



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terpusat (PLTS Terpusat)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah suatu proses, energi listriknya diperoleh dari suatu energi bentuk lain. Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) fotovoltaik adalah sistem pembangkit listrik yang energinya bersumber dari radiasi matahari melewati konversi sel fotovoltaik. Terpusat adalah sistem kelistrikan yang tidak terhubung dengan jaringan listrik umum. Jadi dapat diartikan bahwa Pembangkit Listrik Tenaga Surya Fotovoltaik terpusat yang selanjutnya dalam buku ini disebut PLTS terpusat adalah pembangkitan tenaga listrik yang energinya bersumber dari radiasi matahari melalui konversi sel fotovoltaik dimana sistem kelistrikannya tidak terhubung dengan jaringan listrik umum.

Suatu PLTS terpusat 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 terpusat yang umum digunakan yang akan dijelaskan dalam bab ini, yaitu sistem penyambungan AC atau *AC-coupling* dan penyambungan DC atau *DC-coupling*.⁵

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

⁵ Mulayana, Rida. 2017. *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS OFF-Grid*. Jakarta: Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia

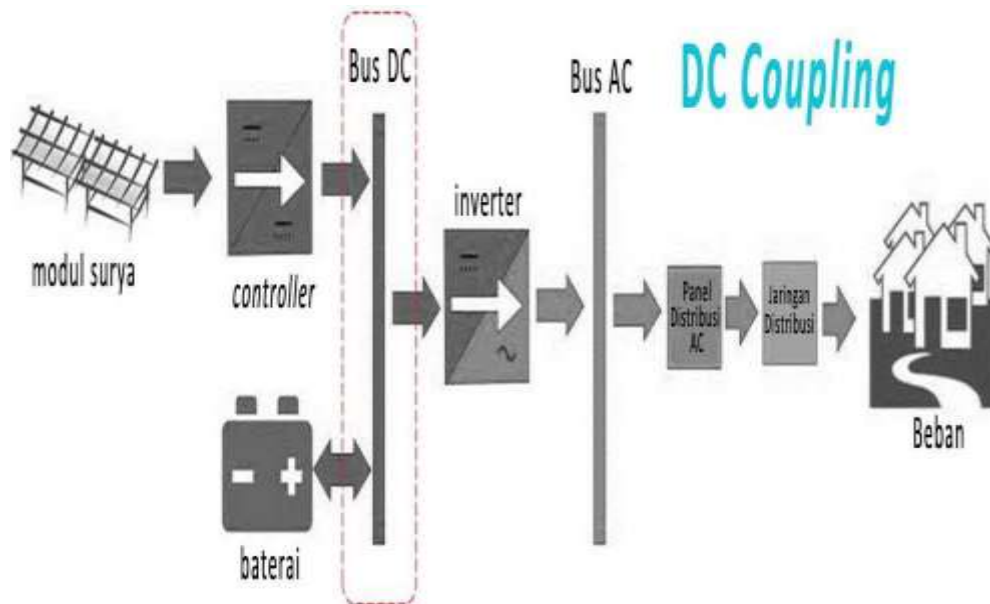


beban, maka kelebihan daya yang akan dikonversi kembali ke DC oleh inverter baterai dan energi akan disimpan dalam baterai.⁶

2.2 Konfigurasi PLTS Terpusat

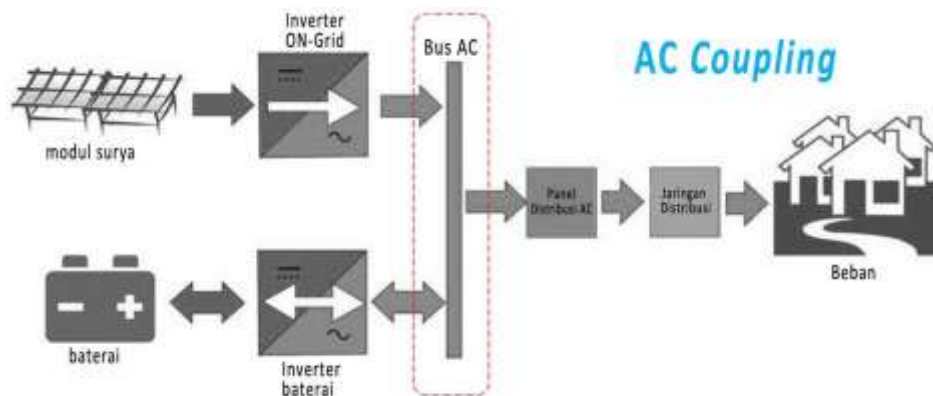
Konfigurasi kerja yang umum diimplementasikan dalam PLTS terpusat ada 2 (dua) sistem yaitu berbasis *DC coupling* dan *AC coupling*. Istilah *coupling* berdasarkan hubungan titik ke titik koneksinya. Umumnya, sistem PLTS terpusat terdiri dari dua bagian kelistrikan yang berbeda yaitu sisi arus bolak-balik (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 keluaran array modul surya. *Array* dapat terkoneksi ke sisi AC atau sisi DC dari sistem kelistrikan PLTS.

Sistem *AC Coupling* dan *DC Coupling* di ilustrasikan pada gambar dibawah ini :



Gambar 2.1 Gambar Sistem PLTS off-grid tipe DC Coupling

⁶ Ramadhani, Bagus. 2018. *Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya: Dos & Don'ts*. Jakarta: Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).



Gambar 2.2 Gambar Sistem PLTS off-grid tipe AC Coupling

2.2.1 AC Coupling

Pada sistem *AC Coupling* titik koneksi berada pada sisi AC. Pada jenis sistem ini, inverter grid-tied / inverter on-grid (inverter yang terhubung ke jaringan AC) bertanggungjawab dalam 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 akan tetap teraliri listrik meski saat matahari tidak bersinar. Porsi 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 kritis melalui inverter *grid-tied* baru kemudian ke baterai melalui inverter baterai (pada situasi ini, *inverter* baterai berfungsi sebagai *charging* untuk baterai).

Penting untuk diketahui bahwa inverter baterai pada aplikasi *AC Coupling* memiliki fungsi 2 (dua) arah sebagai berikut:

- Pertama sebagai *rectifier* dengan melakukan *charging* baterai (AC ke DC).
- Kedua sebagai inverter untuk baterai (DC ke AC). Hal ini menjadikan inverter baterai pada sistem *AC Coupling* disebut juga dengan istilah *Bidirectional Inverter*.



Ketika PLTS kehilangan suplai energi matahari, inverter baterai akan memutus inverter *grid-tied* dari sistem kelistrikan kemudian inverter baterai akan mengambil alih sinkronasi dengan menyuplai tegangan listrik AC ke utilitas. Pada situasi ini, *Bidirectional* Inverter menjalankan fungsi inverter untuk baterai.

2.2.2 DC Coupling

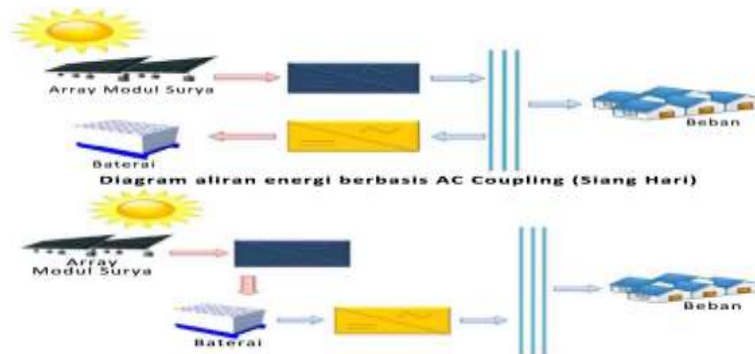
Sistem *DC Coupling* terkoneksi ke sisi arus searah (DC) dari sistem kelistrikan PLTS *off-grid*. Pada sistem ini *charge controller* mengatur energi matahari yang terserap oleh array modul surya melalui MPPT. Energi keluaran dari charge controller terhubung melalui busbar DC ke sistem baterai sebagai penyimpan energi. Baterai terhubung ke inverter yang bertugas mengkonversi arus searah (DC) ke arus bolak-balik (AC). Selanjutnya arus AC dialirkan dari inverter ke beban AC.

2.3 Pola Operasi PLTS Terpusat

Terdapat 3 (tiga) pola operasi yang umum pada PLTS terpusat, yaitu:

2.3.1 Siang hari pada saat energi PLTS terpusat lebih besar dari beban

Besar energi yang dihasilkan oleh PLTS terpusat sangat tergantung kepada intensitas penyinaran matahari yang diterima oleh modul surya dan efisiensinya. Intensitas matahari maksimum mencapai 1000 Watt/m^2 , apabila efisiensi modul surya sebesar 16% maka daya ideal yang dapat dihasilkan oleh modul surya adalah sebesar 160 Watt/m^2 . Diagram aliran energi yang dihasilkan pada siang hari dapat dilihat pada Gambar 2.3.



Gambar 2. 3 Gambar Aliran Energi yang dihasilkan pada Siang Hari



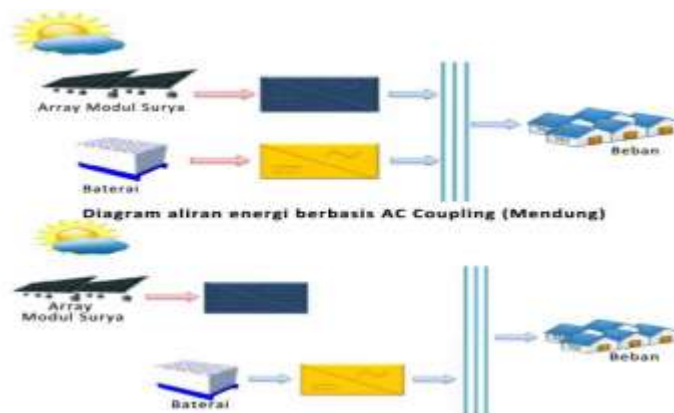
Pada sistem *AC Coupling*, energi yang dihasilkan modul surya pada kondisi tersebut langsung disalurkan konsumen melalui inverter *grid-tied* atau *inverter on-grid*, apabila beban sudah tercukupi energi berlebih yang dihasilkan modul surya digunakan untuk pengisian baterai melalui inverter baterai atau inverter *bidirectional*. Pada sistem *DC Coupling*, energi yang dihasilkan modul surya pada kondisi tersebut digunakan untuk mengisi baterai melalui *Solar Charge Controller* terlebih dahulu, baru kemudian disalurkan konsumen melalui *inverter*.

2.3.2 Siang hari pada saat energi PLTS terpusat lebih kecil dari beban

Kondisi ini dapat terjadi apabila :

- Saat kondisi berawan atau mendung.
- Saat sore hari menjelang matahari terbenam PLTS terpusat akan menghasilkan energi listrik dari matahari namun tidak maksimal.

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



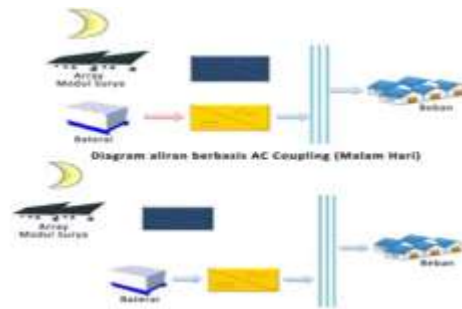
Gambar 2.4 Gambar Aliran Energi yang dihasilkan pada Kondisi Berawan/Mendung

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*.



2.3.2 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 dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2. 5 Gambar Aliran Energi pada Malam Hari

2.4 Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan suatu kesatuan sistem yang terdiri dari beberapa komponen, berikut komponen kompoenen yang akan digunakan.⁵

2.5 Solar Cell

Fotovolta atau *photovoltaic* berasal dari perkataan Yunani Foto yang dimaksud “cahaya”, dan “*voltaiic*”, bermaksud listrik. Voltan pula diambil sesuai nama ahli Fisika Itali bernama Alessandro Volta. Istilah foto-voltan telah digunakan sejak 1849. Teknologi fotovolta beroperasi tidak bising,, tidak mengeluarkan bahan pencemar,bersih, mempunyai tingkat kepercayaan yang tinggi, ongkos pemeliharaan rendah, dan mempunyai jangkai pakai yang panjang, selama 20 hingga 30 tahun. Sel-

⁵ Mulayana, Rida. 2017. *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS OFF-Grid*.



sel surya yang digabungkan dan dijadikan satu panel atau modul. Modul-modul ini dapat disambung seperti baterai baik dalam bentuk seri atau paralel yang dikenal sebagai tata pengaturan surya, tergantung pada jumlah kuasa yang diperlukan. Tenaga yang diperlukan untuk membangun panel atau modul cukup tinggi. Walau bagaimanapun, tenaga yang dikeluarkan oleh panel setelah beroperasi selama 4 tahun dapat menggantikan jumlah tenaga yang diperlukan untuk membangun panel tersebut. Jika diambil waktu pakai 25 tahun, maka setelah 4 tahun beroperasi, panel akan mengeluarkan tenaga hampir 20 tahun tanpa mengeluarkan ongkos membuatnya. Ini bermakna sel surya akan menjadi pengeluar tenaga net-sel surya menghasilkan lebih tenaga sepanjang masa sel pakai sel surya tersebut dibandingkan dengan tenaga yang diperlukan untuk menghasilkan sel surya tersebut.⁷

Sel surya fotovoltaik merupakan suatu alat yang dapat mengubah energi sinar matahari secara langsung menjadi energi listrik. Pada dasarnya sel tersebut merupakan suatu dioda semikonduktor yang bekerja menurut suatu proses khusus yang dinamakan proses tidak seimbang (*non-equilibrium process*) dan berlandaskan efek (*photovoltaic effect*).⁴

Jenis sel surya fotovoltaik atau sel *photovoltaic* (PV) yang saat ini umum dipakai adalah tipe *silicon crystalline* dan sel surya *thin film*. Sel surya tipe *silicon crystalline* terdiri dari bahan semikonduktor seperti *mono-crystalline* dan *poly-crystalline*. Untuk sel surya tipe *thin film* terdiri dari *cadmium telluride* (CdTe), *Copper Indium Gallium Diselenide* (CIGS), and *amorphous thin-film silicon* (a-Si, TF-Si) yang dapat mengubah efek *photovoltaic* pada irradiasi sinar matahari menjadi listrik.

Ketika sel surya menyerap sinar matahari, akan terjadi perpindahan elektron bebas di sambungan negatif dan positif sel-selnya. Apabila sambungan positif dan

⁷ Supranto. 2015. *Teknologi Tenaga Surya*. Yogyakarta : Global Pustaka Utama Yogyakarta

⁴ Kadir, Abdul. 2005. *Energi Sumber daya, Inovasi, Tenaga Listrik dan Potensi*. Jakarta :



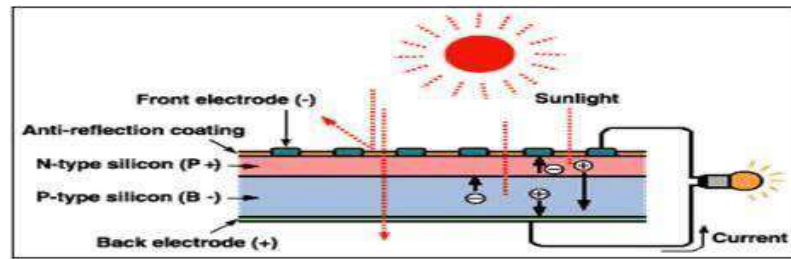
negatif dari sel surya terhubung ke beban arus searah (rangkaiannya peralatan listrik 2 DC) maka arus akan mengalir kerangkaian beban DC.



Gambar 2.6 Gambar Solar Cell (*Photovoltaic*)

2.5.1 Proses Reaksi Sel Surya Pada Efek *Photovoltaic*

Efek *photovoltaic* merupakan akibat terciptanya tegangan atau arus listrik setelah terpancar sinar matahari dalam bahan semikonduktor modul surya. Standar efek *photovoltaic* secara langsung terkait dengan efek fotolistrik. Ketika sinar matahari atau insiden cahaya lain pada permukaan material, elektron hadir dalam pita valensi yang menyerap energi dan antusias melompat ke pita konduksi dan menjadi elektron bebas. Elektron non termal menyebar, dan beberapa mencapai ke junction box menghasilkan gaya gerak listrik, dan dengan demikian sebagian energi cahaya diubah menjadi energi listrik. Efek *photovoltaic* juga dapat terjadi ketika dua foton diserap secara simultan dalam proses yang disebut efek *photovoltaic* dua foton. Proses kerja solar sel dalam menghasilkan tenaga, tegangan serta arus. Tegangan yang dihasilkan dalam sel surya dengan proses konversi tumbukan elektron – elektron yang dikenal sebagai "efek *photovoltaic*". Penggumpalan intensitas irradiasi cahaya yang dihasilkan oleh persimpangan PN menyebabkan pergerakan elektron ke sisi tipe-n dan ke lubang atau hole ke sisi tipe-p pada persimpangan kovalen bond. Pada gambar dibawah ini menjelaskan mengenai efek *photovoltaic*.



Gambar 2.7 Gambar Efek *Photovoltaic*

2.6 Modul Surya

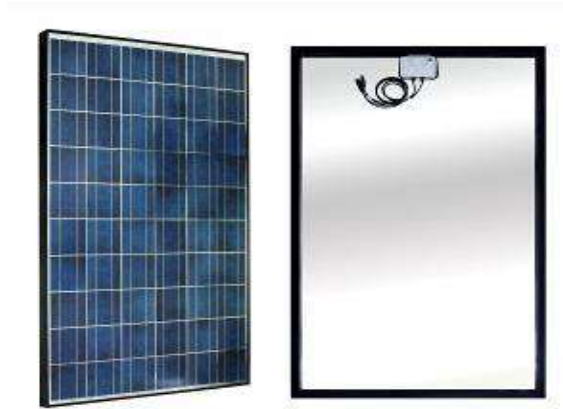
Photovoltaics atau Solar PV adalah Modul yang mengkonversi langsung cahaya matahari menjadi arus listrik. Bahan-bahan tertentu, seperti silikon, secara alami melepaskan elektron ketika mereka terkena cahaya, dan elektron ini kemudian dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan arus listrik. Panel *photovoltaics* menghasilkan arus listrik searah/*direct current* (DC), yang harus dikonversi ke arus listrik AC (*Alternating Current*), sebuah inverter digunakan untuk mengubah listrik DC menjadi listrik AC untuk menjalankan peralatan rumah tangga standar yang umumnya bertegangan 220 Volt. Jumlah listrik yang dihasilkan inverter diukur dalam Watt (W). Dengan asumsi efisiensi power inverter 90%, untuk menentukan kebutuhan listrik cadangan.

2.6.1 Definisi Modul Surya

Modul surya adalah sekelompok sel surya yang dirangkai dan dihubungkan secara seri maupun paralel. Modul surya dikemas dalam sebuah laminasi pelindung terhadap lingkungan. Daya modul surya dalam besaran satuan wattpeak yang dikombinasikan jumlah sel surya terpasang pada modul surya tersebut. Pada umumnya modul surya mampu bertahan 20 hingga 25 tahun, khususnya untuk modul *monosingle crystalline*. Modul tipe ini dirancang untuk masa operasi 30 tahun pada saat perancangan dengan acuan kondisi laboratorium pengujian. Sel-sel silikon itu sendiri tidak mengalami kerusakan atau degradasi bahkan setelah puluhan tahun pemakaian. Namun demikian, output modul akan mengalami penurunan dengan berjalannya waktu. Degradasi ini diakibatkan oleh dua faktor utama yaitu rusaknya



lapisan atas sel Ethylene Vynil Acetate (EVA) dan lapisan bawah (*Polyvinyl Fluoride Film*) secara perlahan-lahan, serta kerusakan secara alami EVA yang terjadi secara bertahap di antara lapisan gelas dan sel-sel itu sendiri. Seperti ditunjukkan pada gambar Dibawah ini.



Gambar 2.8 Gambar Modul Surya

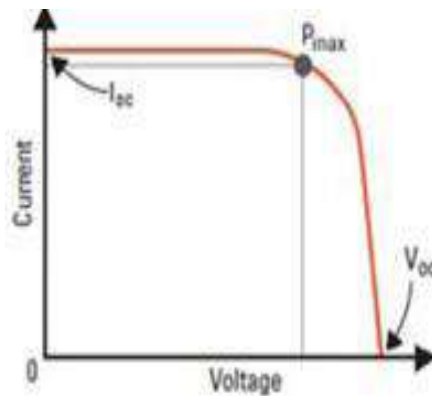
2.6.2 Kurva Arus Dan Tegangan

Seperti yang sudah dibahas diatas sel surya atau sel *photovoltaic* merupakan suatu alat yang dapat mangubah energi radiasi matahari secara langsung menjadi energi listrik. Pada dasarnya sel tersebut berjenis diode yang tersusun atas P – N junction. Sel surya *photovoltaic* yang dibuat dari bahan semi konduktor yang diproses sedemikian rupa, yang dapat menghasilkan listrik arus searah. Dalam penggunaannya, sel-sel surya itu dihubungkan satu sama lain, sejajar atau seri, tergantung dari penggunaannya, guna menghasilkan daya dengan kombinasi tegangan dan arus yang dikehendaki. Kurva ini merupakan plotting arus dan tegangan, dari arus hubungan singkat (Isc) sampai tegangan sirkuit terbuka (Voc). Performa modul surya dapat dihitung dengan mengalikan arus dan tegangan pada titik-titik di kurva tersebut. Kurva I – V dihasilkan dari percobaan *solar cell* atau modul surya yang dikenai paparan iradiasi. Kurva I – V melewati 2 (dua) titik utama, yaitu arus hubungan singkat (Isc) dan tegangan sirkuit terbuka (Voc). Arus hubungan singkat adalah arus yang dihasilkan ketika terminal positif dan negatif dihubungkan secara



langsung. Nilai nol pada hambatan membuat nilai tegangan juga bernilai nol. Sebaliknya tegangan sirkuit terbuka terjadi ketika terminal positif dan negatif berada dalam kondisi terbuka, sehingga tidak ada arus yang mengalir.

Daya puncak dapat dilihat pada titik paling jauh dari pusat diagram. Kinerja modul surya yang direpresentasikan oleh kurva karakteristik IV (*IV characteristic curve*), yang merepresentasikan arus yang disediakan berdasarkan tegangan yang ditimbulkan oleh tingkat irradiasi surya tertentu. Kurva I – V merepresentasikan semua nilai tegangan dan arus. Kurva bergantung pada dua faktor utama suhu dan irradiasi surya yang diterima oleh sel surya. Untuk sebuah area sel surya, arus yang dihasilkan secara langsung sebanding dengan penyinaran surya, sedangkan tegangan berkurang dengan kenaikan suhu. Sebuah pengatur yang baik akan berusaha memaksimalkan jumlah daya yang disediakan oleh panel dengan mengikuti titik penyediaan daya maksimum ($V \times I$). Seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini.



Gambar 2.9 Gambar Kurva arus dan tegangan

Sebuah panel surya disusun dari beberapa sel surya. Sel tersambung secara elektrik untuk memberikan arus dan tegangan tertentu. Masing-masing sel surya di enkapsulasi untuk mengisolasi dan melindungi dari kelembaban dan korosi. Ada beda tipe modul yang tersedia di pasaran, tergantung pada jenis modul surya dan kebutuhan daya aplikasi. Modul yang paling umum digunakan terbuat dari 32 atau 36 sel surya silikon kristalin (*crystalline silicon*).



2.7 Sistem Penyangga

Pondasi, adalah suatu konstruksi yang berfungsi untuk memikul beban bangunan, meneruskan dan membaginya secara merata ke atas lapisan tanah yang keras. Keseimbangan akan tercapai apabila pondasi menyalurkan beban dari bangunan kelapisan tanah secara merata, sehingga bilapun pada suatu saat harus terjadi penurunan itu juga akan terjadi secara merata. Beban yang harus dipikul oleh pondasi terdiri dari beban mati, yaitu beban berat sendiri pondasi dan seluruh bangunannya, beban angin dan lain-lain. Disamping beban mati, juga dipikul beban hidup, seperti beban manusia (penghuni), perabotan dan lainlain. Konstruksi pondasi harus dirancang dengan penuh perhitungan, dengan memepertimbangkan faktor-faktor sebagai berikut :

1. Organisasi ruang bangunan
2. Kapasitas dan berat beban bagian-bagian bangunan
3. Struktur bangunan
4. Kondisi tanah (jenis dan kedalaman tanah keras)
5. Jenis bahan pondasi
6. Analisis hidrologis
7. Daya dukung tanah dan lain-lain

2.7.1 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 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 fotovoltaiik di tempatkannya pada rak atau frame berbasis dudukan



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.

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 fotovoltaik array. Sebagai bangunan struktur penyangga fotovoltaik *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 ditempatkannya pada rak atau frame berbasis dudukan 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 atau pemasangan bingkai secara datar diatas tanah atau atap. 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. Seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini.⁵



Gambar 2.10 Gambar pondasi fotovoltaik

⁵ Mulayana, Rida. 2017. *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS OFF-Grid*. Jakarta : Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia



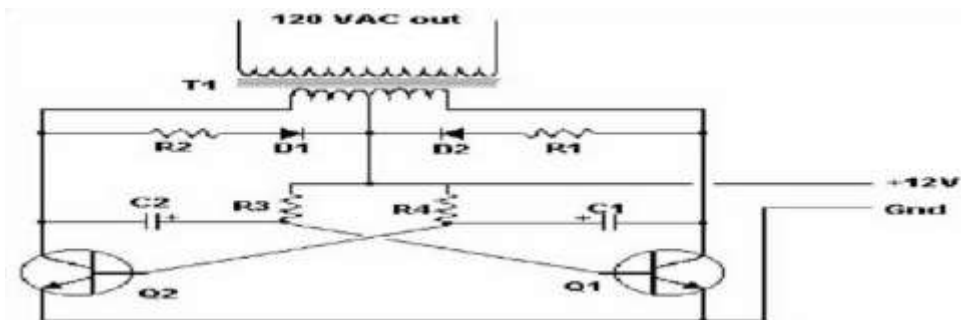
2.8 Inverter

Inverter merupakan suatu rangkaian yang berfungsi untuk mengubah arus DC menjadi arus AC. Pada PLTS, *inverter* berfungsi sebagai pengkondisi tenaga listrik (*power condition*) dan sistem kontrol yang merubah arus listrik searah (DC) yang dihasilkan oleh solar modul menjadi listrik arus bolak-balik (AC), yang nantinya akan mengontrol kualitas daya listrik yang dikeluarkan untuk dikirim ke beban atau jaringan listrik.⁹



Gambar 2.11 Gambar Inverter

Sumber tegangan input inverter dapat menggunakan baterai, tenaga surya, atau sumber tegangan DC yang lain. Inverter dalam proses konversi tegangan DC menjadi tegangan AC membutuhkan suatu penaik tegangan berupa step up transformer. Seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini. Rangkaian dasar sederhana inverter



Gambar 2.12 Gambar Rangkaian dasar sederhana inverter

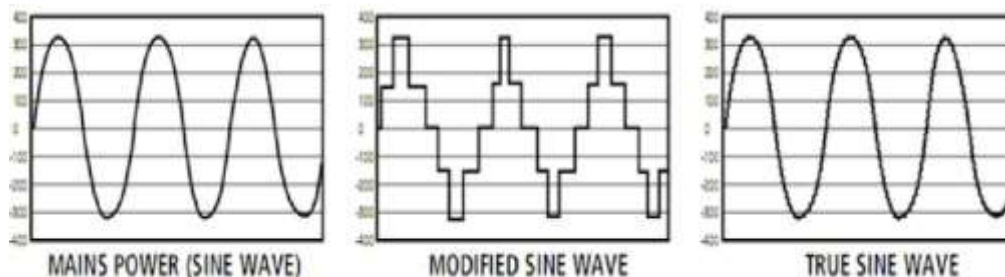
⁹ Zuhail. 1988. *Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya*. Jakarta : PT Gramedia Pustaka Utama



2.8.1 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 ($< 2\text{KW}$). 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 ($> 1\text{ KW}$). 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.⁵



Gambar 2.13 Gambar Bentuk Gelombang Inverter

2.9 Solar Charge Controller (SCC)

Solar Charge *Charge Controller* adalah komponen di dalam sistem PLTS yang berfungsi sebagai membatasi arus listrik yang masuk maupun keluar dari baterai. SCC/SCR mencegah pengisian daya (*charging*) yang berlebihan serta melindungi baterai dari tegangan berlebih.

⁵ Mulyana, Rida. 2017. *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS OFF-Grid*. Jakarta : Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia



Selain itu, SCC/SCR juga mencegah baterai agar energi listrik yang tersimpan di dalamnya tidak terkuras (*discharged*) sampai habis. Beberapa tipe SCC/SCR dapat secara otomatis dan terkontrol memutus tegangan suplai beban, untuk mencegah baterai dari kondisi *deep discharge* yang bisa memperpendek umur pakai baterai. 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*.⁸



Gambar 2.14 Gambar *Solar Charge Controller* (SCC)

⁸ Tech, Tetra. 2018. *Panduan Studi Kelayakan Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) Terpusat*. Jakarta Selatan : Indonesia Clean Energy Development II



2.9.1 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.

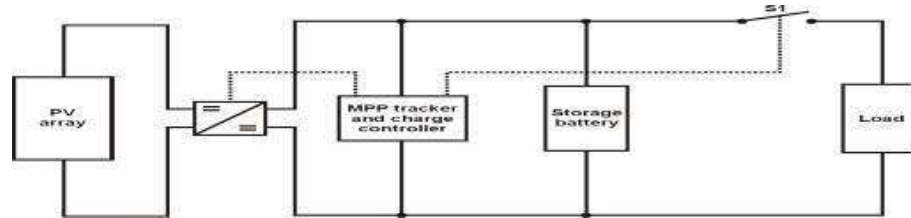
Perlindungan terhadap polaritas terbalik untuk hubungan *PV – Solar Charge Control* adalah dilakukan dengan memberikan suatu “*blocking diode*”, yang sekaligus merupakan pencegahan arus balik (*reverse current*) dari baterai menuju *photovoltaic*, sedangkan perlindungan polaritas terbalik untuk hubungan baterai *Solar Charge Control*, harus dilengkapi dengan beberapa tambahan komponen atau rangkaian elektronik.

2.9.2 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* .⁵



Gambar 2.15 Gambar Rangkaian *MPP Tracker* dan Charge Control PV Array

2.10 Baterai

Baterai atau akumulator adalah sebuah sel listrik dimana didalamnya berlangsung proses elektronika yang *reversibel* (dapat berbalikkan) dengan efisiensinya yang tinggi. Yang dimaksud dengan proses elektronikimia reversibel, adalah didalam baterai dapat berlangsung proses pengubahan kimia menjadi tenaga listrik (pengosongan), dan sebaliknya dari tenaga listrik menjadi tenaga kimia (pengisian kembali dengan cara regenerasi dari elektroda-elektroda yang dipakai, yaitu dengan melewati arus listrik dalam arah (polaritas) yang berlawanan di dalam sel.²

Baterai sebagai penyimpan sumber arus menyediakan energi listrik yang diperlukan untuk menghidupkan motor, penerangan kendaraan, dan peralatan listrik lainnya yang dapat diisi lagi.¹



Gambar 2.16 Gambar Baterai.

⁵ Mulayana, Rida. 2017. *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS OFF-Grid*. Jakarta : Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia

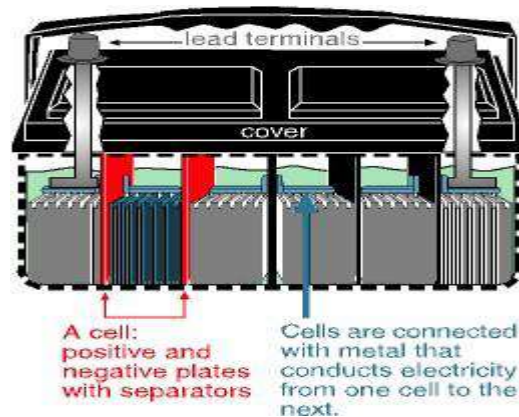
² Daryanto 2016. *Konsep Dasar Teknik Elektronika Kelistrikan*. Bandung : ALFABETA

¹ Daryanto.2001. *Pengetahuan Baterai Mobil*. Malang : PT Bumi Aksara



2.10.1 Baterai *Deep Cycle*

Baterai *deep cycle* dirancang untuk menghasilkan energi arus listrik yang stabil tidak sebesar *starting battery* namun dalam waktu yang lama. Baterai jenis ini tahan terhadap siklus pengisian – pengosongan baterai yang berulang – ulang. *Deep cycle* karena konstruksinya menggunakan pelat yang lebih tebal dan memungkinkan untuk melepaskan energi dalam selang waktu yang panjang. Baterai *deep cycle* tidak dapat melepaskan energi listrik secepat dan sebesar baterai starter. Semakin tebal pelat baterai semakin panjang usia baterai yang dapat diharapkan. Jenis ini juga banyak digunakan pada proyek energi alternatif untuk menyimpan arus listrik seperti pada pembangkit listrik tenaga surya dan pembangkit listrik tenaga angin. Jenis baterai *deep cycle* terdiri dari baterai VRLA (*Valve Regulated Lead Acid Battery*), Gel Cells Baterai dan *Absorbent Glass Mat Battery* (AGM Baterai). Seperti ditunjukkan pada gambar dibawah ini.⁵



Gambar 2.17 Gambar Struktur Konstruksi Baterai *Deep Cycle*

2.11 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

⁵ Mulayana, Rida. 2017. *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS OFF-Grid*. Jakarta : Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia



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

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

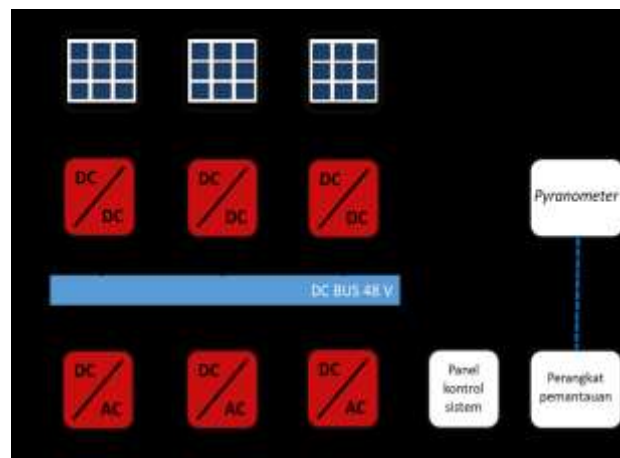


ini dihubungkan ke kutub positif bus DC, kutub negatif bus DC dan pembumian.

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.

2.12 Sistem Monitoring

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 local 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.

2.12.1 Sistem pemantauan menggunakan GSM/GPRS

Sistem pemantauan menggunakan GSM/GPRS sangat dianjurkan karena lokasi yang jauh. Dengan menggunakan metode ini, pemilik dapat mengakses data dari jauh tanpa harus datang ke lokasi. Sistem ini mengumpulkan data dari parameter-parameter yang terdaftar, kemudian mengirimkan data yang diperoleh ke penyimpanan data pemilik atau yang disediakan oleh perangkat pemantauan.

Tiap metode yang disebutkan di atas memiliki kelebihan dan kekurangannya masing-masing. Pemeriksaan secara manual jelas merupakan cara yang paling handal untuk memantau sistem karena operator akan memeriksa sistem secara langsung dan melaporkannya dalam bentuk buku catatan. Implementasi sistem pemantauan bergantung pada situasi lokasi. Data logger dapat dipertimbangkan untuk lokasi yang tidak memiliki jaringan seluler yang baik. Akan tetapi, apabila jaringan seluler cukup kuat dan dapat diandalkan, pengiriman data real time menggunakan GSM/GPRS harus dijadikan pilihan. Dalam hal ini, perangkat pemantauan harus dilengkapi dengan router dan modem.



Gambar 2.20 Gambar Sistem pemantauan menggunakan GSM/GPRS



2.13 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. Adapula 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 lin 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 2.21 Gambar Panel Distribusi AC

2.14 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*.

2.15 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.⁶



Gambar 2.22 Gambar *Automatic Transfer Switch (ATS)*

2.16 Kabel

Kabel merupakan komponen penghantar yang terisolasi yang berfungsi untuk menghubungkan antara komponen satu dengan yang lainnya pada sebuah rangkaian kelistrikan pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS).⁵

Jenis kabel dinyatakan dengan singkatan-singkatan, terdiri dari sejumlah huruf dan kadang-kadang juga angka. Karena banyaknya jenis yang ada, seiring tidak mudah untuk mengenali konstruksi suatu kabel hanya dari nama singkatannya saja tanpa keterangan tambahan, sekalipun nama singkatan itu disusun menurut suatu sistem tertentu.

Nomenklatur kabel yang digunakan dalam PUIL 1977 berasal dari nomenklatur Jerman. Karena itu huruf-huruf yang digunakan juga berasal dari singkatan istilah-istilah Jerman. Apendiks 5 dari buku ini memuat arti huruf-huruf yang digunakan dalam nomenklatur kabel tersebut.

Sebagian dari jenis-jenis kabel dan penggunaannya yang dimuat dalam PUIL 1977, terdapat di apendiks-apendiks 6, 7 dan 8 dari buku ini, yaitu :

Apendiks 6: kabel-kabel instalasi;

⁶ Ramadhani, Bagus. 2018. *Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya: Dos & Don'ts*. Jakarta : Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).

⁵ Mulyana, Rida. 2017. *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS OFF-Grid*. Jakarta : Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia



Apendiks 7: kabel-kabel fleksibel;

Apendiks 8: kabel-kabel tanah berisolasi dan berselubung termoplastik

Kabel-kabel yang diproduksi di Indonesia menggunakan bahan isolasi termoplastik. Jika untuk kabel arus kuat umumnya digunakan PVC. Tegangan nominalnya masih terbatas hingga 6/10 kV. Kabel-kabel dengan bahan isolasi kertas dan berselubung logam (timbel) tidak atau belum dibuat di dalam negeri.³



Gambar 2.23 Gambar Kabel

2.17 Hubungan Sel Surya Secara Seri dan Paralel

Pada umumnya modul surya mampu bertahan 20 hingga 25 tahun, khususnya untuk modul *mono-crystalline* modul ini dirancang untuk masa operasi 30 tahun pada masa perancangan dengan acuan kondisi *lab-test*. Sel-sel silikon itu sendiri tidak mengalami kerusakan atau degradasi bahkan setelah puluhan tahun pemakaian. Besar nilai tegangan serta arus pada sistem maksimum *power point tracker* (MPPT) solar sel tergantung dari karakteristik solar sel tersebut. Daya maksimum yang dihasilkan solar sel dirumuskan.³

$$P_n = V_n \times I_n \dots \dots \dots (2.1)$$

³ Harten P. Van., dan E Setiawan. 1981. *Instalasi Listrik Arus Kuat 1*. Bandung : Binacipta
Anggota IKAPI