

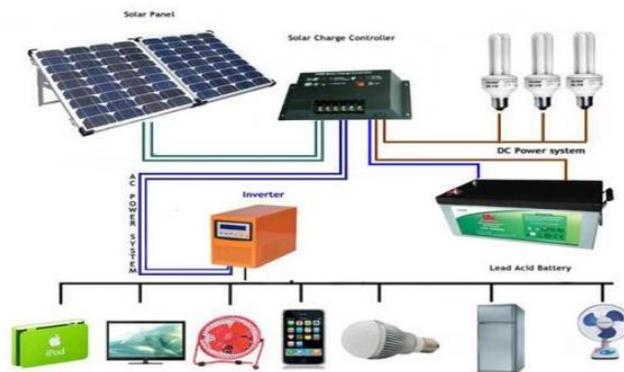
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Pembangkit Listrik Tenaga Surya adalah salah satu jenis pembangkit listrik yang memanfaatkan sumber daya energi terbarukan yakni energi cahaya matahari didalam pemanfaatannya untuk menjalankan sistem pembangkit listrik. Adapun cara kerja dari pembangkit listrik tenaga surya ini ialah memanfaatkan sel surya sebagai salah satu komponen utamanya.

Sel surya adalah seperangkat modul untuk mengkonversi tenaga matahari menjadi energi listrik. Photovoltaic adalah teknologi yang berfungsi untuk mengubah atau mengkonversi radiasi matahari menjadi energi listrik secara langsung. PV biasanya dikemas dalam sebuah unit yang disebut modul. Dalam sebuah modul surya terdiri dari banyak sel surya yang bisa disusun secara seri maupun paralel. Sedangkan yang dimaksud dengan surya adalah sebuah elemen semi konduktor yang dapat mengkonversi energi surya menjadi energi listrik atas dasar efek photovoltaic. Sel surya mulai populer akhir - akhir ini, selain mulai menipisnya cadangan energi fosil dan isu global warming. Energi yang dihasilkan juga sangat murah karna sumber energi (matahari) bisa didapatkan secara gratis¹.



Gambar 2. 1 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya
(Sumber dari : looksalein.life)

¹ N. Safitri, P. N. Lhokseumawe, T. Rihayat, and P. N. Lhokseumawe, *No. ISBN 978-623-91323-0-9*, no. Juli. 2019.

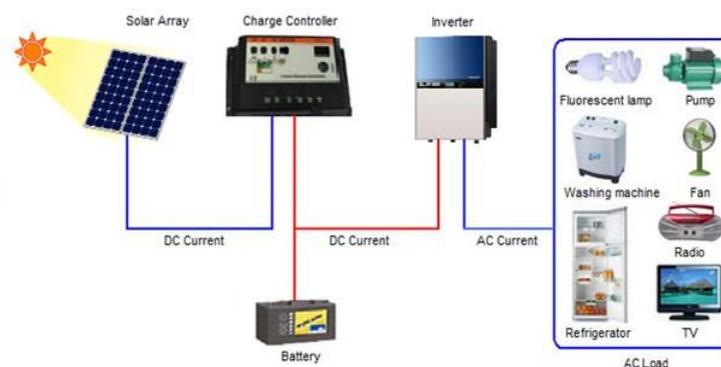
Penggunaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya ini sangat efektif digunakan apabila kondisi iklim dari suatu negara, memiliki iklim tropis, oleh karena itu khususnya negara Indonesia yang beriklim tropis sangat cocok dalam penggunaan sistem pembangkit ini.

2.2 Jenis-Jenis Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya²

2.2.1 Mode Sistem Pengoperasian

a. Sistem PLTS *Off-grid*

Pembangkitan tenaga listrik yang energinya bersumber dari radiasi matahari melalui konversi sel fotovoltaik dimana sistem kelistrikannya tidak terhubung ke jaringan listrik umum. Sistem ini pada umumnya dilengkapi dengan baterai.



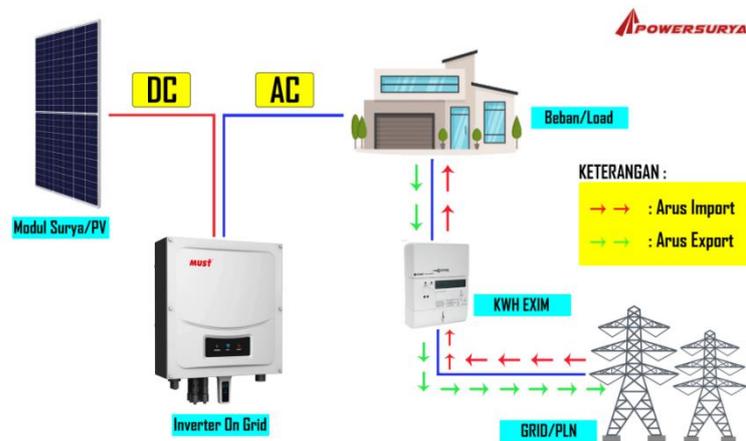
Gambar 2. 2 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Off-grid

(Sumber dari : POMPAIR.com)

b. Sistem PLTS *On-grid*

Pembangkitan tenaga listrik yang energinya bersumber dari radiasi matahari melalui konversi sel fotovoltaik dimana sistem kelistrikannya terhubung ke jaringan listrik umum. Sistem ini pada umumnya tidak dilengkapi dengan baterai.

² Kementerian ESDM RI, "Panduan pengelolaan Lingkungan Pembangkit Listrik Tenaga Surya", hal 9. 2020.



Gambar 2. 3 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya On-grid (Sumber dari : Powersurya)

2.2.2 Posisi Pemasangannya

- a. PLTS *Ground Mounted* (dipasang diatas permukaan tanah)



- b. PLTS *Rooftop* (dipasang diatas atap atau dapat terintegrasi dengan atap)



- c. PLTS Terapung



2.2.3 Desain Sistem

- a. PLTS Terpusat



Sistem PLTS yang modul fotovoltaiiknya didesain secara terpusat (dalam satu area) dan memiliki sistem jaringan distribusi untuk menyalurkan daya listrik ke beban.

b. PLTS Tersebar/Terdistribusi

Sistem PLTS yang modul fotovoltaiiknya didesain secara tersebar umumnya tidak memiliki sistem jaringan distribusi, sehingga setiap pelanggan memiliki sistem PLTS tersendiri.

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* adalah pembangkit tenaga listrik yang energinya bersumber dari radiasi matahari melalui konversi sel fotovoltaiik dimana sistem kelistrikannya tidak terhubung dengan jaringan listrik umum. Suatu *PLTS off-grid* yang dikelola secara komunal atau yang sering disebut sistem PLTS berdiri sendiri (*stand-alone*), beroperasi secara independen tanpa terhubung dengan jaringan PLN. Sistem ini membutuhkan baterai untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan di siang hari untuk memenuhi kebutuhan listrik di malam hari. Ada dua konfigurasi sistem PLTS *off-grid* yang umum digunakan, yaitu sistem penyambungan *AC-coupling* dan *DC-coupling*¹.

Secara singkat, DC adalah singkatan untuk *direct current* (arus searah), sementara AC adalah singkatan untuk *alternating current* (arus bolak balik). Penyambungan mengacu pada titik penyambungan di dalam sistem. Sistem penyambungan DC menghubungkan rangkaian modul fotovoltaiik ke sisi DC sistem PLTS melalui *solar charge controller*. Sementara itu, sistem penyambungan AC menghubungkan rangkaian modul surya dan baterai ke sisi AC melalui inverter jaringan dan inverter baterai. Jika ada kelebihan daya yang tidak digunakan oleh beban, maka kelebihan daya yang akan dikonversi kembali ke DC oleh inverter baterai dan energi akan disimpan dalam baterai³. Secara umum, kedua konfigurasi tersebut menggunakan komponen yang sama kecuali untuk *solar charge controller* (SCC), komponen yang dipasang di sisi setelah kotak penggabung (*combiner box*).

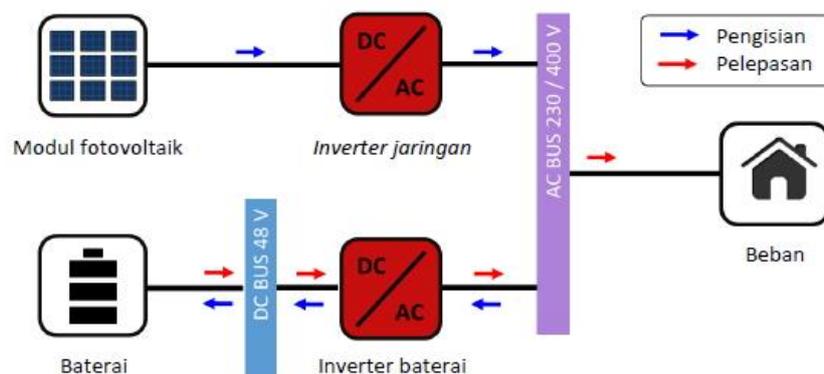
¹Kementerian ESDM RI, *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS OFF-Grid*, (2017), hal. 4.

³Bagus Ramadhani, *Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya: Dos & Don'ts*, (Jakarta: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 2018), hal. 3.

Penggunaan SCC di dalam sistem *DC coupling* diganti dengan inverter jaringan di dalam sistem *AC coupling*.

2.3 Konfigurasi PLTS *Off-Grid*

Secara umum, sistem PLTS *Off-grid* adalah sistem kelistrikan yang tidak terhubung dengan jaringan listrik umum (PLN) atau dengan pembangkit lainnya. Sifatnya berdiri sendiri mengandalkan baterai ketika PLTS berada dalam kondisi tidak maksimal. Dengan kata lain, ketika daya dari PLTS lebih dari beban, kelebihan tersebut daya disimpan dalam baterai dan apabila daya PLTS kurang dari beban, kurang daya tersebut disuplay dari baterai. Terdapat 2 sistem konfigurasi yang umum yang ada dalam PLTS *off-grid* yaitu berbasis *DC coupling* dan berbasis *AC coupling*. Artinya memiliki koneksi (AC) dan koneksi (DC), dua sistem ini menggunakan baterai namun penempatan komponen inverter yang berbeda.⁵



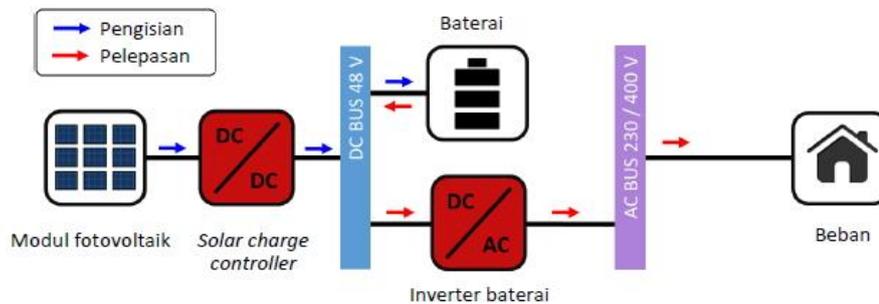
Gambar 2. 4 Sistem PLTS Off-grid AC Coupling

(Sumber dari : Pasangpanelsurya)

Pada sistem AC Coupling, energi yang dihasilkan modul surya langsung disalurkan ke beban (konsumen) melalui inverter jaringan/*grid-tied/on-grid*, apabila beban sudah tercukupi energi berlebih yang dihasilkan modul surya digunakan untuk pengisian baterai melalui inverter baterai. Pada sistem DC Coupling, energi yang dihasilkan modul surya digunakan untuk mengisi baterai melalui *Solar Charge*

⁵ I. R. Handoko, "Praktis Belajar Pembangkit Listrik Tenaga Surya", hal 201. Juni. 2020.

Controller (SCC) terlebih dahulu, baru kemudian disalurkan ke beban (konsumen) melalui inverter baterai.⁶



Gambar 2. 5 Sistem PLTS Off-grid DC Coupling

(Sumber dari : Pasangpanelsurya)

Sistem AC coupling terletak pada posisi titik koneksi yang berada pada sisi AC. Jenis sistem ini menggunakan inverter *grid-tied* atau inverter *on-grid* (inverter yang terhubung ke jaringan AC) bertanggung jawab dan mengelola potensi energi yang terserap di modul surya melalui *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Keluaran dari inverter *grid-tied* terhubung melalui busbar ke sisi beban AC. Pada kebanyakan kasus sisi beban AC dipisah antara beban AC *reguler* dan beban AC kritis (beban-beban yang harus dijaga tetap menyala). Beban-beban AC kritis ini tetap teraliri listrik meski saat matahari tidak bersinar. Sistem cadangan AC *Coupling* bersumber dari baterai dan inverter baterai yang mengambil alih operasi ke jaringan (*grid*) selama jaringan kehilangan daya. Energi yang diserap modul surya dari matahari pertama sekali dialirkan ke beban AC melalui inverter *grid-tied* baru kemudian ke baterai melalui inverter baterai (pada situasi ini, inverter baterai berfungsi sebagai *charging* untuk baterai).

2.4 Pola Pengoperasian PLTS *Off-Grid*⁷

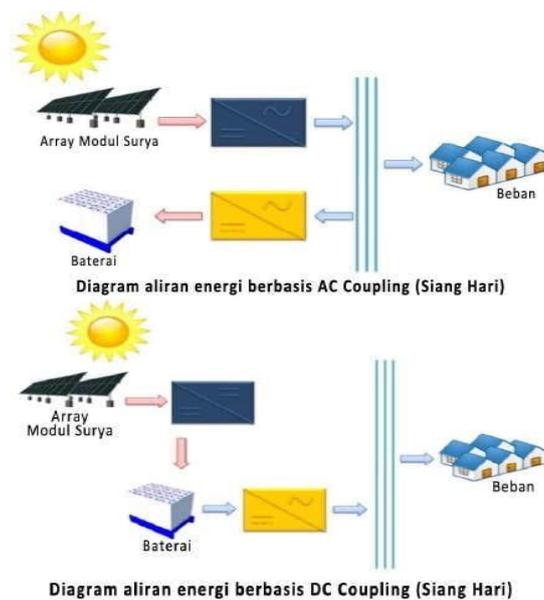
Terdapat 3 (tiga) pola operasi yang umum pada PLTS *off-grid*, yaitu :

2.4.1 Siang hari pada saat energi PLTS *off-grid* lebih besar dari kebutuhan beban

⁶ ACCESS, Accelerating Clean Energy Acces to Reduce Inequality, “Modul Pengoperasian PLTS Terpusat,” vol. 5, hal 19. Januari. 2022

⁷ Raynor Solar Energy, RHM, “Panduan Pengoperasian dan perawatan PLTS *Off-Grid*.”

Besar energi yang dihasilkan oleh PLTS off-grid sangat tergantung kepada intensitas penyinaran matahari yang diterima oleh modul surya dan efisiensinya. Intensitas matahari maksimum mencapai 1000 Watt/m², apabila efisiensi modul surya sebesar 16% maka daya ideal yang dapat dihasilkan oleh modul surya adalah sebesar 160 Watt/m². Diagram aliran energi yang dihasilkan pada siang hari dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 6 Diagram aliran energi yang dihasilkan pada siang hari

(Sumber : PT Industri Telekomunikasi Indonesia (Persero))

Pada sistem *AC coupling*, energi yang dihasilkan modul surya pada kondisi tersebut langsung disalurkan ke beban (konsumen) melalui inverter *grid-tied*, inverter *on-grid*, apabila beban sudah tercukupi energi berlebih yang dihasilkan modul surya digunakan untuk pengisian baterai melalui inverter baterai / inverter *bidirectional*. Pada sistem *DC coupling*, energi yang dihasilkan modul surya pada kondisi tersebut digunakan untuk mengisi baterai melalui *solar charge controller* (SCC) terlebih dahulu, baru kemudian disalurkan ke beban (konsumen) melalui inverter.

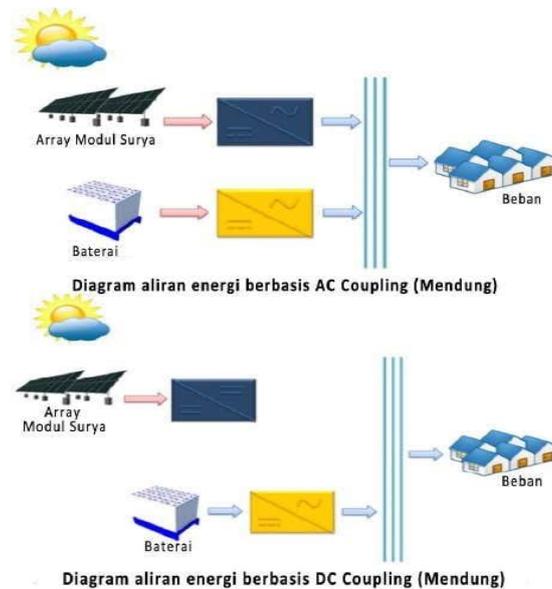
2.4.2 Siang hari pada saat energi PLTS *off-grid* lebih besar dari beban

Kondisi ini dapat terjadi apabila :

- Saat kondisi berawan atau mendung.

- Saat sore hari menjelang matahari terbenam PLTS *off-grid* akan menghasilkan energi listrik dari matahari namun tidak maksimal.

Diagram aliran energi yang dihasilkan pada kondisi berawan/mendung dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2. 7 Diagram aliran energi yang dihasilkan pada kondisi berawan/mendung
(Sumber : PT Industri Telekomunikasi Indonesia (Persero))

Pada sistem *AC coupling*, energi yang dihasilkan modul surya dan energi yang tersimpan dalam baterai disalurkan secara paralel ke beban (konsumen). Pada sistem *DC coupling*, energi yang dihasilkan modul surya pada kondisi tersebut digunakan untuk mengisi baterai melalui *solar charge controller* (SCC) terlebih dahulu, baru kemudian disalurkan ke beban (konsumen) melalui inverter.

2.4.3 Malam Hari

Pada malam hari sumber energi matahari tidak dapat dimanfaatkan lagi, oleh karena itu beban akan disuplai oleh baterai. Energi yang tersimpan dalam baterai pada siang hari akan dipergunakan untuk menyuplai beban saat dibutuhkan melalui inverter. Kemudian inverter mengubah arus searah (DC) pada sisi baterai menjadi arus bolak-balik (AC) ke sisi beban. Diagram aliran energi pada malam hari dapat dilihat pada gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Diagram aliran energi yang dihasilkan pada malam hari

(Sumber : PT Industri Telekomunikasi Indonesia (Persero))

2.5 Komponen - Komponen pada PLTS *Off-Grid*

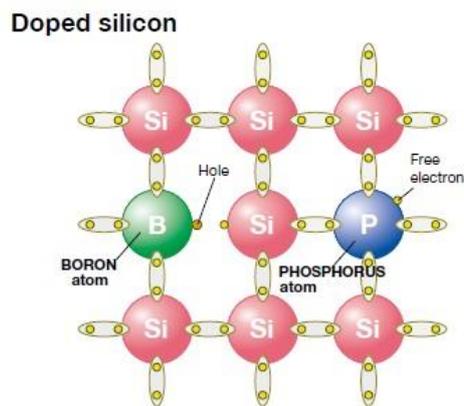
Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan suatu kesatuan sistem yang terdiri dari beberapa komponen, berikut komponen-komponen yang akan digunakan.

2.5.1 Generator Sel Surya (*Photovoltaic Generator*)

Salah satu komponen utama pada PLTS adalah generator sel surya, yang dimana sel surya sebagai komponen dasarnya. Sel surya merubah radiasi matahari menjadi energi listrik. Sel surya terbuat dari lapisan tipis dari bahan semi konduktor, yang umumnya terbuat dari pengolahan silikon, dengan ketebalan sekitar 0,3 mm dan dengan permukaan dari 100 hingga 225 cm². Silikon memiliki empat elektron valensi (tetra valensi), didoping dengan menambahkan atom trivalensi (misalnya boron P doping) pada satu lapisan dan sejumlah atom pentavalensi (misalnya phosphorus-N doping) pada lapisan lainnya. Daerah P-type memiliki kelebihan lubang (*holes*), sedangkan daerah N-type memiliki kelebihan elektron.

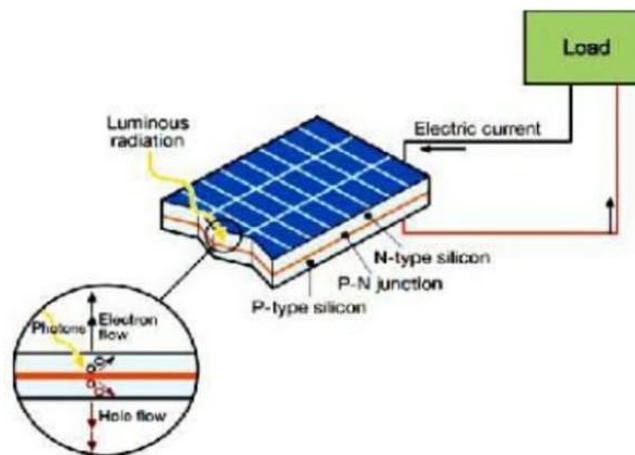
Ketika sel surya terkena sinar matahari, berdasarkan efek fotovoltaiik, maka pada sel surya akan terjadi perpindahan elektron dari daerah elektron yang lebih tinggi (N)

ke daerah P yang memiliki lubang. Perpindahan ini merupakan aliran arus internal. Apabila pada sambungan terhubung dengan penghantar dan terhubung dengan rangkaian tertutup atau terhubung dengan beban, maka akan terjadi aliran arus listrik dengan tegangan tertentu menuju beban (beban menyerap daya listrik) yang kontiyu, selama dan dipengaruhi oleh adanya sinar matahari yang diterima oleh sel surya.



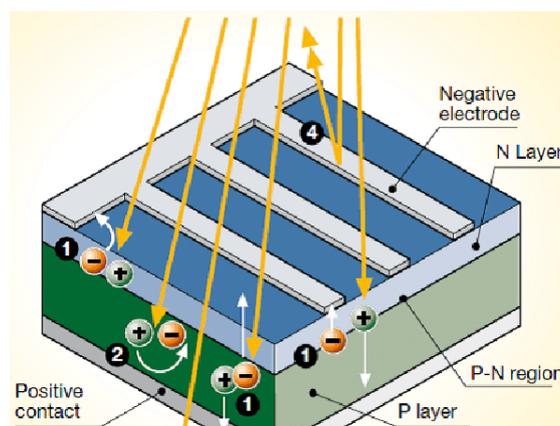
Gambar 2. 9 Struktur Sel Surya

(Sumber : *Buku Pembangkit Listrik Tenaga Surya, 2019*)



Gambar 2. 10 Proses kerja sel surya

(Sumber : *Buku Pembangkit Listrik Tenaga Surya, 2019*)



Gambar 2. 11 Efek Fotovoltaik

(Sumber : *Buku Pembangkit Listrik Tenaga Surya, 2019*)

Ketika sinar / energi matahari menimpa sel surya, tidak 100% energi tersebut terserap dan dapat dikonversikan seutuhnya menjadi energi listrik, karena dalam penyampaiannya masih ada persentase kerugian (*losses*) yang terjadi dengan rincian sebagai berikut :

100% dari peristiwa energi matahari yaitu :

- a) 3% rugi pantulan dan bayangan pada kontak depan (lapisan depan);
- b) 23 % *photons* dengan panjang gelombang tinggi, dengan energi yang kurang untuk membebaskan elektron, sehingga menghasilkan panas
- c) 32% *photons* dengan panjang gelombang pendek, dengan energi yang berlebih (penyebaran / *transmission*);
- d) 8,5% penggabungan ulang dari *free charge carriers*;
- e) 20% peralihan elektrik pada sel, utamanya pada daerah transmisi/peralihan;
- f) 0,5% resistansi, mewakili rugi konduksi (*conduction losses*);
- g) 13% energi listrik yang dapat dipakai.

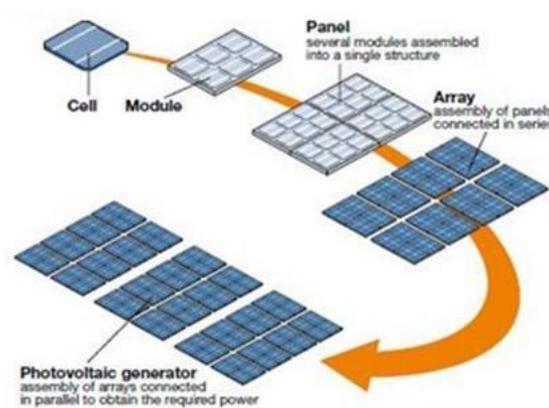
2.5.2 Modul Surya

Modul Surya merupakan peralatan fotovoltaik yang tersusun atas gabungan dari beberapa sel surya yang dapat mengubah energi matahari menjadi listrik berupa arus searah (DC). Modul yang beredar dipasaran memiliki ukuran dan kapasitas yang beragam yang ditunjukkan dalam satuan *watt peak* (Wp). Setiap modul surya dapat dirangkai seri dan paralel berdasarkan kebutuhannya.⁸

⁸ ACCESS, Accelerating Clean Energy Acces to Reduce Inequality, "Modul Pengoperasian PLTS Terpusat," vol. 5, hal 17. Januari. 2022

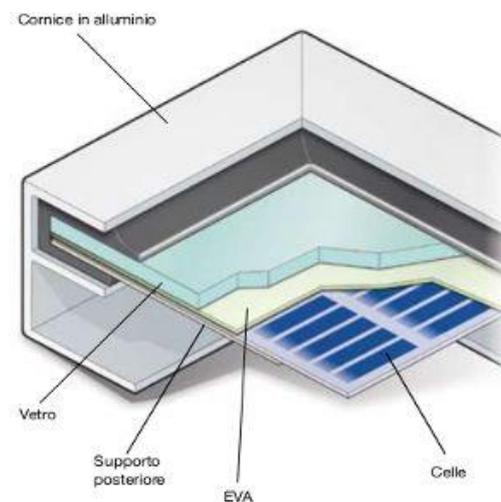
Suatu perhitungan tegangan dan arus operasi total bergantung pada konfigurasi modul surya yang dipasang secara seri atau paralel.

Modul surya merupakan komponen PLTS yang tersusun dari beberapa sel surya yang dirangkai sedemikian rupa, baik dirangkai seri maupun paralel dengan maksud dapat menghasilkan daya listrik tertentu dan disusun pada suatu bingkai (*frame*) dan dilaminasi atau diberikan lapisan pelindung. Kemudian susunan dari beberapa modul surya yang terpasang sedemikian rupa pada penyangga disebut dengan *array*.



Gambar 2. 12 Tahapan Generator Surya

(Sumber : *Buku Pembangkit Listrik Tenaga Surya, 2019*)



Gambar 2. 13 Bagian Modul Surya crystalline silicon

(Sumber : *Buku Pembangkit Listrik Tenaga Surya, 2019*)



Sebagai sebuah komponen penghasil listrik modul surya memiliki karakteristik tertentu yang berdasarkan parameter terukur sebagai berikut :

- a) *Peak power* (W_p), menyatakan daya maksimum yang terjadi pada titik lutut (*knee point*) kurva I-V.
- b) *Peak voltage* (V_{mp}) menyatakan nilai tegangan pada titik lutut kurva I-V.
- c) *Open voltage* (V_{oc}), menyatakan nilai tegangan pada saat terminal positif dan negatif tidak ada beban atau terbuka.
- d) *Peak current* (I_{mp}), menyatakan besarnya arus yang mengalir pada titik lutut kurva I-V.
- e) *Short circuit current* (I_{sc}), menyatakan arus yang mengalir pada saat terminal positif dan negatif dihubung singkat.
- f) *Standard test conditions* (STC), member keterangan bahwa modul surya diuji dengan kondisi test tertentu, seperti iradiasi = $1000W/m^2$, temperatur $250^\circ C$.

Setiap unit modul surya dilengkapi dengan *junction box* permanen yang di dalamnya terdapat *bypass diode*, dimana fungsi dari *bypass diode* adalah apabila terjadi kerusakan pada salah satu modul surya, pengisian dari modul lain masih dapat berjalan. PLTS dibangun dari koneksi seri dan paralel dari modul fotovoltaik individual untuk mencapai tegangan dan arus yang dikehendaki. Pembangkit terdiri dari modul fotovoltaik individual yang terhubung secara seri (*string*) untuk menaikkan tegangan. Setelah tegangan keluaran yang dikehendaki tercapai, sambungan secara seri dari modul fotovoltaik individual dihubungkan secara paralel di dalam kotak penggabung (*combiner box*) untuk menaikkan arus. Keluaran daya yang dikehendaki adalah linear (sebanding) dengan jumlah panel. Oleh karena modul fotovoltaik memiliki keterbatasan tegangan, jumlah panel dan tegangan rangkaian terbuka tidak boleh melebihi tingkat tegangan dari panel individual.

Kualitas sebuah modul surya, antara lain dinilai berdasarkan efisiensinya untuk mengkonversi radiasi sinar matahari menjadi listrik DC. Modul surya yang efisiensinya lebih tinggi akan menghasilkan daya listrik yang lebih besar dibandingkan modul surya yang efisiensinya lebih rendah untuk luasan modul yang sama. Efisiensi modul surya, antara lain bergantung pada material sel fotovoltaik dan proses produksinya. Secara umum, sel fotovoltaik terbuat dari material jenis

crystalline dan *non-crystalline* (film tipis). Untuk jenis *crystalline*, terbagi atas tipe *mono-crystalline* dan tipe *poly-crystalline*, dengan efisiensi konversi sekitar 12-20%. Berikut perbandingan antara *poly-crystalline* dan *mono-crystalline*.



Gambar 2. 14 Solar Panel

(Sumber dari : Pixelsquid)

Tabel 2. 1 Jenis - Jenis Modul Surya⁹

	<i>Monocrystalline</i>	<i>Polycrystalline</i>
Ilustrasi Modul surya		
Biaya	Lebih mahal	Lebih murah
Efisiensi	15-20%	1-2% lebih rendah dari <i>mono-crystalline</i>

⁹ Tetra Tech ES, Inc, Op.Cit., hal. 32.



(Sumber : *Buku Panduan Studi Kelayakan PLTS Terpusat, 2018*)

Ketika iradiasi matahari meningkat hingga 1000 W/m^2 , maka modul surya akan membangkitkan listrik DC hingga kapasitas yang tertera pada “*nameplate*”nya (misal: 250 Wp). Namun demikian, *output* listrik sesungguhnya dari susunan panel bergantung pada kapasitas sistem, iradiasi matahari, orientasi arah (*azimuth*) dan sudut panel, dan berbagai faktor lainnya. Modul surya, yang merupakan komponen penting dalam suatu sistem PLTS, memiliki *output* listrik DC. Namun karena banyak beban listrik yang membutuhkan suplai listrik AC, maka listrik DC yang dihasilkan oleh modul surya harus dikonversi oleh inverter menjadi listrik AC.

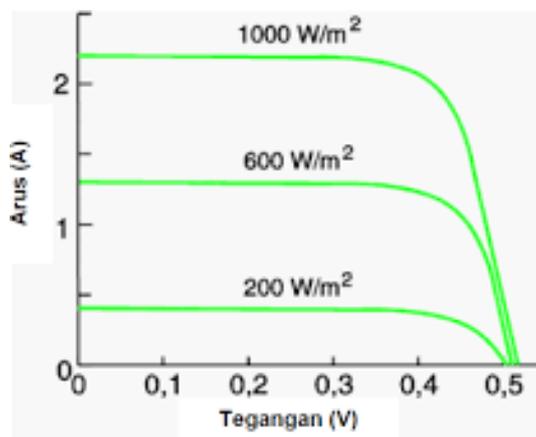
2.5.2.1 Karakteristik Modul Surya

Kinerja sel surya yang terbaik ditunjukkan oleh karakteristik arus tegangan. Oleh karena itu, penting untuk mengetahui tegangan *output* (V) dan arus keluaran (I) dan bagaimana mereka bervariasi untuk hubungan satu sama lain. Daya (P) yang diproduksi oleh sel surya adalah produk dari tegangan (V) dan arus (I) untuk karakteristik operasi tertentu.

Kinerja modul surya digambarkan dengan karakteristik kurva I-V atau kurva arus listrik (I) terhadap tegangan (V). Modul surya akan menghasilkan arus listrik maksimum apabila tidak ada komponen tahanan (R) pada rangkaian, dengan kata lain kutub positif dan kutub negatif dihubungkan singkatkan. Arus maksimum biasa disebut sebagai arus hubung singkat (I_{sc}) dimana terjadi pada saat tegangan modul surya sama dengan nol ($V = 0$).

Sebaliknya tegangan maksimum dihasilkan pada saat rangkaian tidak terhubung. Tegangan ini disebut sebagai tegangan terbuka (V_{oc}), pada kondisi tahanan R sangatlah besar dan tidak ada sama sekali arus yang mengalir karena rangkaian listrik tidak terhubung atau dengan kondisi terbuka. Besaran daya listrik dengan satuan Watt didapatkan dengan cara mengalikan tegangan dan arus listrik ($Watt = Volt \times Ampere$). Daya maksimum umumnya disebut dengan daya puncak dengan notasi m_p , jadi arus listrik pada posisi maksimum dituliskan sebagai I_{mp} dan tegangan sebagai V_{mp} . Kurva arus-tegangan setiap produk modul surya haruslah dibuat pada kondisi standar intensitas cahaya matahari dan temperatur modul surya, dikarenakan keluaran daya dari modul surya ini sangatlah tergantung kepada intensitas cahaya matahari yang jatuh di

permukaan modul surya akan semakin besar arus listrik yang dihasilkan, dengan kata lain intensitas cahaya matahari berbanding lurus dengan keluaran arus listrik, sedangkan temperatur modul surya akan berbanding terbalik dengan keluaran tegangan yang dihasilkan, jadi semakin besar temperatur modul surya, tegangannya akan semakin menurun. Standar kurva I-V suatu modul surya dibuat pada kondisi intensitas cahaya 1000 W/m^2 dan temperatur modul surya 25° C .



Gambar 2. 15 Pengaruh tingkat radiasi pada I-V panel surya
(Sumber : *Buku Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS Off-Grid*)

2.5.3 Solar Charge Control¹⁰

Dalam penggunaan panel surya dengan sistem *off-grid*, terdapat sebuah alat yang penting untuk diperhatikan. Alat tersebut adalah SCC (*Solar charge controller*), yang terintegrasi dan terpasang di antara panel surya dan baterai. SCC adalah sebuah alat elektronik yang berguna mengatur Tegangan dan arus listrik yang masuk ke dalam baterai serta mengontrol tegangan, arus, dan beban yang dikeluarkan.

2.5.3 Jenis-jenis Solar Charge Control

Adapun beberapa jenis dari *Solar charge control* ini, ialah :

1) MPPT (*Maximum Power Point Tracking*)

MPPT ialah Untuk meningkatkan efisiensi panel surya. Dengan menggunakan MPPT, sistem akan dimulai beroperasi pada Titik Daya Maksimum (MPP) dan menghasilkan output daya maksimumnya dengan mendeteksi radiasi maksimum pada matahari yang jatuh ke PV modul. Sehingga menghasilkan biaya sistem secara

¹⁰ Cakrawala96, "Solar Charge Controller: Pengertian, Fungsi, dan Jenisnya," *gesainstech.com*, 2021.

keseluruhan. Dalam kondisi tertentu, MPPT membebankan biaya pengontrol digunakan untuk mengekstraksi maksimum tersedia daya dari modul PV sehingga tegangan pada modul PV dapat menghasilkan maksimum daya yang disebut 'titik daya maksimum'. Perubahan daya maksimum dengan radiasi matahari, suhu lingkungan dan suhu sel surya. Teknik pelacakan titik daya maksimum (MPPT) digunakan untuk meningkatkan efisiensi panel surya. menunjukkan. Demikian tujuan dari MPPT sistem adalah untuk mengambil sampel sel PV *output* dan menerapkannya ke tahanan yang tepat untuk mendapatkan daya maksimum untuk apapun keadaan lingkungan.



Gambar 2. 16 Solar Charge Contol Type MPPT

(Sumber dari : *Epever.com*)

Kelebihan :

- Memiliki efisiensi yang tinggi.
- Cocok digunakan untuk pemasangan panel surya dengan skala besar.
- Ketika baterai dalam keadaan lemah, kinerjanya malah lebih baik.
- Dapat mengambil mengambil daya maksimum dari PV.

2) PWM (*Pulse Width Modulation*)

Tujuan utamanya adalah untuk alihkan perangkat daya pengontrol tata surya dengan menerapkan pengisian baterai tegangan konstan. Pengontrol muatan modern menggunakan PWM untuk memungkinkan jumlah daya yang lebih rendah yang diterapkan ke baterai saat baterai hampir terisi penuh. PWM memungkinkan baterai

untuk terisi penuh dengan lebih sedikit stres pada baterai yang memperpanjang masa pakai baterai. Pengontrol PWM bekerja pada konsep itu ketika sel surya menghasilkan tegangan, tegangan ini adalah kemudian ditunjukkan dengan indikator tegangan. Setelah ini pengukuran, pengontrol tegangan mengontrol tegangan dan dengan demikian dengan menggunakan panel surya tegangan ini baterai terisi.



Gambar 2. 17 Solar Charge Control Type PWM

(Sumber dari : suneducationgroup.com)

Kelebihan :

- Memiliki harga yang lebih ekonomis.
- Cocok digunakan untuk pemasangan panel surya dengan skala kecil.
- Ketika baterai dalam keadaan penuh, kinerjanya malah lebih baik.
- Lebih awat karena PWM menggunakan komponen yang lebih sedikit.

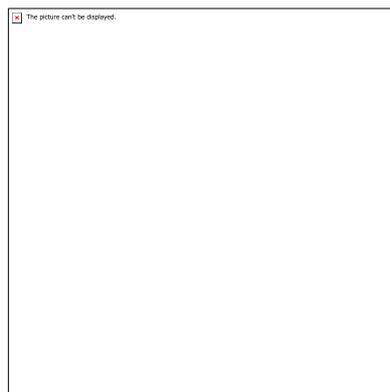
2.5.4 Battery

Baterai (*Battery*) adalah sebuah alat yang dapat merubah energi kimia yang disimpannya menjadi energi Listrik yang dapat digunakan oleh suatu perangkat Elektronik.

Hampir semua perangkat elektronik yang portabel seperti Handphone, Laptop, Senter, ataupun Remote Control menggunakan Baterai sebagai sumber listriknya. Dengan adanya Baterai, kita tidak perlu menyambungkan kabel listrik untuk dapat mengaktifkan perangkat elektronik kita sehingga dapat dengan mudah dibawa kemana-mana. Dalam kehidupan kita sehari-hari, kita dapat menemui dua jenis Baterai yaitu Baterai yang hanya dapat dipakai sekali saja (*Single Use*) dan Baterai yang dapat di isi ulang (*Rechargeable*).

Setiap Baterai terdiri dari Terminal Positif (Katoda) dan Terminal Negatif (Anoda) serta Elektrolit yang berfungsi sebagai penghantar. Output Arus Listrik dari Baterai adalah Arus Searah atau disebut juga dengan Arus DC (*Direct Current*).¹¹

Jika pada penggunaan PLTS ini baterai digunakan untuk menyimpan daya pada sistem pembangkit, dimana suatu pembangkit tenaga surya sangat bergantung pada penggunaan baterai karena listrik yang dihasilkan dari panel surya hanya bergantung pada intensitas cahaya matahari sehingga jika pada malam hari yang tidak terdapat sumber cahaya matahari, energi yang terdapat dari panel surya pada siang hari di simpan melalui baterai agar listrik dapat digunakan pada malam hari melalui cadangan listrik yang disimpan pada baterai tersebut.



Gambar 2. 18 Battery

(Sumber dari : *m.inkuiri.com*)

¹¹ Dickson Kho, "Pengertian Baterai dan Jenis-jenisnya," *teknikelektronika.com*, 2021. <https://teknikelektronika.com/pengertian-baterai-jenis-jenis-baterai/> (accessed June. 8, 2022).

2.5.5 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 (*Solar Cell*). Inverter ini akan sangat bermanfaat apabila digunakan di daerah-daerah yang memiliki keterbatasan pasokan arus listrik AC. Karena dengan adanya *Power Inverter*, kita dapat menggunakan Aki ataupun Sel Surya untuk menggerakkan peralatan-peralatan rumah tangga seperti Televisi, Kipas Angin, Komputer atau bahkan Kulkas dan Mesin Cuci yang pada umumnya memerlukan sumber listrik AC yang bertegangan 220V ataupun 110V.¹²



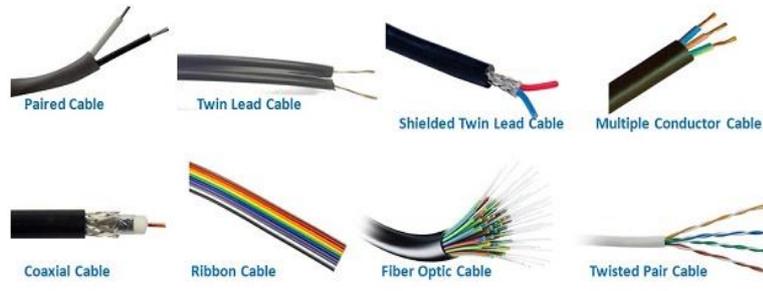
Gambar 2. 19 Inverter
(Sumber dari : suryapanelindonesia.com)

2.5.6 Kabel

Kabel Listrik disebut dengan *electrical cable* adalah media untuk menghantarkan arus listrik yang terdiri dari konduktor dan isolator. Konduktor atau bahan penghantar listrik yang biasanya digunakan oleh kabel listrik adalah bahan Tembaga dan juga yang berbahan Aluminium meskipun ada juga yang menggunakan Silver (perak) dan emas sebagai bahan konduktornya namun bahan-bahan tersebut jarang digunakan karena harganya yang sangat mahal. Sedangkan Isolator atau bahan

¹² Safrizal, "Rancangan Panel Surya Sebagai Sumber Energi Listrik Pada Gedung Fakultas Sains Dan Teknologi Unisnu Jepara", ISSN. 2088-6500. Volume 8 Nomor 2.

yang tidak sulit menghantarkan arus listrik yang digunakan oleh Kabel Listrik adalah bahan *Thermoplastik* dan *Thermosetting* yaitu *polymer* (plastik dan rubber / karet) yang dibentuk dengan satu kali atau beberapa kali pemanasan dan pendinginan.



Gambar 2. 20 Kabel
(Sumber dari : teknikelektronika.com)

Kabel Listrik pada dasarnya merupakan sejumlah *wire* (kawat) terisolator yang diikat bersama dan membentuk jalur transmisi multikonduktor. Dalam pemilihan kabel listrik, sangat perlu memperhatikan beberapa faktor penting yaitu warna kabel listrik, label informasi dan aplikasinya. Informasi yang tercetak di kabel listrik merupakan informasi-informasi penting tentang kabel listrik yang bersangkutan sehingga konsumen dapat menyesuaikan kabel listrik tersebut dengan penggunaan konsumen. Informasi-informasi penting yang tercetak di kabel listrik tersebut diantaranya adalah sebagai berikut :

- **Ukuran Kabel (*Cable Size*)**, yaitu ukuran pada setiap individu *wire* yang terikat bersama pada kabel yang bersangkutan. Berdasarkan ukuran *American Wire Gauge* (AWG), ukuran yang tercetak tersebut diantaranya seperti 8, 10, 12, 14, 16 dan lain-lainnya yang masing-masing angka tersebut mewakili diameter *wire* pada kabelnya. Makin besar angka tersebut makin kecil ukuran *wire* kabelnya. Sedangkan di Indonesia, kita biasanya menggunakan satuan mm^2 seperti 1.5mm^2 , 2.5mm^2 , 4mm^2 , 6mm^2 dan seterusnya.
- **Tegangan nominal**, yaitu tegangan operasional *wire* kabel yang bersangkutan seperti 450/750V yang artinya tegangan nominalnya adalah sekitar 450V hingga 750V.
- **Kode Bahan dan Jumlah *wire* dalam kabel**, beberapa kode kabel yang sering kita jumpai diantaranya seperti NYA, NYAF, NGA, NYM, NYMHY,



NY, NYYHY dan lain-lainnya. Dari kode tersebut kita dapat mengetahui bahan konduktor dan bahan isolator yang digunakan serta jumlah wire konduktornya tunggal atau serabut (lebih dari satu).

2.5.6.1 Jenis-Jenis Kabel Listrik

Berdasarkan bentuknya, kabel listrik ini dapat dibagi menjadi beberapa jenis. Berikut ini adalah jenis-jenis kabel listrik yang sering digunakan untuk menghantarkan arus listrik ataupun kabel-kabel listrik yang berfungsi untuk transmisi data.

- a. **Kabel Berpasangan (*Paired Cable*)**, yaitu kabel yang terbuat dari dua konduktor yang dilasi secara individual. Kabel Berpasangan ini sering digunakan untuk arus listrik DC dan arus listrik AC yang berfrekuensi rendah.
- b. **Kabel *Twin Lead***, yaitu kabel yang terdiri dari dua konduktor dengan bentuk yang mirip dengan pita. Kabel *Twin Lead* ini biasanya digunakan sebagai media transmisi yang menghubungkan Antena dengan Receiver (perangkat penerima sinyal) seperti Radio ataupun Televisi. Kabel *Twin Lead* ini sering disebut juga dengan kabel 300Ω karena impedansinya adalah 300Ω .
- c. **Kabel *Shielded Twin Lead***, kabel jenis ini mirip dengan kabel berpasangan atau *paired cable*, namun pada bagian dalam kabel dikelilingi oleh lapisan logam tipis yang terhubung ke *wire* konduktor ground. Lapisan logam tipis ini berfungsi untuk melindungi kabel dari medan magnet atau untuk menghindari gangguan lainnya yang berpotensi menyebabkan sinyal noise pada kabel yang bersangkutan.
- d. **Kabel Multi Konduktor (*Multiple Conductor Cable*)**, yaitu kabel yang terdiri dari sejumlah konduktor dengan bungkus isolator secara individual yang warna-warni. Kabel jenis ini biasanya digunakan di perangkat listrik rumah tangga ataupun instalasi listrik rumah.
- e. **Kabel Koaksial (*Coaxial Cable*)**, yaitu kabel yang digunakan untuk menghantarkan sinyal frekuensi tinggi. Kabel koaksial memiliki dua konduktor yang mana satu konduktor berada di rongga luar mengelilingi satu konduktor tunggal yang dipisahkan oleh bahan Isolator. Kabel jenis ini memiliki impedansi transmisi yang konstan serta tidak menghasilkan medan magnet sehingga cocok untuk mentransmisikan sinyal frekuensi tinggi.

- f. **Kabel Pita (*Ribbon*)**, kabel jenis ini sering disebut juga dengan Kabel Pelangi dan biasanya digunakan pada aplikasi atau rangkaian elektronik yang memerlukan banyak kawat konduktor sebagai penghubung. Kabel Pita atau Ribbon yang memiliki fleksibilitas tinggi ini umumnya digunakan pada rangkaian yang memerlukan tegangan rendah terutama pada rangkaian sistem digital.
- g. **Kabel Serat optik (*Fiber optic Cable*)**, yaitu kabel yang terbuat dari serat kaca atau plastik halus yang dapat mentransmisikan sinyal cahaya dari satu tempat ke tempat lainnya. Sumber cahayanya dapat berupa sinar Laser ataupun sinar LED. Diameter kabel serat optik sekitar 120 mikrometer.
- h. **Kabel pasangan berpilin (*Twisted pair cable*)**, *Twisted pair Cable* pada dasarnya merupakan sepasang kabel tembaga yang diputar bersama-sama berbentuk spiral dan dibungkus dengan lapisan plastik. *Twisted Pair Cable* ini pada dasarnya dapat dibedakan menjadi dua jenis yaitu Kabel UTP (*unshielded Twisted Pair*) dan STP (*Shielded Twisted Pair*). Diameter Twisted Pair sekitar 0,4mm hingga 0,8mm.

2.5.7 Lampu

Lampu adalah sebuah benda yang berfungsi sebagai penerang, lampu memiliki bentuk seperti botol dengan rongga yang berisi kawat kecil yang akan menyala apabila disambungkan ke aliran listrik.

2.5.7.1 Jenis-Jenis Lampu

- a. Lampu Pijar (*Incandescent lamp*)



Gambar 2. 21 Lampu Pijar
(Sumber dari : teknikelektronika.com)

b. Lampu Lucutan Gas (*Gas-discharge Lamp*)



Gambar 2. 22 Lampu Lucutan Gas
(Sumber dari : teknikelektronika.com)

c. Lampu LED (*Light Emitting Diode*)



Gambar 2. 23 Lampu LED
(Sumber dari : teknikelektronika.com)

2.6 Konfigurasi Panel Surya Seri (S)

Konfigurasi panel surya Seri (S) didasarkan pada pengaturan semua modul surya yang disusun seri. Arus yang mengalir pada rangkaian seri sama dapat dikatakan arus tunggal yang mengalir di seluruh panel surya¹³. Saat konfigurasi panel surya seri bekerja pada kondisi intensitas cahaya matahari yang sama maka semua modul panel surya menghasilkan arus yang sama sedangkan tegangan pada konfigurasi seri yang dihasilkan berbeda-beda.

¹³ M. Amin, J. Bailey, C. Tapia, and V. Thodimeladine, "Comparison of PV array configuration efficiency under partial shading condition," in IEEE 43rd Photovoltaic Specialists Conference (PVSC), 2018



$$V_{mp \text{ total}} = \sum_n^i V = V_1 + V_n \dots\dots\dots (2.1)$$

$$I_{mp \text{ total}} = I_{mp} \dots\dots\dots (2.2)$$

Persamaan (2.1) dan (2.2) menunjukkan di mana $V_{mp \text{ total}}$ dan $I_{mp \text{ total}}$ adalah tegangan dan arus pada daya maksimum dan arus pada daya maksimum dari rangkaian seri, V_{mp} dan I_{mp} adalah tegangan dan arus pada daya maksimum dari masing-masing modul.¹⁴

2.7 Konfigurasi Panel Surya Paralel (P)

Konfigurasi panel surya paralel (P) didasarkan pada pengaturan semua modul disusun secara seri. Jika semua modul yang dihubungkan seri memberikan tegangan tinggi dan arus rendah, sedangkan modul yang dihubungkan paralel menghasilkan tegangan rendah dan arus tinggi. Untuk mendapatkan arus keluaran yang dua kali lebih besar dari arus keluaran modul surya, maka dua buah modul surya harus dihubungkan secara paralel.

$$V_{mp \text{ total}} = V_{mp} \dots\dots\dots (2.3)$$

$$I_{mp \text{ total}} = \sum_n^i I = I_1 + I_n \dots\dots\dots (2.4)$$

Persamaan (2.3) dan (2.4) menunjukkan di mana $V_{mp \text{ total}}$ dan $I_{mp \text{ total}}$ adalah tegangan dan arus pada daya maksimum dan arus pada daya maksimum yang disusun paralel, V_{mp} dan I_{mp} adalah tegangan dan arus pada daya maksimum dari masing-masing modul.

2.8 Perhitungan Daya Output Pembangkit Listrik Tenaga Surya

Daya keluaran panel surya terkonfigurasi seri-paralel merupakan hasil perkalian antara tegangan dan arus terukur. Daya listrik yang dihasilkan oleh sel surya merupakan hasil perkalian dari tegangan keluaran dengan besarnya arus yang mengalir, hubungan tersebut ditunjukkan pada persamaan (2.5).¹⁵

¹⁴ I. R. Handoko, “Praktis Belajar Pembangkit Listrik Tenaga Surya”, hal 200. Juni. 2020.

¹⁵ A. Dita, A. Hamid, H. W. Tri, “Analisa Perbandingan Daya Keluaran Panel Surya Tipe Monokristalin 50wp Yang Dirangakai Seri Dan Paralel Pada Instalasi Plts *Off-Grid*”, ISSN 1411-0814. Vol. 8, No. 1, Mei 2022.



$$P_{out} = V_{out} \times I_{out} \dots\dots\dots(2.5)$$

Pada persamaan (2.5) menunjukkan dimana (P_{out}) adalah daya keluaran dari hasil perkalian (V_{out})tegangan keluaran dengan (I_{out}) arus yang mengalir.