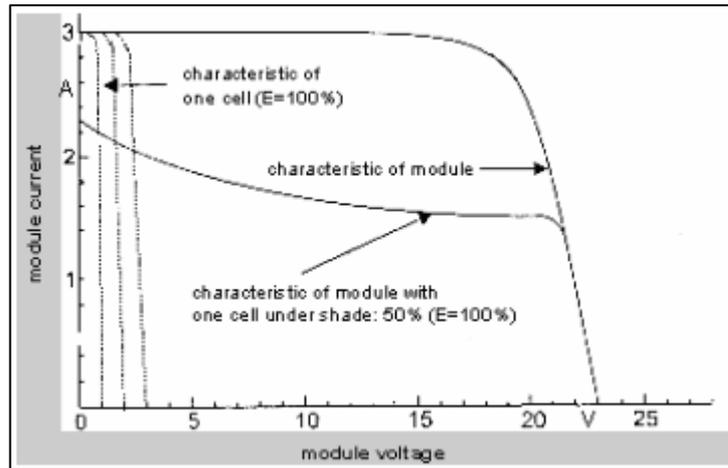
Tabel dibawah ini menunjukkan efek yang sangat esktrim oleh *effect shading* pada satu sel dari modul panel surya single crystalline yang tidak memiliki internal bypass diode. Untuk mengatasi hal tersebut solar cell panel dipasang bypass diode, bypass diode untuk arus mengalir ke satu arah, mencegah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

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

Tabel 2. 1 Persentase Panel surya kondisi shading (Wiranda, n.d.)

Masalah yang umum timbul akibat efek bayangan antara lain

- a. 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.
- b. Stress akibat panas yang tidak merata pada permukaan modul akan meningkatkan suhu pada sel secara dramatis, sehingga timbul overheating pada sel-sel tertentu.



Gambar 2. 23 Karakteristik arus-tengangan akibat *Shading effect* (Wiranda, n.d.)

Untuk mendapatkan besar shadingnya digunakan rumus sebagai berikut :

$$Effect\ shading\ (\%) = 100\% - A_p \quad (2.10)$$

Dimana:

A_p = persentase luasan panel surya yang terpapar/terkena oleh sinar matahari (%)

2.6 Analisa Kontribusi Posisi Panel Surya terhadap Kebutuhan

2.6.1 Perhitungan Potensi Energi dari Modul Surya

Perhitungan pertama dilakukan dengan menghitung jumlah modul panel surya yang digunakan, hal ini dapat dihitung menggunakan persamaan 2.11 (GardiniLambang Purbaya, 2019).

$$Jumlah\ panel\ surya = \frac{kapasitas\ pembangkit\ yang\ direncanakan}{P_{mpp}\ (Panel\ Surya)} \quad (2.11)$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan inverter yang digunakan di persamaan 2.12

$$\text{Jumlah Inverter} = \frac{\text{kapasitas pembangkit yang direncanakan}}{P_{max} DC Inverter} \quad (2.12)$$

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

2.6.2 Perhitungan Densitas Energi Matahari

Densitas energi matahari adalah perbandingan antara rata – rata daya dengan luasan proyeksi tempat instalasi. Perhitungan densitas energi matahari menggunakan persamaan 2.13

$$ED = \frac{E}{S} = \frac{P(W) \times t(s)}{S(cm^2)} \quad (2.13)$$

Dimana:

E = Energi

S = Luasan Area

$P(W)$ = Power rating

$t(s)$ = Waktu

2.6.3 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 2.14, 2.15 dan 2.16.(Gardini Lambang Purbaya, 2019)

1. Rangkaian seri

$$\text{Min. Modul Seri per Array} = \frac{V_{DCMax}}{V_{oc}} \quad (2.14)$$

$$\text{Max. Modul Seri per Array} = \frac{V_{DCMin}}{V_{mpp}} \quad (2.15)$$

2. Rangkaian parallel

$$\text{Min. Modul Paralel per Array} = \frac{I_{DCMax}}{I_{sc}} \quad (2.16)$$

Keterangan :

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

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

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

$I_{DC Min}$ = 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)

2.6.4 Perhitungan Area Array

Perhitungan area *Array* (PV area) menggunakan persamaan 2.17 dan 2.18 (Gardini Lambang Purbaya, 2019)

$$L = (N \times L_{mod}) + (N - 1) \times C \quad (2.17)$$

$$W = (R \times W_{mod}) + (R - W_{mod}) + (R - 1) \times C \quad (2.18)$$

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*nya dan jarak per masing-masing *string*. Jarak masing-masing *string* dapat dihitung dengan persamaan 2.19.(Gardini Lambang Purbaya, 2019)

$$d = W \times \left(\cos\alpha + \frac{\sin\alpha}{\tan\beta} \right) \quad (2.19)$$

Keterangan :

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

2.7 Pengaruh Shading Terhadap Produksi Energi

2.7.1 Menghitung Losses

Perencanaan PLTS harus memperhitungkan losses yang ada pada panel surya (penggunaan panel surya berkapasitas 100 Wp tidak diterima di inverter 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.

$$P_i = \text{besar kapasitas terpasang} \times 100\% - 20\% \quad (2.20)$$

$$P_{Mod} = P_{Manufacture} \times \eta_{PV} \times \eta \times \Delta_{losses\ pv} \quad (2.21)$$

$$PPSH = P_{Mod} \times \text{Jumlah Modul} \times PSH \quad (2.22)$$

$$E_y = [P(PSH) \times \text{Losses System} \times \text{efisiensi Inverter}] \times 365 \text{ hari} \quad (2.23)$$

$$SY = \frac{E_{SYS}}{P_{Array_STC}} \quad (2.24)$$

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 metacarpi 1000W/m²

E_y = Energi Sistem

SY = Spesifik 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

2.7.2 Menentukan Performance Ratio (PR) dan Total Daya PLTS

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 2.24.(Gardini Lambang Purbaya, 2019)

$$PR = \frac{E_{SYS}}{E_{ideal}} \quad (2.25)$$

$$E_{Ideal} = P_{ArraySTC} \times HTilt \quad (2.26)$$

Keterangan :

PR = Performance ratio (%)

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

$Htilt$ = Rata-rata radiasi harian, h

Untuk menghitung total daya pada PLTS menggunakan persamaan

$$Energy\ output\ PV = P_i \times PSH \quad (2.27)$$

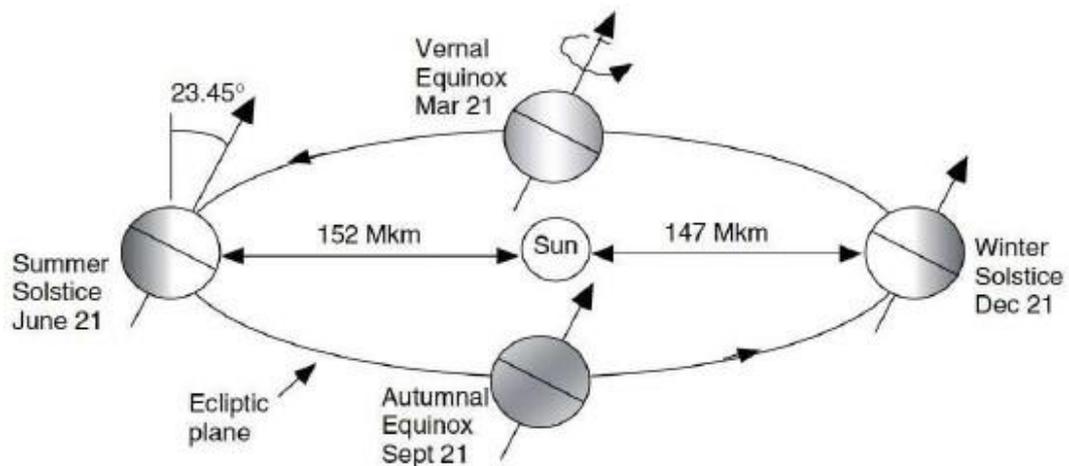
P_i = Hasil keluaran daya

PSH = Radiasi matahari

2.8 Pengaruh Orientasi Matahari terhadap Produksi Energi

2.8.1 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 hamper 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. 24 sudut putar bumi terhadap orbit (Gilbert M. Masters,2013)

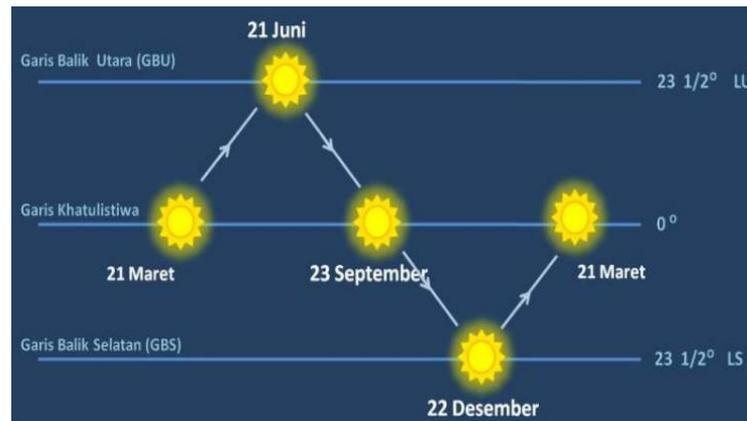
Setiap hari bumi berputar pada sumbunya seraya melakukan orbit sepanjang elips. Seperti gambar 2.1 dimana sepanjang bidang orbit bumi disebut bidang eliptik. Bumi berputar dengan kemiringan 23.45° terhadap bidang edar dengan sudut kemiringan tersebut. Hal ini yang menyebabkan pergantian musim dimana 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 kutub utara mencapai sudut

tertinggi terhadap matahari (23.45°) sementara pada 21 juni terjadi proses sebaliknya.(Gilbert M. Masters,2013)

2.8.2 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. 25 posisi jalur matahari dalam waktu satu tahun (Duffie J,2013)

2.9 Software Helioscope

Helioscope merupakan sebuah program 3D model yang berbasis web yang diperkenalkan oleh Folsom Labs yang memungkinkan untuk melakukan simulasi lengkap perencanaan secara langsung pada segmen lapangan yang dan dapat dilakukan 3D model PLTS. Software ini dapat melakukan analisis dan laporan berupa performa daya keluaran PLTS yang disimulasikan, berapa daya yang dihasilkan, *losses* daya yang dihasilkan, dan faktor penghambat daya yang dihasilkan.

Prinsip kerja Program Helioscope ini dimulai memasukkan data input yang digunakan untuk simulasi yaitu, Modul PLTS, array panel pada segmen lapangan, jenis inventer, kemiringan sudut panel suya dan data meteorologi pada Gedung Universitas Siliwangi kampus baru Tasikmalaya. Untuk penentuan lokasi PLTS dilakukan menggunakan koordinat dari Gedung Universitas Siliwangi kampus baru Tasikmalaya.