

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)**

Berdasarkan SNI 04-6267.601-2002, Pembangkitan Tenaga Listrik adalah suatu proses, energi listriknya diperoleh dari suatu energi bentuk lain. Berdasarkan SNI 8395:2017, PLTS adalah sistem pembangkit listrik yang energinya bersumber dari radiasi matahari melalui konversi sel fotovoltaik. Sistem fotovoltaik mengubah radiasi sinar matahari menjadi listrik. Semakin tinggi intensitas cahaya 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. Karena listrik seringkali dibutuhkan sepanjang hari, maka kelebihan daya listrik yang dihasilkan pada siang hari disimpan di dalam baterai sehingga dapat digunakan kapanpun untuk berbagai alat listrik. PLTS memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik DC, yang dapat diubah menjadi listrik AC apabila diperlukan. Oleh karena itu meskipun cuaca mendung, selama masih terdapat cahaya, maka PLTS tetap dapat menghasilkan listrik.

##### **2.1.1 Jenis-jenis PLTS<sup>2</sup>**

Umumnya sistem PLTS dapat dibagi berdasarkan :

###### **a. Mode Pengoperasian**

- PLTS *On-Grid* (terhubung ke jaringan listrik)

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

---

<sup>2</sup>Kementrian ESDM RI, *Panduan Pengelolaan Lingkungan Pembangkit Listrik Tenaga Surya*, (2020), hal. 9.

umumnya tidak dilengkapi dengan baterai.

- PLTS *Off-Grid* (tidak terhubung ke jaringan listrik)  
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.

b. Posisi Pemasangan

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



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



- PLTS Terapung



c. Desain sistem

- PLTS Terpusat

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

- PLTS Tersebar/Terdistribusi

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

Menurut IEEE standard 929-2000 sistem PLTS dibagi menjadi tiga kategori, yaitu PLTS skala kecil dengan batas 10 kW atau kurang, skala menengah dengan batas antara 10 kW hingga 500 kW, skala besar dengan batas di atas 500 kW<sup>4</sup>.

Tabel 2.1 Jenis – jenis PLTS<sup>6</sup>

	<b>PLTS <i>Off-Grid</i></b>	<b>PLTS <i>On-Grid</i></b>	<b>PLTS <i>Hybrid</i></b>
Deskripsi	Sistem PLTS yang <i>output</i> daya listriknya secara mandiri menyuplai listrik ke jaringan distribusi pelanggan atau tidak terhubung dengan jaringan listrik PLN.	Bisa beroperasi tanpa baterai, karena <i>output</i> listriknya disalurkan ke jaringan distribusi yang telah disuplai pembangkit lainnya (misalnya	Gabungan dari sistem PLTS dengan pembangkit yang lainnya (mis. PLTD (Pembangkit Listrik Tenaga Disel), PLTB (Pembangkit

<sup>4</sup>Yuni Rohmawati, Sujito, *Pembangkit Listrik Tenaga Surya*, (Malang : Jurusan Pembangkit Tenaga Listrik Universitas Negeri Malang, 2019), hal. 23.

<sup>6</sup>Tetra Tech ES,Inc, *Panduan Studi Kelayakan PLTS Terpusat*, (Jakarta: Indonesia Clean Energy, 2018), hal. 30.

	<b>PLTS <i>Off-Grid</i></b>	<b>PLTS <i>On-Grid</i></b>	<b>PLTS <i>Hybrid</i></b>
		Jaringan PLN).	Listrik Tenaga Bayu)).
Baterai	Ya, supaya bisa memberikan suplai listrik sesuai kebutuhan beban.	Tidak	Bisa <i>off-grid</i> (pakai baterai) atau <i>on-grid</i> (tanpa baterai).
Manfaat	Untuk menjangkau daerah yang belum ada jaringan listrik PLN.	Untuk berbagi beban atau mengurangi beban pembangkit lain yang terhubung pada jaringan yang sama.	Memaksimalkan penyediaan energi dari berbagai potensi sumber daya daerah.
PLTS Terpusat	PLTS yang memiliki sistem jaringan distribusi untuk menyalurkan daya listrik ke beberapa rumah pelanggan. Keuntungan dari PLTS terpusat adalah penyaluran daya listrik dapat disesuaikan dengan kebutuhan beban yang berbeda-beda di setiap rumah pelanggan.		
PLTS Tersebar/ terdistribusi	PLTS yang tidak memiliki sistem jaringan distribusi, sehingga setiap rumah pelanggan memiliki sistem PLTS tersendiri.		
	Contoh PLTS <i>off-grid</i> tersebar: <i>Solar Home System (SHS)</i> .	Contoh PLTS <i>on-grid</i> tersebar: <i>Solar PV Rooftop</i> .	

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

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *off-grid* adalah pembangkit tenaga listrik yang energinya bersumber dari radiasi matahari melalui konversi sel

fotovoltaik 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*<sup>1</sup>.

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 fotovoltaik 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 baterai<sup>3</sup>. 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*). Penggunaan SCC di dalam sistem *DC coupling* diganti dengan inverter jaringan di dalam sistem *AC coupling*.

## 2.2 Konfigurasi PLTS Off-Grid

Konfigurasi kerja yang umum diimplementasikan dalam PLTS *off-grid* ada 2 (dua) sistem yaitu berbasis *DC coupling* dan *AC coupling*. Istilah *coupling* berdasarkan hubungan titik ke titik koneksinya. Umumnya, sistem PLTS *off-grid* terdiri dari dua bagian kelistrikan yang berbeda yaitu sisi arus bolak-balik (arus AC) dan sisi arus searah (arus DC). Ketika sistem PLTS terpusat menerapkan penggunaan fungsi cadangan baterai, ada dua titik koneksi yang dapat dibuat dari

---

<sup>1</sup>Kementrian ESDM RI, *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS OFF-Grid*, (2017), hal. 4.

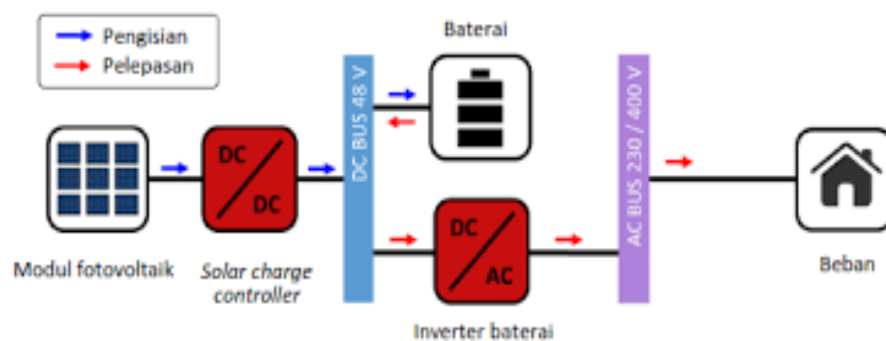
<sup>3</sup>Bagus Ramadhani, *Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya: Dos & Don'ts*, (Jakarta: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 2018), hal. 3.

keluaran *array* modul surya. *Array* dapat terkoneksi ke sisi AC atau sisi DC dari sistem kelistrikan PLTS<sup>1</sup>.

### 2.2.1 Sistem DC Coupling

Sistem dianggap memiliki konfigurasi penyambungan sistem DC (*DC coupling*) jika komponen utamanya terhubung di bus DC. Daya listrik dibangkitkan oleh modul fotovoltaik dan digunakan untuk mengisi baterai melalui *solar charge controller*. SCC adalah pengonversi DC-DC untuk menurunkan tegangan modul fotovoltaik ke level tegangan baterai yang juga dilengkapi dengan *maximum power point tracker* (MPPT) untuk mengoptimalkan penangkapan energi.

Di siang hari, dengan radiasi sinar matahari yang cukup, baterai diisi untuk mencapai kondisi pengisian (SoC, *state of charge*) yang maksimal. Seiring dengan meningkatnya permintaan listrik hingga beban melebihi daya larik fotovoltaik yang terhubung, inverter baterai akan menyalurkan energi dari baterai ke beban dan akan berhenti beroperasi ketika SoC baterai mencapai batas minimum. Sistem *DC coupling* di dilustrasikan pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.1 Gambar Sistem PLTS *off-grid* tipe DC Coupling

(Sumber : Buku Instalasi PLTS Dos & Don'ts)

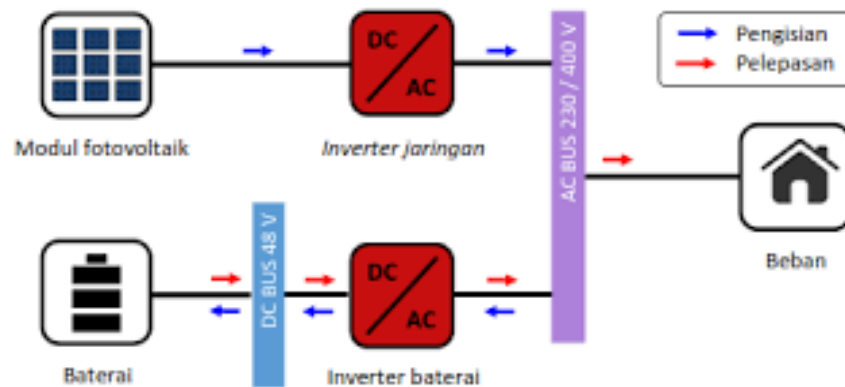
<sup>1</sup>Kementrian ESDM RI, Loc.Cit.

### 2.2.2 Sistem AC Coupling

Komponen utama yang membedakan sistem *AC coupling* dengan *DC coupling* adalah inverter jaringan. Dalam konfigurasi *AC coupling*, modul fotovoltaik dan baterai dihubungkan di bus AC melalui inverter jaringan dan inverter baterai. Modul fotovoltaik terhubung ke inverter jaringan dimana tegangan diubah dari DC ke AC. Serupa dengan *charge controller*, inverter jaringan juga dilengkapi dengan perangkat MPPT untuk mengoptimalkan penangkapan energi. Daya dari rangkaian modul fotovoltaik dapat langsung digunakan oleh beban di siang hari dan kelebihanannya digunakan untuk mengisi baterai melalui inverter baterai pada saat yang sama.

Berbeda dengan sistem *DC coupling*, inverter baterai dalam sistem *AC coupling* bekerja secara dua arah (*bidirectional*). Alat ini berfungsi sebagai pengatur pengisian baterai (*charger*) ketika radiasi sinar matahari cukup, beban terpenuhi, dan baterai belum terisi penuh (SoC rendah). Ketika beban melampaui jumlah daya masukan modul fotovoltaik, biasanya pada malam hari atau saat hari sedang berawan, maka inverter baterai akan beralih menjadi inverter mengubah arus DC-AC sehingga energi dari baterai dapat digunakan untuk memenuhi permintaan beban.

Sistem konversi di sistem *AC coupling* bekerja dalam dua cara. Hal ini menyebabkan rugi-rugi konversi yang lebih besar dibandingkan sistem *DC coupling*. Namun demikian, sistem *AC coupling* lebih menguntungkan jika kemungkinan beban pada siang hari lebih besar karena dalam hal ini kerugian konversi hanya akan terjadi di inverter jaringan. Disisi lain, konfigurasi AC memberi lebih banyak fleksibilitas untuk dengan mudah diperluas dengan tambahan rangkaian modul fotovoltaik atau dijalankan secara hibrida bersama dengan pembangkit listrik lainnya. Mirip dengan sistem *DC coupling*, inverter baterai harus bekerja secara paralel untuk mencapai keluaran daya yang lebih besar. Karena inverter baterai adalah “otak” pembentukan jaringan distribusi di dalam PLTS *off-grid*, harus ada setidaknya satu inverter yang bertindak sebagai “*master*” yang menyediakan referensi tegangan dan frekuensi, sementara inverter baterai sisanya bertindak sebagai “*slave*” yang bergabung di dalam jaringan.



Gambar 2.2 Gambar Sistem PLTS *off-grid* tipe AC Coupling

(Sumber : Buku Instalasi PLTS *Dos & Don`ts*)

### 2.3 Pola Operasi PLTS *Off-Grid*<sup>1</sup>

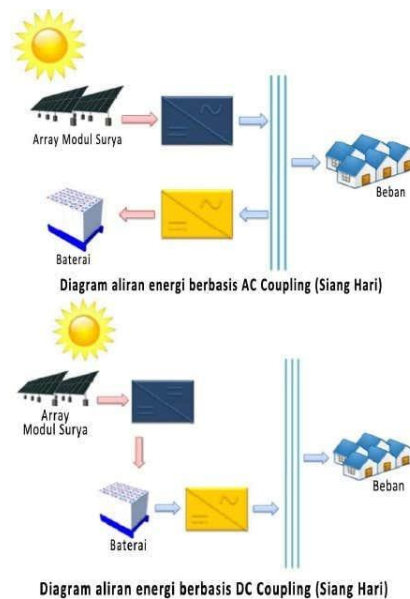
Terdapat 3 (tiga) pola operasi yang umum pada PLTS *off-grid*, yaitu :

#### 2.3.1 Siang hari pada saat energi PLTS *Off-Grid* lebih besar dari kebutuhan beban

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  $1000 \text{ Watt/m}^2$ , apabila efisiensi modul surya sebesar 16% maka daya ideal yang dapat dihasilkan oleh modul surya adalah sebesar  $160 \text{ Watt/m}^2$ . Diagram aliran energi yang dihasilkan pada siang hari dapat dilihat pada gambar 2.3.

<sup>1</sup>Ibid., hal. 4.





Gambar 2.3 Diagram alir energi yang dihasilkan pada siang hari

(Sumber : PT Industri Telekomunikasi Indonesia (Persero))

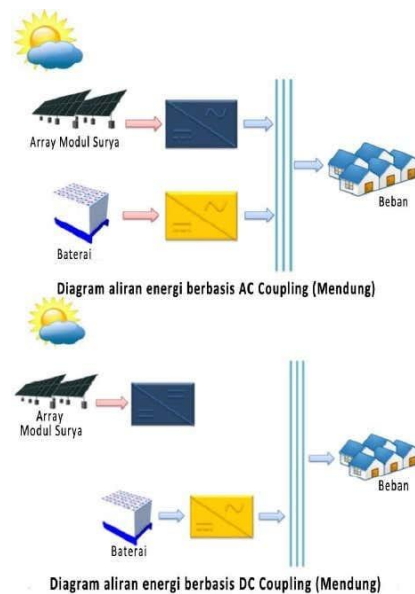
Pada sistem *AC coupling*, energi yang dihasilkan modul surya pada kondisi tersebut langsung disalurkan ke beban (konsumen) melalui inverter *grid-tied*, inverter *on-grid*, apabila beban sudah tercukupi energi berlebih yang dihasilkan modul surya digunakan untuk pengisian baterai melalui inverter baterai / 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.

### 2.3.2 Siang hari pada saat energi PLTS *off-grid* lebih kecil 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 alir energi yang dihasilkan pada kondisi berawan/mendung dapat dilihat pada gambar 2.4.



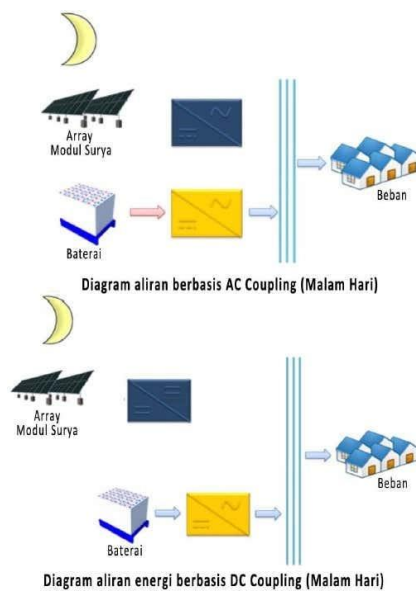
Gambar 2.4 Diagram aliran energi yang dihasilkan pada kondisi berawan/mendung

(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.

### 2.3.3 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 2.5.



Gambar 2.5 Diagram aliran energi pada malam hari

(Sumber : PT Industri Telekomunikasi Indonesia (Persero))

## 2.4 Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off-Grid*

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

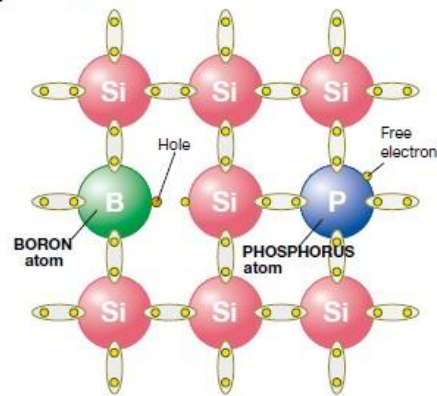
### 2.4.1 Generator Sel Surya (*Photovoltaic Generator*)

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 cm<sup>2</sup>. Silikon memiliki empat elektron valensi (tetravalensi), 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

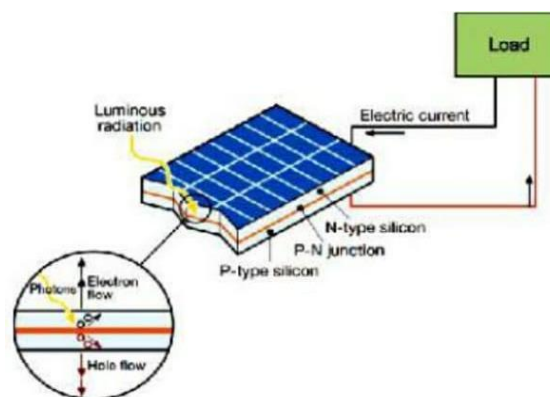
pada sel surya akan terjadi perpindahan elektron dari daerah elektron yang lebih tinggi (N) ke daerah P yang memiliki lubang. Perpindahan ini merupakan aliran arus internal. Apabila pada sambungan terhubung dengan penghantar dan terhubung dengan rangkaian tertutup atau terhubung dengan beban, maka akan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

**Doped silicon**



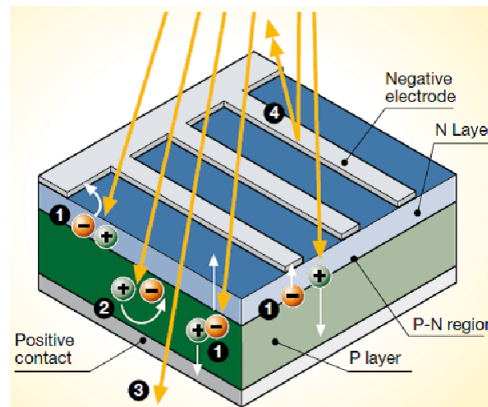
Gambar 2.6 Struktur sel surya

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



Gambar 2.7 Proses kerja sel surya

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



Gambar 2.8 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 :

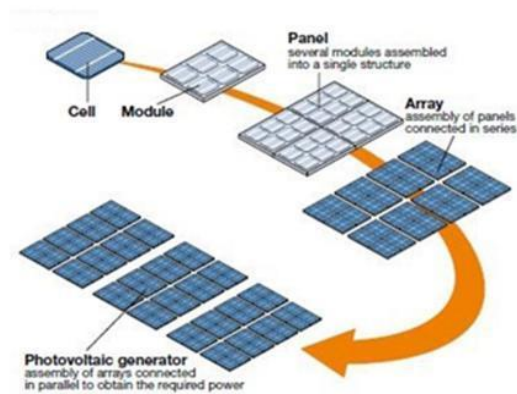
100% dari peristiwa energi matahari yaitu :

- 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.

#### 2.4.2 Modul Surya

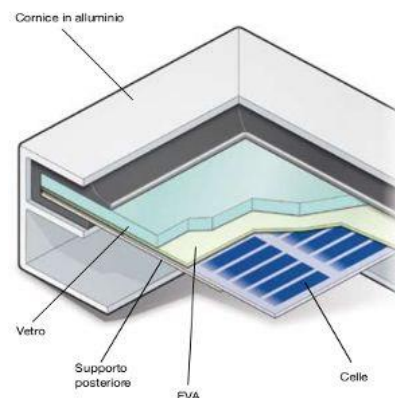
Modul surya merupakan komponen PLTS yang tersusun dari beberapa sel surya yang dirangkai sedemikian rupa, baik dirangkai seri maupun paralel dengan maksud dapat menghasilkan daya listrik tertentu dan disusun pada suatu bingkai

(*frame*) dan dilaminasi atau diberikan lapisan pelindung. Kemudian susunan dari beberapa modul surya yang terpasang sedemikian rupa pada penyangga disebut dengan *array*.



Gambar 2.9 Tahapan Generator Surya

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



Gambar 2.10 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 :



- Peak power* ( $W_p$ ), menyatakan daya maksimum yang terjadi pada titik lutut (*knee point*) kurva I-V.
- Peak voltage* ( $V_{mp}$ ) menyatakan nilai tegangan pada titik lutut kurva I-V.
- 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 dihubungkan singkat.
- f) *Standard test conditions* (STC), member keterangan bahwa modul surya diuji dengan kondisi test tertentu, seperti iradiasi =  $1000\text{W/m}^2$ , temperatur  $250^\circ\text{C}$ .

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 penggabungan (*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*.

Tabel 2.2 Jenis-jenis modul surya<sup>6</sup>

	<i>Monocrystalline</i>	<i>Polycrystalline</i>
Ilustrasi Modul surya	 A square solar panel with a dark blue, uniform surface and two vertical white lines running down the center.	 A square solar panel with a dark blue, textured surface showing a grainy pattern and two vertical white lines running down the center.
Biaya	Lebih mahal	Lebih murah
Efisiensi	15-20%	1-2% lebih rendah dari <i>mono-crystalline</i>

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

Ketika iradiasi matahari meningkat hingga  $1000 \text{ W/m}^2$ , 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.

#### 2.4.2.1 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

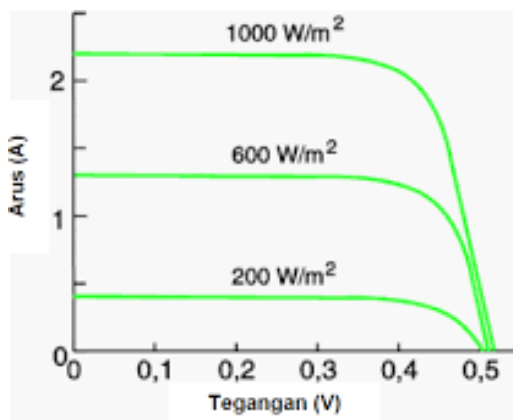
<sup>6</sup>Tetra Tech ES, Inc, Op.Cit., hal. 32.



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. 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  $1000 \text{ W/m}^2$  dan temperatur modul surya  $25^\circ \text{ C}$ .



Gambar 2.11 Pengaruh tingkat radiasi pada I-V panel surya

(Sumber : *Buku Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS Off-Grid*)

#### 2.4.3 Solar Charge Controller (SCC)

*Solar Charge Controller* merupakan peralatan yang digunakan pada sistem PLTS yang dilengkapi dengan penyimpanan (*storage*) cadangan energi listrik. *Charge Controller* adalah perangkat elektronik yang berfungsi untuk mengatur pengisian arus searah (DC) dari panel surya ke baterai yang disebut dengan proses *charge* dan pengaturan penyaluran arus listrik dari baterai menuju beban listrik disebut dengan proses *discharge*. Fungsi utama *charge controller* (biasanya pada sistem PLTS *stand-alone*) adalah untuk menjaga atau mempertahankan baterai dari kemungkinan tertinggi *state of charge* melindungi baterai saat menerima pengisian berlebih (*overcharge*) dari *array*, dengan cara membatasi pengisian energi saat baterai dalam keadaan penuh dan melindungi baterai dari pengosongan berlebih (*overdischarge*) yang dikarenakan beban yang dipikul, dengan cara memutuskan hubungan baterai dengan beban saat baterai menjangkau keadaan *low state of charge*.

Salah satu fitur pada SCC/SCR yang paling bermanfaat untuk *charging* adalah sistem MPPT (*Maximum Power Point Tracker*). Dengan adanya sistem ini, baterai lebih cepat terisi karena modul PV akan selalu beroperasi pada *output* titik daya maksimal, yang bervariasi sesuai dengan iradiasi matahari. Modul PV hanya terhenti menghasilkan daya maksimal ketika baterai sudah mendekati batas

maksimum *charging*. Dengan menggunakan MPPT, keuntungan lainnya adalah sistem tegangan rangkaian seri modul PV tidak perlu sama dengan sistem tegangan baterai. Misal sistem tegangan baterai 24 Vdc, maka sistem tegangan modul PV bisa 36 Vdc atau lainnya. SCC/SCR dapat berupa sebuah unit alat terpisah, atau dapat pula terintegrasi dengan unit DC-AC inverter.



Gambar 2.12 *Solar Charge Controller*

(Sumber : [suneducationgroup.com](http://suneducationgroup.com))

#### 2.4.3.1 Polaritas terbalik pada alat pengatur baterai

Polaritas terbalik pada alat pengatur baterai (*Solar Charge Control*) dapat terjadi pada tahapan berikut ini :

1. Terbaliknya hubungan antara *photovoltaic* dengan *Solar Charge Control*.
2. Terbaliknya hubungan antara baterai dengan *Solar Charge Control*.
3. Terbaliknya hubungan antara *Solar Charge Control* dengan beban.

*Solar Charge Control* yang bermutu baik, akan mempunyai perlindungan terhadap kerusakan *Solar Charge Control* akibat terjadinya polaritas terbalik untuk hubungan *photovoltaic Solar Charge Control* (point 1) dan polaritas terbalik untuk hubungan baterai *Solar Charge Control* (point 2), sedangkan untuk hubungan *Solar Charge Control* beban, proteksi polaritas terbaliknya berada pada beban yang bersangkutan.

Perlindungan terhadap polaritas terbalik untuk hubungan *PV-Solar Charge Control* adalah dilakukan dengan memberikan suatu “*blocking diode*”, yang sekaligus merupakan pencegahan arus balik (*reverse current*) dari baterai menuju *photovoltaic*, sedangkan perlindungan polaritas terbalik untuk hubungan baterai

*Solar Charge Control*, harus dilengkapi dengan beberapa tambahan komponen atau rangkaian elektronik.

#### **2.4.3.2 Alat pengatur baterai PV array**

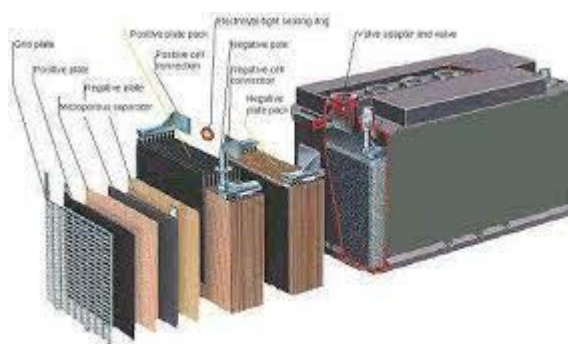
*Photovoltaic array* adalah solar modul dihubungkan secara seri untuk mendapatkan tegangan dan paralel untuk mendapatkan arus di *Solar Charge Control*. Susunan solar modul akan membentuk suatu *array* modul, untuk meningkatkan tegangan dan keluaran arus pada baterai dengan total daya yang tersedia. Biasanya tegangan baterai bank 48 Volt atau 120 Volt DC. Maka sejumlah komponen lain yang diperlukan dengan baik akan melakukan, kontrol, mengkonversi, mendistribusikan, dan menyimpan energi yang diproduksi oleh *photovoltaic array* tersebut. Beberapa pengontrol *charge* mempunyai metering dan data *logging* kemampuan untuk menunjukkan (beban/ tugas) pengontrol adalah suatu pengatur tegangan elektronik, menggunakan di dalam parameter pengoperasian sistem *off-grid* dan sistem *grid-tie* dan status baterai *charge*. Beberapa mempunyai beban baterai rendah *disconnect* untuk mencegah *over discharge*.

#### **2.4.4 Baterai**

Baterai merupakan salah satu komponen yang digunakan pada sistem PLTS yang dilengkapi dengan penyimpanan cadangan energi listrik. Baterai memiliki fungsi untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan oleh panel surya dalam bentuk energi arus searah. Energi yang disimpan pada baterai berfungsi sebagai cadangan (*back up*), yang biasanya dipergunakan pada saat panel surya tidak menghasilkan energi listrik, contohnya pada saat malam hari atau pada saat cuaca mendung, selain itu tegangan keluaran ke sistem cenderung lebih stabil. Satuan kapasitas energi yang disimpan pada baterai adalah *ampere hour* (Ah), yang diartikan arus maksimum yang dapat dikeluarkan oleh baterai selama satu jam. Namun dalam proses pengosongan (*discharge*), baterai tidak boleh dikosongkan hingga titik maksimumnya, hal ini dikarenakan agar baterai dapat bertahan lebih lama usia pakainya (*life time*), atau minimal tidak mengurangi usia pakai yang

ditentukan dari pabrikan. Batas pengosongan dari baterai sering disebut dengan istilah *depth of discharge* (DOD), yang dinyatakan dalam satuan persen.

Banyak tipe dan klasifikasi banterai yang diproduksi saat ini, yang masing masing memiliki desain yang spesifik dan karakteristik performa berbeda sesuai dengan aplikasi khusus yang dikehendaki. Pada sistem PLTS jenis baterai *lead-acid* lebih banyak digunakan, hal ini dikarenakan ketersediaan ukuran (Ah) yang ada lebih banyak lebih murah dan karakteristik performanya yang cocok.



Gambar 2.13 Baterai/aki sebagai penyimpanan energi listrik

(Sumber : *media.neliti.com*)

#### 2.4.4.1 Konstruksi baterai (aki)

Ada 2 jenis aki yang ada di pasaran yaitu aki basah dan aki kering. Media penyimpanan aki basah untuk arus listrik merupakan jenis aki yang paling umum digunakan. Baterai jenis ini masih perlu diberi air baterai, yang dikenal sebagai baterai. Sedangkan baterai jenis kering adalah jenis baterai yang tidak menggunakan cairan, mirip seperti baterai ponsel. Baterai ini tahan terhadap getaran dan suhu rendah.

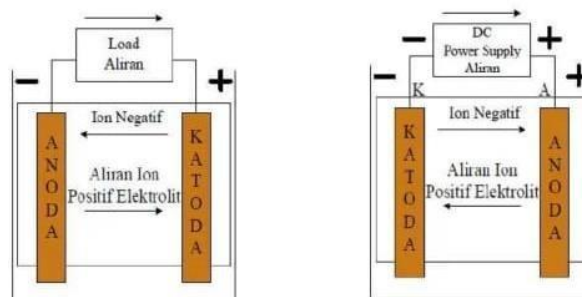
Pada baterai ini terdapat jenis elemen dan sel untuk menyimpan arus yang mengandung asam sulfat ( $H_2SO_4$ ), setiap sel berisi pelat positif dan negatif. Pelat positif mengandung timbal berwarna coklat ( $PbO_2$ ), sedangkan pelat negatif mengandung timbal ( $Pb$ ). Pelat ditempatkan pada batang penghubung. Separator atau pemisah menjadi penyekat antar pelat, dibuat agar asam aki dapat dengan

mudah bersirkulasi di sekitar pelat. Ketika ketiga unsur kimia ini berinteraksi, akan muncul arus listrik. Baterai memiliki 2 kutub / terminal, kutub positif dan kutub negatif.

Biasanya kutub positif (+) lebih besar atau lebih tebal dari kutub negatif (-), untuk menghindari kelalaian jika baterai akan disambungkan ke kabel. Di dalam baterai terdapat level air minimum dan maksimum untuk setiap sel. Jika level baterai di bawah level minimum, akan merusak fungsi sel baterai. Jika air baterai melebihi batas maksimum, akan menyebabkan air baterai menjadi panas dan meluap melalui penutup sel.

#### 2.4.4.2 Prinsip kerja baterai

1. Proses pengosongan sel berlangsung sesuai dengan gambar. Jika sel dihubungkan dengan suatu beban maka elektron mengalir dari anoda melalui beban melalui beban katoda, kemudian ion negatif mengalir ke anoda dan ion positif mengalir ke katoda.
2. Pada proses pengisian sesuai gambar dibawah ini, pada saat sel dihubungkan dengan catu daya maka elektroda positif menjadi anoda dan elektroda negatif menjadi katoda dan proses kimia yang terjadi adalah sebagai berikut :



Gambar 2.14 Pengisian baterai

(Sumber : 123dok.com)

### 2.4.4.3 Cara-cara pengisian baterai

#### 1. Pengisian awal

Pengisian awal adalah pembentukan sel baterai, cara ini hanya dilakukan pada panel surya atau baterai *stationer* dan hanya dilakukan sekali saja.

#### 2. Pengisian kembali

Pengisian kembali adalah pengisian otomatis setelah baterai mengalami pengosongan. Lamanya pengisian kembali akan disensor oleh relai sehingga apabila baterai sudah penuh maka dilanjutkan dengan pengisian arus konstan (*trickle*).

#### 3. Pengisian khusus

Merupakan pengisian baterai *boost charge* dengan memulihkan baterai secara cepat setelah adanya pengosongan yang banyak, misalnya pada sistem operasi *charge* dan *discharge* yang belum mendapatkan catu PLN.

Pada beberapa kondisi kritis, seperti kondisi temperatur rendah digunakan baterai jenis *nickel-cadmium*, namun lebih mahal dari segi pembiyaannya. Pada umumnya baterai penyimpan energi listrik dibagi menjadi dua kategori utama yaitu *primary batteries* dan *secondary batteries*. *Primary batteries* dapat menyimpan dan mengirim energi listrik ke beban namun tidak dapat diisi kembali (*recharge*) seperti baterai tipe *carbon-zinc* dan *lithium*, jenis ini tidak digunakan pada PLTS. *Secondary batteries* dapat menyimpan dan mengirim energi listrik ke beban dan dapat juga diisi kembali (*recharge*) pada sistem PLTS.

### 2.4.5 Inverter

Pengkondisian tenaga listrik (*power condition*) dan sistem kontrol pada sistem PLTS diperankan oleh inverter, yang memiliki fungsi merubah arus listrik searah (*direct current*) yang dihasilkan oleh solar modul menjadi listrik arus bolak balik (*alternating current*) dan dikontrol kualitas dari daya listrik yang dikeluarkan untuk dikirim ke beban atau ke jaringan listrik. Pada PLTS

penggunaan inverter satu fasa biasanya untuk sistem yang bebannya kecil, sedangkan untuk sistem yang besar dan terhubung dengan jaringan utilitas (PLN) biasanya digunakan inverter 3 fasa.



Gambar 2.15 Inverter

(Sumber : [jakartanotebook.com](http://jakartanotebook.com))

Berdasarkan karakteristik dari performa yang dibutuhkan inverter untuk sistem PLTS berdiri sendiri (*stand-alone*) dan PLTS *grid-connected* memiliki karakteristik yang berbeda, yaitu :

- a) Pada PLTS *stand-alone*, inverter harus mampu mensuplai tegangan AC yang konstan pada variasi produksi dari modul surya dan tuntutan beban (*load demand*) yang dipikul.
- b) Pada PLTS *grid-connected*, inverter dapat menghasilkan kembali tegangan yang sama persis dengan tegangan jaringan pada waktu yang sama, untuk mengoptimalkan dan memaksimalkan keluaran energi yang dihasilkan oleh modul surya.

#### 2.4.5.1 Inverter berdasarkan bentuk gelombang

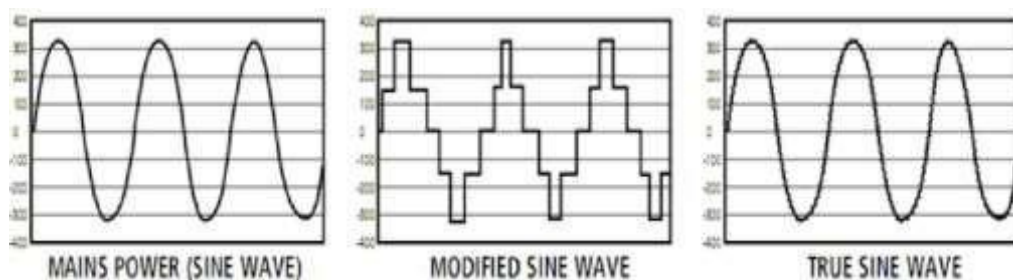
Berdasarkan bentuk gelombang keluaran, inverter biasanya dibagi dalam 2 (dua) golongan, meliputi :

1. Inverter *Modified Sine Wave*, bentuk gelombang sinus keluarannya masih berbentuk sinus persegi, tipe inverter seperti ini harganya murah dan banyak dijual bebas dipasar. Namun inverter jenis ini efisiensinya



rendah (<80%), akibatnya mengkonsumsi daya yang cukup besar. Biasanya ukuran kapasitas Inverter ini tidak terlalu besar (<2KW). Inverter ini kurang cocok diaplikasikan ke alat listrik yang menggunakan motor listrik (pompa, kipas angin).

2. Inverter *Pure/True Sine Wave*, bentuk gelombang sinus keluarannya nyaris berbentuk sinus yang sempurna, tipe inverter seperti ini harganya relatif mahal dan kapasitasnya besar (>1KW). Inverter jenis ini efisiensinya tinggi (>80%), sehingga konsumsi dayanya rendah. Inverter tipe ini sangat tepat diaplikasikan ke alat-alat listrik yang menggunakan motor listrik. Seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini<sup>1</sup>.



Gambar 2.16 Bentuk gelombang inverter

(Sumber : *Buku Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS Off-Grid*)

#### 2.4.6 Struktur Penyangga

Solar modul dirakit menjadi *photovoltaic array* pada struktur penyangga (*mounting structure*). Di struktur penyangga ada beberapa jenis sistem hubungan pemasangan instalasi yaitu seri atau paralel. Struktur penyangga untuk pemasangan modul surya menjadi *array* di lapangan terbuka atau bangunan gedung. Struktur penyangga sebuah rak besar dipasang di atas tanah dimana solar modul dipasang di rak tersebut dan dibuatkan menjadi fotovoltaiik *array*. Sebagai

<sup>1</sup>Kementrian ESDM RI, Op.Cit., hal. 24.

bangunan struktur penyangga *photovoltaic array*, berbagai macam struktur penyangga (*mounting*) telah dikembangkan seperti struktur penyangga miring, struktur penyangga datar yang terintegrasi dengan solar modul dan sesuai kapasitas solar modul yang digunakan. Penyangga modul fotovoltaik di tempatkannya pada rak (*frame*) berbasis dukungan support yang melekat pada tanah atau bangunan diatas gedung. Pondasi *ballasted mounts* seperti cor beton pada tanah atau baja dasar untuk bangunan gedung yang mengamankan peletakan solar modul dalam posisi mengarah irradiasi matahari.

Penyangga modul fotovoltaik harus dipasang dengan benar serta kokoh yang akan memberikan dukungan sistem struktural dari deretan susunan modul fotovoltaik sesuai kebutuhan daya *wattpeaknya*. Pemasangan penyangga modul fotovoltaik untuk terhindar dari kerusakan hembusan angin dan diinduksi kilat serta bahaya cuaca potensial lainnya. Sebuah sistem penyangga modul fotovoltaik dapat dipergunakan untuk mengatur orientasi arah utara atau selatan dan elevasi sudut kemiringan dari sistem. Penyangga modul fotovoltaik untuk memaksimalkan kinerja energi dari modul fotovoltaik tersebut. Biasanya terbuat dari *stainless steel* atau aluminium. Sistem penyangga modul fotovoltaik dirancang untuk aplikasi pemasangan secara universal yaitu bingkai penyangga modul fotovoltaik miring yang dipasang diatas tanah atau atap bangunan gedung. Pemasangan penyangga modul fotovoltaik harus baik dan mudah dipasang. Penyangga modul fotovoltaik dibuat dari kualitas bahan bebas karat atau bahan dengan perlindungan terhadap korosi seperti baja galvanis penyangga modul fotovoltaik harus efektif melindungi kabel-kabel.

Penyangga modul fotovoltaik dibuat dari kualitas bahan bebas karat atau bahan dengan perlindungan terhadap korosi seperti baja galvanis. Penyangga modul fotovoltaik harus efektif melindungi kabel-kabel. Seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.17 Gambar pondasi *fotovoltaic*

(Sumber : *Buku Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS Off-Grid*)

#### 2.4.7 Kotak Penggabung

Fungsi utama kotak penggabung atau (*combiner box*) adalah untuk menggabungkan string fotovoltaik modul agar mendapatkan arus keluaran larik fotovoltaik yang lebih tinggi. Masing-masing string modul *fotovoltaik* dihubungkan pada busbar yang sama dan dilindungi secara elektrik maupun mekanis di dalam selungkup pelindung (*enclosure*). Kotak penggabung umumnya berisi perangkat proteksi arus lebih (*overcurrent protection*), perangkat proteksi tegangan surja (*surge protection device*), busbar atau terminal tambahan, sakelar pemutus arus dan batang pembumian (*grounding bar*). Keluaran gabungan dari kotak penggabung tersebut kemudian dihubungkan langsung ke *solar charge controller* pada sistem *DC coupling* atau ke inverter jaringan pada sistem *AC coupling*.



Gambar 2.18 Gambar Kotak Penggabung

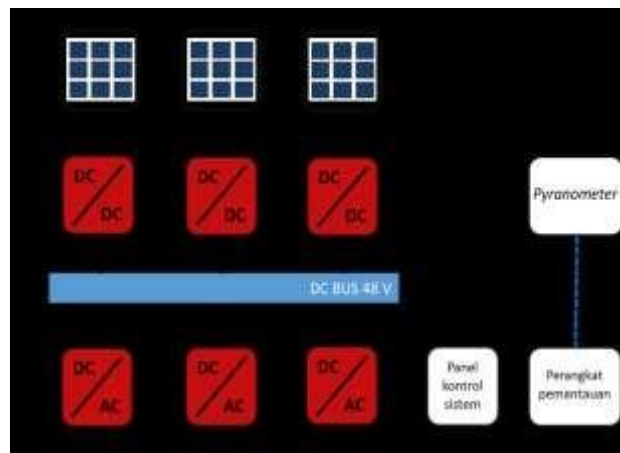
(Sumber : *builder.id*)

Bagian-bagian yang ada di dalam kotak penggabung :

1. Perangkat *proteksi string* modul fotovoltaik digunakan untuk melindungi individual string modul fotovoltaik terhadap arus berlebih. Untuk tujuan ini biasanya digunakan sekering atau MCB.
2. Busbar adalah titik sambungan untuk beberapa *string* modul fotovoltaik. Perangkat ini membawa beberapa *string* ke konduktor yang sama. Busbar DC terbuat dari konduktor tembaga padat 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 tegangan surja (*surge protection device*) digunakan sebagai pengaman terhadap tegangan surja akibat sambaran petir. Perangkat ini dihubungkan ke kutub positif bus DC, kutub negatif bus DC dan pembumian.
5. Selungkup pelindung (*enclosure*) merupakan rumah dari komponen listrik dengan fungsi untuk melindungi komponen dari paparan langsung terhadap lingkungan dan mencegah gangguan 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.

#### **2.4.8 Monitoring System**

Pemantauan (*monitoring*) adalah aktivitas yang sangat penting untuk mengevaluasi kinerja sistem serta mendapatkan masukan untuk perbaikan sistem di masa yang akan datang. Pemantauan dapat juga dikategorikan sebagai pemeliharaan prediktif dimana kinerja sistem diukur secara berkelanjutan selama beroperasi. Pemantauan sistem dapat dilakukan dengan pemeriksaan secara lokal dan/atau dari jarak jauh menggunakan perangkat penyimpan dan pengirim data.



Gambar 2.19 Gambar Sistem Monitoring

PLTS *off-grid* harus dilengkapi alat pemantauan untuk mengawasi kondisi sistem dan untuk melakukan pemeliharaan saat dibutuhkan. Sistem pemantauan jarak jauh secara umum terdiri dari perangkat pemantauan sebagai pusat data dari perangkat individu serta panel kontrol sistem. Proses pemantauan dilakukan dengan mengambil data seperti tegangan dan arus dari tiap perangkat elektronik daya, data iradiasi dari *pyranometer* kemudian mengirim data ke perangkat pemantauan melalui kabel komunikasi. Selanjutnya, data tersebut dapat secara langsung divisualisasikan, disimpan di data logger atau ditransmisikan pada data cloud apabila terdapat sinyal GSM/GPRS.

#### 2.4.9 Panel Distribusi AC

Panel distribusi AC atau dikenal juga sebagai *AC power distribution box* (ACPDB) digunakan untuk membagi dan mendistribusikan daya dari inverter baterai untuk dialirkan pada beban melalui beberapa lateral penyulang (*sub-feeder*). Panel ini adalah tempat di mana inverter baterai terhubung secara paralel untuk menggabungkan daya keluaran serta perangkat proteksi dari seluruh penyulang. Panel distribusi AC dapat dikonfigurasi dalam susunan satu fasa atau tiga fasa, tergantung pada kapasitas dan topologi sistem. Ada pula komponen yang berada didalam panel distribusi AC :

1. Selungkup (*enclosure*) sebagai rumah perangkat proteksi dan busbar.

2. Busbar merupakan titik interkoneksi antara inverter baterai, inverter jaringan serta *feeder* keluar. Umumnya, empat busbar yang terdiri dari tiga kabel dan satu netral digunakan untuk konfigurasi tiga-fasa, sedangkan dua busbar yang terdiri dari satu line dan satu netral untuk konfigurasi satu-fasa.
3. Meteran energi untuk mengukur total energi yang sudah diproduksi oleh PLTS dan telah digunakan oleh beban.
4. *Current transformer* (CT) atau transformator arus digunakan sebagai pengukur arus untuk meteran energi. Alat ini mengukur arus dari tiap fasa dan mengonversinya menjadi arus yang lebih rendah sehingga terbaca oleh meteran energi.
5. Timer dan kontaktor mengatur waktu operasional lampu jalan. Biasanya lampu jalan hanya beroperasi selama lima jam waktu malam hari.
6. *Miniature circuit breaker* (MCB) melindungi kabel masuk dari inverter baterai dan *feeder* keluar menuju jaringan distribusi.
7. Sekering untuk memutus pengukuran tegangan dari busbar apabila ada hubungan arus pendek tiba-tiba atau kerusakan pada meteran energi.
8. Perangkat proteksi tegangan surja - *surge protection device* (SPD) atau *lightning arrester* digunakan untuk melindungi perangkat AC dari tegangan surja atau sambaran petir.
9. *Earth-leakage circuit breaker* (ELCB) atau gawai pemutus arus sisa mencegah orang terkena sengatan listrik akibat kontak langsung pada komponen konduktif. ELCB akan trip seandainya aliran arus total semua fasa tidak sama dengan aliran arus yang kembali lewat netral atau terdapat arus sisa yang lebih besar dari rating ELCB (biasanya 30 mA untuk *proteksi* terhadap manusia).
10. Batang pembumian (*grounding bar*) memberikan pembumian pada selungkup, perangkat proteksi surja, serta transformator arus.



Gambar 2.20 Gambar Panel Distribusi AC

(Sumber : *rekasurya.com*)

#### **2.4.10 NODEMCU ESP32**

NODEMCU adalah sebuah platform IoT yang bersifat *opensource*. Terdiri dari perangkat keras berupa *system on chip* ESP32, juga *firmware* yang menggunakan bahasa pemrograman *scripting lua*. Istilah NODEMCU secara *default* sebenarnya mengacu pada *firmware* yang digunakan daripada perangkat keras *development kit*.

#### **2.4.11 Automatic Transfer Switch (ATS)**

Saklar pemindah secara otomatis (*automatic transfer switch*) di saat inverter baterai terhubung ke sumber daya lain seperti jaringan listrik eksternal atau pembangkit listrik eksternal. Jaringan listrik eksternal atau pembangkit listrik eksternal dapat digunakan sebagai cadangan ketika kondisi penyimpanan daya baterai sedang rendah.



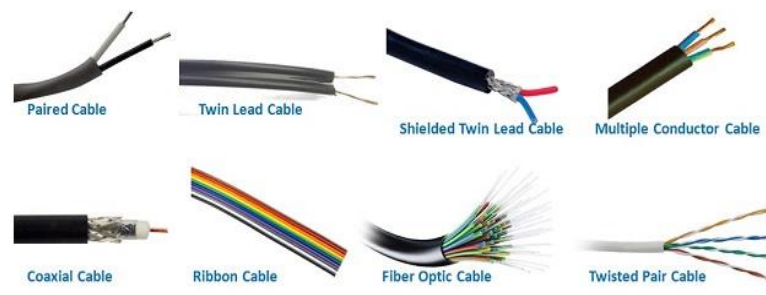
Gambar 2.21 *Automatic Transfer Switch (ATS)*

(Sumber : *blibli.com*)

#### 2.4.12 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 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 2.22 Kabel

(Sumber : [www.teknikelektronika.com](http://www.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<sup>2</sup> seperti 1.5mm<sup>2</sup>, 2.5mm<sup>2</sup>, 4mm<sup>2</sup>, 6 mm<sup>2</sup> 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, NYY, NYHY 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).

#### 2.4.12.1 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  $300\Omega$  karena impedansinya adalah  $300\Omega$ .
- 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 bungkusan 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.

### 2.4.13 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.

#### 2.4.13.1 Jenis-jenis Lampu Listrik

- a. Lampu Pijar (*Incandescent lamp*)



Gambar 2.23 Lampu Pijar

(Sumber : [www.teknikelektronika.com](http://www.teknikelektronika.com))

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



Gambar 2.24 Lampu Lucutan Gas

(Sumber : [www.teknikelektronika.com](http://www.teknikelektronika.com))

c. Lampu LED (*Light Emitting Diode*)



Gambar 2.25 Lampu LED

(Sumber : [www.teknikelektronika.com](http://www.teknikelektronika.com))

## 2.5 Efisiensi Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Efisiensi dapat diartikan sebagai salah satu ukuran dalam menentukan keberhasilan didalam sebuah kegiatan yang berdasar pada besarnya nilai sumber daya yang dimanfaatkan guna mencapai hasil yang diharapkan. Semakin kecil sumber daya yang dimanfaatkan untuk mencapai hasil yang diharapkan, maka proses tersebut dapat dikatakan efisien. Efisiensi *photovoltaic* merupakan sebuah perbandingan antara *output* listrik dari sel surya dengan energi berupa cahaya matahari. Energi matahari ini sering disebut iradiasi atau intensitas radiasi matahari berupa sinar dan gelombang yang dapat membuat *photovoltaic* dapat menghasilkan energi listrik. Efisiensi ini merupakan presentasi dari kinerja *photovoltaic* dalam menghasilkan energi listrik. Ada 2 (dua) perhitungan yang diperlukan untuk mengetahui efisiensi dari *photovoltaic*, yaitu :

### 2.5.1 Perhitungan Daya Masukan dan Daya Keluaran

Daya yang diterima (daya *input*), di mana daya tersebut adalah perkalian antara intensitas radiasi matahari yang diterima dengan luas area modul PV dengan persamaan 2.1 :

$$P_{in} = I_r \times A \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana :

- $P_{in}$  = Daya *Input Photovoltaic* (W)
- $I_r$  = Intensitas Cahaya Matahari ( $W/m^2$ )
- $A$  = Luas Penampang *Photovoltaic* ( $m^2$ )

Intensitas cahaya adalah flux cahaya yang jatuh pada  $1m^2$  dari bidang itu. Dimana  $1 \text{ lux} = 1 \text{ lumen per } m^2$ , dan  $1 \text{ lumen} = 0,0015 \text{ Watt}$  (P. Van Harten, 1995). Maka,  $I_r$  juga dapat dihitung dengan menggunakan persamaan 2.2 berikut:

$$I_r = \text{lux} \times 0,0015 \dots\dots\dots(2.2)$$

Dimana :

- $I_r$  = Iradiasi Matahari ( $Watt/m^2$ )

$$P_{out} = V_{out} \times I_{out} \dots \dots \dots (2.3)$$

Dimana :

- $P_{out}$  = Daya Output Photovoltaic (W)
- $V_{out}$  = Tegangan keluaran PV (V)
- $I_{out}$  = Arus keluaran PV (I)

Sehingga nilai efisiensi dari sebuah modul *photovoltaic* dapat dihitung dengan rumus :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100 \% \dots \dots \dots (2.4)$$