

BAB II TINJAU PUSTAKA

2.1 Pengertian PLTS¹

Pengertian PLTS atap 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 radiasi (iradiasi) matahari yang mengenai sel fotovoltaik, semakin tinggi daya listrik yang dihasilkannya. Dengan kondisi penyinaran matahari di Indonesia yang terletak di daerah tropis dan berada di garis khatulistiwa, PLTS menjadi salah satu teknologi penyediaan tenaga listrik yang potensial untuk diaplikasikan. PLTS dapat diaplikasikan melalui berbagai bentuk instalasi, dengan konfigurasi sistem terpusat ataupun tersebar, dimana masing-masing aplikasi tersebut dapat bersifat on-grid maupun off-grid. Perbedaan kedua sistem tersebut adalah sebagai berikut:

	<i>PLTS off-grid</i>	<i>PLTS on-grid</i>
Pengertian	Sistem PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan listrik PLN.	Sistem PLTS yang terhubung dengan jaringan distribusi yang telah disuplai pembangkit listrik lainnya (misalnya jaringan PLN).
Baterai	Pada umumnya menggunakan komponen baterai supaya tetap dapat menyuplai listrik di malam hari (atau saat tidak ada matahari). Namun, beberapa aplikasi dapat juga dipasang tanpa baterai, seperti <i>solar water pump</i> , dengan konsekuensi hanya dapat dipakai saat ada matahari.	Tidak menggunakan baterai, konsekuensinya tidak dapat beroperasi di malam hari atau ketika tidak terkoneksi ke jaringan PLN.
Contoh Aplikasi	<p><i>Sistem Terpusat</i>: PLTS komunal (biasanya untuk listrik pedesaan)</p> <p><i>Sistem Tersebar</i>: <i>Solar Home Sistem</i> (SHS- untuk di setiap rumah), <i>Solar Water Pump</i> (pompa air untuk umum), <i>Solar Public Lighting</i> (penerangan jalan umum), dll²</p>	<p><i>Sistem Terpusat</i>: PLTS skala komersial oleh pengembang yang dijual ke PLN (~IPP- <i>independent power producer</i>)</p> <p><i>Sistem Tersebar</i>: PLTS Atap</p>

Gambar 2.1 Perbedaan PLTS off grid dan PLTS on grid

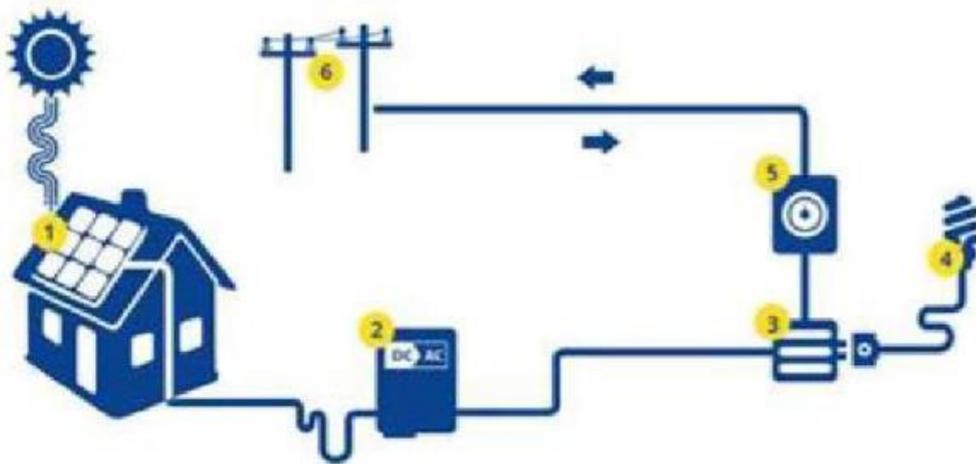
¹Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi, *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS Off-Grid* (Jakarta : Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2017), hal 13-14



Sesuai ketentuan dalam Peraturan Menteri ESDM No.49 tahun 2018, jo. Permen No.13 tahun 2019, jo. Permen No.16 tahun 2019, PLTS atap adalah proses pembangkitan tenaga listrik yang menggunakan modul fotovoltaik, yang diletakkan di atap, dinding, atau bagian lain dari bangunan milik pelanggan PLN.

2.2 Mekanisme Sistem PLTS²

Secara umum PLTS atap memiliki mekanisme dan komponen utama seperti digambarkan pada skema di bawah ini.



Gambar 2.2 Mekanisme sistem PLTS atap

Penjelasan mekanisme sistem PLTS atap adalah sebagai berikut. Panel surya mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik.

1. Panel surya menghasilkan arus listrik DC
2. Arus DC diubah oleh inverter menjadi listrik AC
3. Arus AC masuk ke jaringan listrik di dalam rumah melalui AC breaker panel
4. Pemakaian energi listrik untuk penerangan atau peralatan elektronik rumah tangga
5. Penggunaan kWh meter ekspor impor (exim) dengan menggunakan sistem net metering

²Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi, *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS Off-Grid* (Jakarta : Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2017), hal 14-15



6. Meter exim akan membaca ekspor listrik dari pelanggan PLTS ke jaringan PLN

Membaca impor listrik dari jaringan PLN ke pelanggan PLTS. Namun, perlu diperhatikan bahwa sumber energi surya bersifat intermiten (atau tidak tersedia secara terus menerus), sehingga mempengaruhi listrik yang dapat dihasilkan. Selain faktor tidak adanya sinar matahari di malam hari, faktor lain yang mempengaruhi intermiten ini diantaranya adalah keberadaan awan (cuaca berawan) yang menghalangi sinar matahari mencapai panel surya fotovoltaik, fenomena bayangan pepohonan, bangunan ataupun pengaruh obyek lainnya di sekitar panel surya fotovoltaik. Hal-hal tersebut menyebabkan listrik tidak dapat diproduksi oleh sel surya selama efek bayangan (*shading*) itu terjadi. Sehubungan dengan sifat intermitensi tersebut, maka sistem pembangkit listrik tenaga surya perlu dirancang dengan komponen baterai untuk menyimpan energi, atau dibangun secara hybrid dengan jenis sumber energi lainnya yang tidak memiliki sifat intermitensi (misalnya PLTD, PLTU, PLTA, dll). Penyambungan PLTS atap dengan jaringan PLN, sesuai ketentuan yang diatur dalam Peraturan Menteri ESDM, salah satunya bertujuan untuk menjaga kestabilan energi listrik untuk dapat dimanfaatkan oleh Pelanggan PLN. Selain itu, biaya pemasangan PLTS atap menjadi lebih murah karena harga baterai relatif cukup mahal dan memiliki masa operasional yang terbatas.

1.3 Konfigurasi PLTS Terpusat³

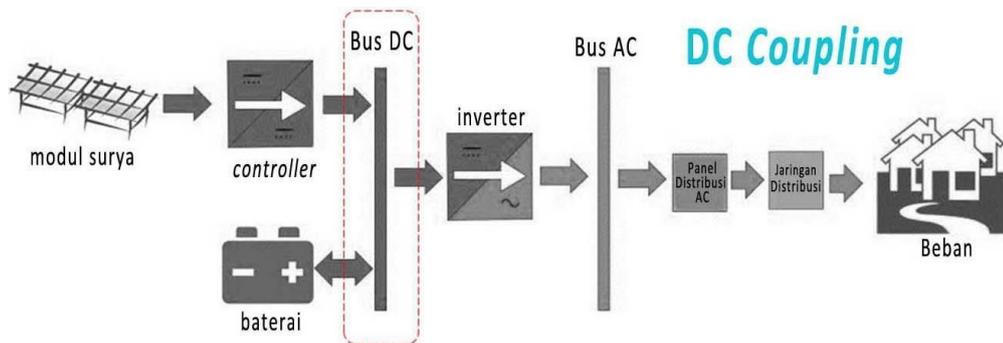
Konfigurasi kerja yang umum diimplementasikan dalam PLTS terpusat ada 2 (dua) sistem yaitu berbasis DC *coupling* dan AC *coupling*. Istilah *coupling* berdasarkan hubungan titik ke titik koneksinya. Umumnya, sistem PLTS terpusat terdiri dari dua bagian kelistrikan yang berbeda yaitu sisi arus bolak-balik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

³Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS Off-Grid* (Jakarta, 2017), hal 4 – 5.

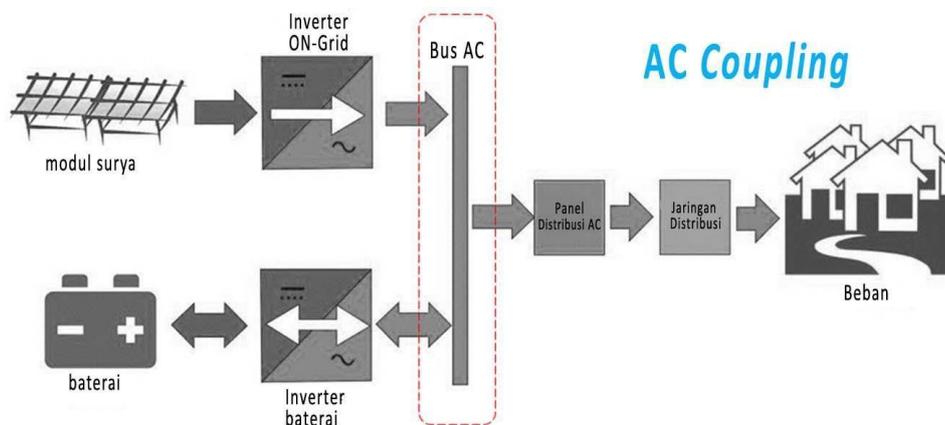


titik koneksi yang dapat dibuat dari keluaran array modul surya. Array dapat terkoneksi ke sisi AC atau sisi DC dari sistem kelistrikan PLTS.

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



Gambar 2.3 Diagram Sistem PLTS *Off-grid* tipe DCCoupling



Gambar 2.4 Diagram Sistem PLTS *off-grid* tipe ACCoupling

1.3.1 ACCoupling

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 gridtied 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.

1.3.2 DCCoupling

Sistem DC Coupling terkoneksi ke sisi arus searah (DC) dari sistem kelistrikan PLTS offgrid. 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.

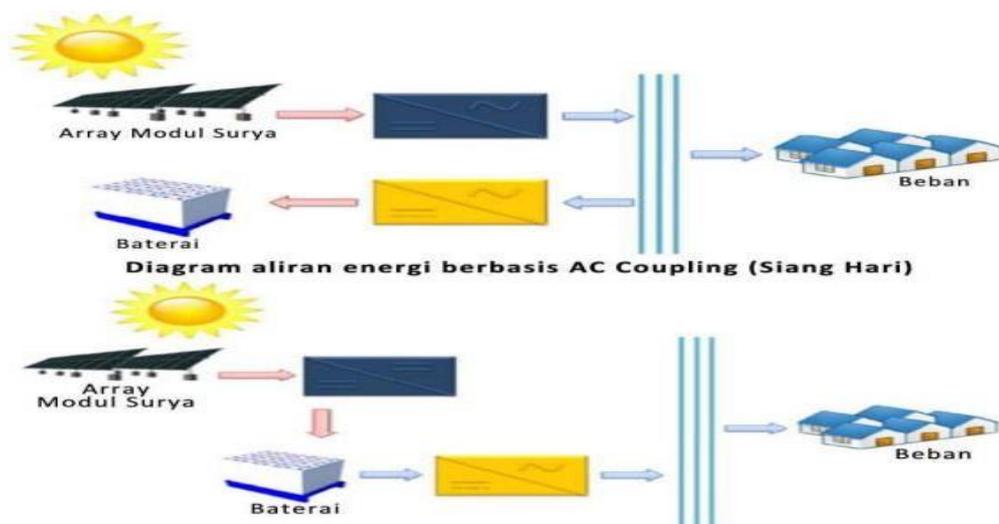


2.4 Pola Operasi PLTS Terpusat⁴

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

2.4.1 Siang hari pada saat energi PLTS terpusat lebih besar daribeban

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/m², apabila efisiensi modul surya sebesar 16% maka daya ideal yang dapat dihasilkan oleh modul surya adalah sebesar 160 Watt/m². Diagram aliran energi yang dihasilkan pada siang hari dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Diagram Aliran Energi yang dihasilkan pada Siang Hari

Pada sistem AC Coupling, energi yang dihasilkan modul surya pada kondisi tersebut langsung disalurkan ke beban (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

⁴ Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konservasi Energi, Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, *Panduan Pengoperasian dan Pemeliharaan PLTS Off-Grid* (Jakarta, 2017), hal 6-9



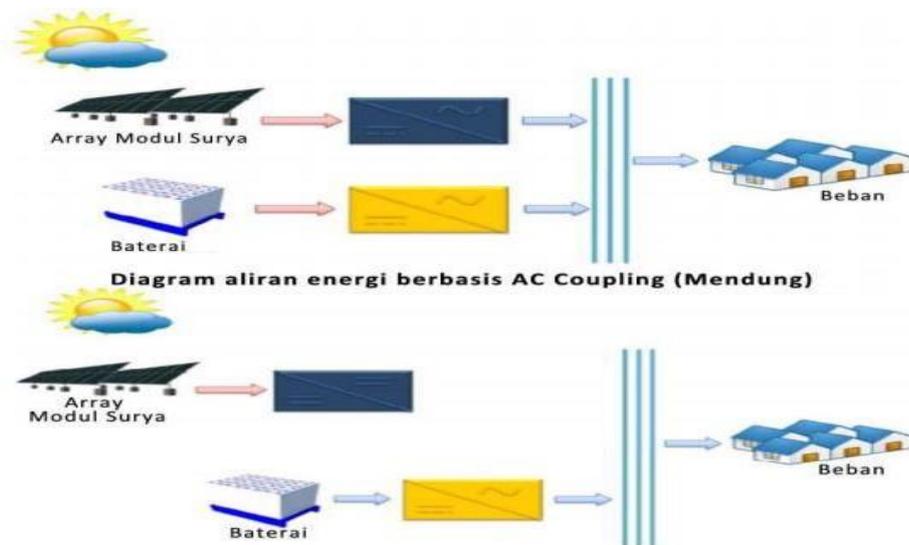
kondisi tersebut digunakan untuk mengisi baterai melalui Solar ChargeController (SCC) terlebih dahulu, baru kemudian disalurkan ke beban (konsumen) melalui inverter.

2.4.2 Siang hari pada saat energi PLTS terpusat lebih kecil daribeban

Kondisi ini dapat terjadi apabila :

- Saat kondisi berawan ataumendung.
- Saat sore hari menjelang matahari terbenam PLTS terpusat akan menghasilkan energi listrik dari matahari namun tidakmaksimal.

Diagram aliran energi yang dihasilkan pada kondisi berawan/mendung dapat dilihat pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Diagram 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).

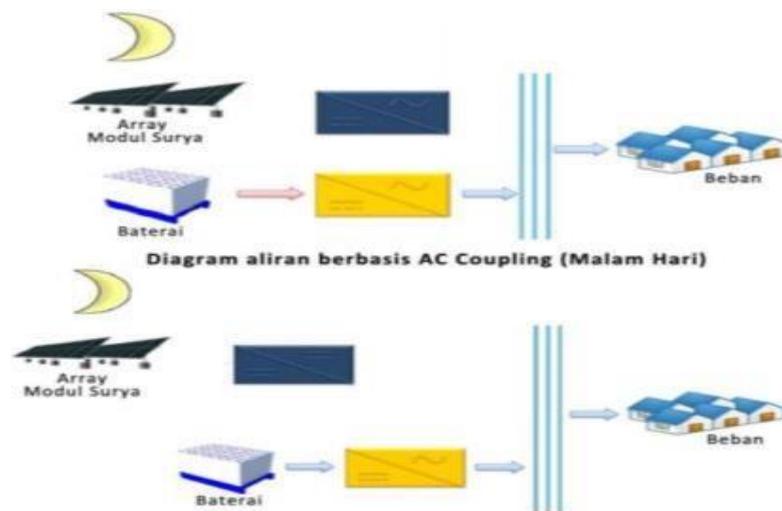
Pada sistem *DC Coupling*, energi yang dihasilkan modul surya pada kondisi tersebut digunakan untuk mengisi baterai melalui *Solar Charge Controller* (SCC) terlebih dahulu, baru kemudian disalurkan ke beban



(konsumen) melalui inverter.

2.4.3 Malam Hari

Pada malam hari sumber energi matahari tidak dapat dimanfaatkan lagi, oleh karena itu beban akan disuplai oleh baterai. Energi yang tersimpan dalam baterai pada siang hari akan dipergunakan untuk menyuplai beban saat dibutuhkan melalui inverter. Kemudian Inverter mengubah arus (DC) pada sisi baterai menjadi arus (AC) ke sisi beban. Diagram aliran energi pada malam hari dapat dilihat pada Gambar 2.7



Gambar 2.7 Diagram Aliran Energi pada Malam Hari

2.5 Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)⁵

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

2.5.1 Solar Cell

Fotovoltaik atau *photovoltaic* berasal dari perkataan Yunani Foto yang dimaksud “cahaya”, dan “voltaic”, bermaksud listrik. Voltan pula diambil sesuai nama ahli Fisika Itali bernama Alessandro Volta. Istilah foto-voltan

⁵Ramadhani, Bagus, Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya: Dos & Don'ts (Jakarta : 2018 Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).) bab 3- hal 22.



telah digunakan sejak 1849. Teknologi fotovoltaik beroperasi tidak bising, tidak mengeluarkan bahan pencemar, bersih, mempunyai tingkat kepercayaan yang tinggi, ongkos pemeliharaan rendah, dan mempunyai jangka pakai yang panjang, selama 20 hingga 30 tahun. Sel-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 pengatur surya, tergantung pada jumlah kuasa yang diperlukan. Tenaga yang diperlukan untuk membangun panel atau modul cukup tinggi. Walaupun 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.

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*).

Jenis sel surya fotovoltaik atau sel photovoltaic (PV) yang saat ini umum dipakai adalah tipe silikon kristalin dan sel surya thin film. Sel surya tipe silikon kristalin terdiri dari bahan semikonduktor seperti mono-kristalin dan poly-kristalin. Untuk sel surya tipe thin film terdiri dari kadmium telurida (CdTe), Copper Indium Gallium Diselenida (CIGS), and amorphous thin-film silikon (a-Si, TF-Si) yang dapat mengubah efek photovoltaic pada iradiasi 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



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



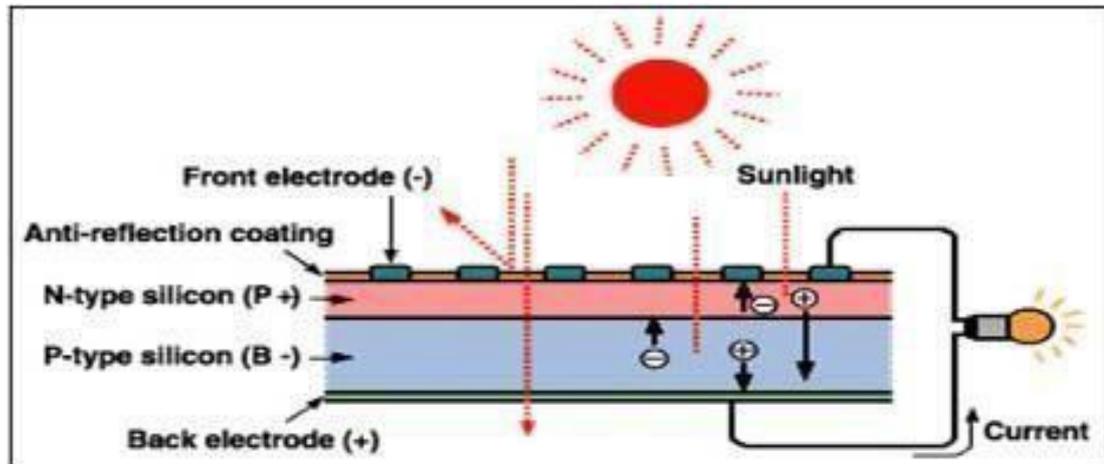
Gambar 2.8 Solar Cell (Photovoltaic)

2.5.1.1 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 2.9 Efek Photovoltaic

2.5.2 Modul Surya

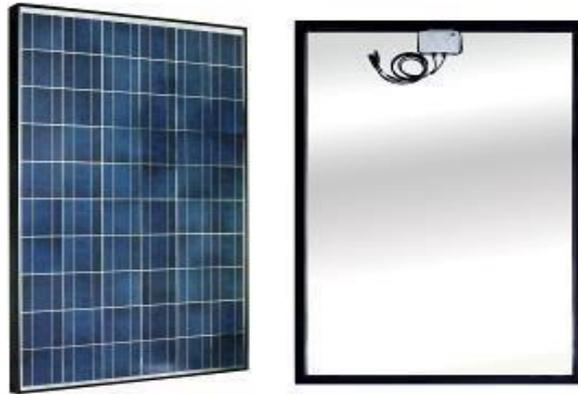
Photovoltaics atau Solar PV adalah Modul yang mengkonversi langsung cahaya matahari menjadi arus listrik. Bahan-bahan tertentu, seperti silikon, secara alami melepaskan elektron ketika mereka terkena cahaya, dan elektron ini kemudian dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan arus listrik. Panel photovoltaics 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.

2.5.2.1 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 Dibawahini.



Gambar 2.10 Modul Surya

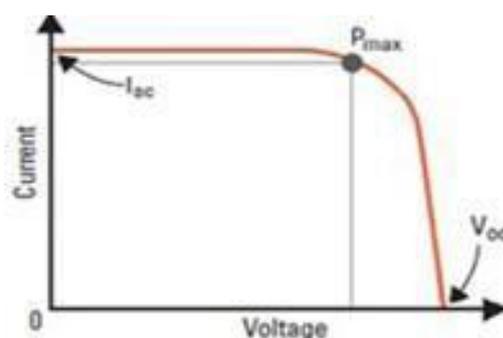
2.5.2.2 Kurva Arus Dan Tegangan

Seperti yang sudah dibahas diatas sel surya atau sel photovoltaic merupakan suatu alat yang dapat mengubah 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 (I_{sc}) sampai tegangan sirkuit terbuka (V_{oc}). 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 (I_{sc}) dan tegangan sirkuit terbuka (V_{oc}). 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 iradiasi surya tertentu. Kurva $I - V$ merepresentasikan semua nilai tegangan dan arus. Kurva bergantung pada dua faktor utama suhu dan iradiasi 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.



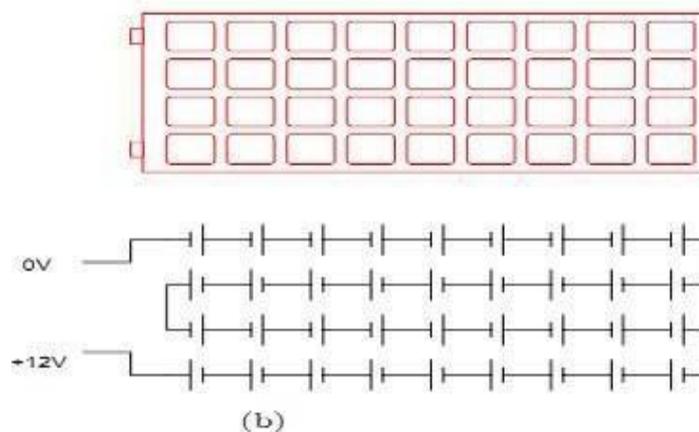
Gambar 2.11 Kurva arus dan tegangan

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). Sel – sel surya yang berukuran sama, tersambung secara seri, dan terbungkus diantara bahan kaca dan plastik, menggunakan polymer resin sebagai insulator termal (thermal insulator). Panel surya biasanya memiliki dua kontak listrik satu positif satu negatif dilengkapi dioda atau bypass dioda pada junction box antara masing-masing panel surya. Bypass dioda ini melindungi panel dari gejala yang dikenal sebagai “hot- spots”. Sebuah hotspot terjadi ketika beberapa sel surya berada dalam bayangan (shading) sedangkan sisanya panel surya berada dibawah sinar matahari penuh.

Konstruksi daya yang dihasilkan pada modul surya akan terjadi pengurangan atau nol akibat sel surya terteduh tertimpa bayangan dan bertingkah laku sebagai beban dapat membuang daya. Dalam situasi ini, sel surya yang terteduh mengakibatkan dapat mengalami peningkatan suhu yang luar biasa (sekitar 85 sampai 100 derajat Celsius.). Dioda peningkat akan mencegah hot spot di sel yang terteduh, sebaliknya akan mengurangi tegangan maksimum panel surya tersebut. Sebuah solar modul biasanya berisi 28 – 36 sel secara seri.



Gambar 2.12 Hubungan Seri Pada Solar Sel Modul



2.5.3 Inverter

Inverter merupakan suatu alat 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. Terdapat dua macam sistem inverter pada PLTS yaitu:

- a. Inverter 1 fasa untuk sistem PLTS yang bebannyakecil.
- b. Inverter 3 fasa untuk sistem PLTS yang besar dan terhubung dengan jaringan PLN.



Gambar 2.13 Inverter

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.



Sumber tegangan input inverter dapat menggunakan baterai, tenaga surya, atau sumber tegangan DC yang lain. Inverter dalam proses konversitegangan DC menjadi tegangan AC membutuhkan suatu penaik tegangan berupa step up transformer.

2.5.4 Solar Charge Controller(SCC)

Solar Charge Charge Controller adalah komponen di dalam sistem PLTS yang berfungsi sebagai pengatur arus listrik (*current regulator*) baik terhadap arus yang masuk dari panel PV maupun arus bebankeluar/digunakan.

Berfungsi untuk menjaga baterai dari pengisian yang berlebihan (*overcharge*), dan mengatur tegangan serta arus dari panel surya ke baterai. Fungsi dan fitur *solar charge controller*:

- a. Saat tegangan pengisian di baterai telah mencapai keadaan penuh, maka *controller* akan menghentikan arus listrik yang masuk ke dalam baterai untuk mencegah *over charge*, dengan demikian ketahanan baterai akan jauh lebih tahan lama. Di dalam kondisi ini, listrik yang tersuplai dari panel surya akan langsung terdistribusi ke beban / peralatan listrik dalam jumlah tertentu sesuai dengan konsumsi daya peralatan listrik.
- b. Saat tegangan di baterai dalam keadaan hampir kosong, maka *controller* berfungsi menghentikan pengambilan arus listrik dari baterai oleh beban / peralatan listrik. Dalam kondisi tegangan tertentu (umumnya sekitar 10% sisa tegangan di baterai), maka pemutusan arus beban dilakukan oleh *controller*. Hal ini menjaga baterai dan mencegah kerusakan pada sel – sel baterai. Pada kebanyakan model *controller*, indikator lampu akan menyala dengan warna tertentu (umumnya berwarna merah atau kuning) yang menunjukkan bahwa baterai dalam proses charging. Dalam kondisi ini, bila sisa arus di baterai kosong (dibawah 10%), maka pengambilan arus listrik dari baterai akan diputus oleh *controller*, maka peralatan listrik / beban tidak dapat beroperasi. Keadaan ini



disebut *overdischarge* akibat beban yang dipikul cukup besar.

- c. Pada controller tipe – tipe tertentu dilengkapi dengan digital meter dengan indikator yang lebih lengkap, untuk memonitor berbagai macam kondisi yang terjadi pada sistem PLTS dapat terdeteksi dengan baik.



Gambar 2. 14 Solar Charge Controller (SCC)

Solar Charge Controller yang dipilih harus lulus test kualifikasi dan memenuhi persyaratan teknis dalam pemakaiannya. Persyaratan teknis dalam penggunaan *Solar Charge Controller* antara lain adalah:

- a. Kapasitas maksimum *input* dan *output*.
- b. Mempunyai tegangan batas bawah dan batas atas terhadap pemutusan baterai.
- c. Konsumsi diri yang sangat kecil.
- d. Mempunyai proteksi hubung singkat dan beban lebih.
- e. Tegangan jatuh yang kecil ($<0,5V$) pada sisi PV – baterai dan pada sisi baterai – beban.
- f. Mempunyai “*Blocking Diode*” dan sesuai dengan kapasitas maksimum.

2.5.4.1 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 Chargekontrol.
2. Terbaliknya hubungan antara baterai dengan Solar Chargekontrol.
3. Terbaliknya hubungan antara Solar Charge kontrol denganbeban.

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

Perlindungan terhadap polaritas terbalik untuk hubungan PV – Solar Charge Control adalah dilakukan dengan memberikan suatu “blockingdiode”,

yangsekaligusmerupakanpencegahanarusbalik(reversecurrent)daribateraimenuju photovoltaic, sedangkan perlindungan polaritas terbalik untuk hubungan baterai Solar Charge kontrol, harus dilengkapi dengan beberapa tambahan komponen atau rangkaian elektronik.

2.5.5 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 DC. Energi yang disimpan pada baterai berfungsi sebagai cadangan (*back up*), yang biasanya digunakan pada saat panel surya tidak menghasilkan energi listrik, contohnya pada saat malamhari atau pada saat cuaca mendung, selain itu tegangan keluaran ke sistem cenderung lebih stabil. Satuan kapasitas energi yang dihasilkan pada baterai adalah *amperehour* (Ah), yang artinya arus maksimum yang dapat dikeluarkan oleh baterai selama satu jam. Proses pengosongan baterai (*discharge*), baterai tidak boleh dikosongkan hingga titik maksimum, sebab hal ini mempengaruhi usia pakai (*life time*) dari baterai tersebut. Batas pengosongan dari baterai disebut



dengan *depth of discharge* (DoD) yang dinyatakan dalam satuan persen. Suatu baterai memiliki DoD 80%, ini berarti bahwa hanya 80% dari energi yang tersedia dapat dipergunakan dan 20% tetap berada dalam cadangan. Semakin dalam DoD yang diberlakukan pada suatu baterai maka semakin pendek pula siklus dari baterai tersebut (James P Dunlop(1997)).



Gambar 2.15 Baterai

Baterai dapat diartikan sebagai gabungan dari sel-sel yang terhubung seri. Secara umum ada dua jenis baterai yang digunakan untuk keperluan solar *electric systems*, yaitu *lead acid battery* (accu) dan *nickel cadmium battery*. Kedua jenis baterai tersebut memiliki komponen yang hampir sama, hanya saja berbeda dalam jenis elektroda yang dipakai dan jenis elektrolit yang digunakan untuk membangkitkan reaksi elektrokimia. *Lead acid battery* menggunakan lempeng yang terbuat dari lead, dan sebagai elektrolitnya digunakan H_2SO_4 (asam sulfur) yang sama seperti pada accu serta memiliki efisiensi 80%. Sedangkan *nickel cadmium battery* menggunakan cadmium sebagai elektroda negatif dan nikel sebagai elektroda positif sedang elektrolitnya dipakai potassium hidroksida dan memiliki efisiensi 70% (James P Dunlop (1997)).

Baik *lead acid* baterai maupun *nikel cadmium* baterai secara umum mempunyai 4 bagian penting. Keempat bagian tersebut mempunyai fungsi yang berbeda-beda yang menunjang proses penyimpanan energi maupun pengeluaran energi. Empat bagian tersebut terdiri dari:

- a. Elektroda
- b. Pemisah atau separator
- c. Elektrolit



d. Wadahsel

Dari sekian banyak jenis baterai, jenis baterai *lead acid* lebih banyak digunakan pada sistem PLTS karena ketersediaan ukuran (Ah) yang ada lebih banyak, lebih murah, dan karakteristik performanya yang cocok. Pada umumnya baterai penyimpanan energi listrik dibagi menjadi dua kategori yaitu (James P Dunlop(1997)):

a. Primary batteries

Primary batteries yaitu dapat menyimpan dan mengirim energi listrik ke beban tetapi tidak dapat diisi kembali (*recharge*). Jenis baterai ini tidak digunakan pada PLTS.

b. Secondary batteries

Secondary batteries yaitu dapat menyimpan dan mengirim energi listrik ke beban, dan dapat juga diisi kembali (*recharge*). Jenis baterai ini digunakan pada sistem PLTS.

2.5.6 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) string, 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 2.16 Kotak Penggabung

Bagian-bagian yang ada di dalam kotak penggabung:

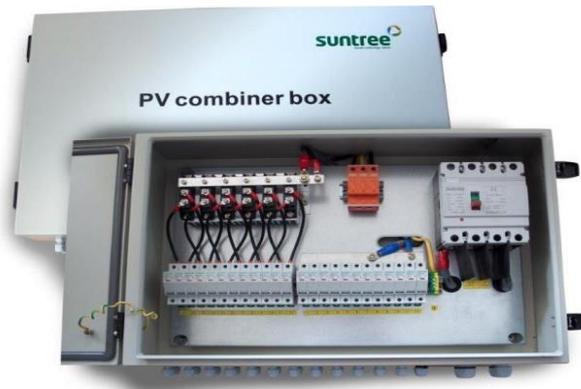
- Perangkat proteksi string modul fotovoltaik digunakan untuk melindungi individual string modul fotovoltaik terhadap arus berlebih. Untuk tujuan ini biasanya digunakan sekering atau MCB.
- Busbar adalah titik sambungan untuk beberapa string modul fotovoltaik. Perangkat ini membawa beberapa string ke konduktor yang sama. Busbar DC terbuat dari konduktor tembaga padat dan berlapis timah untuk perlindungan terhadap korosi.
- Sakelar pemutus memungkinkan kotak penggabung terputus secara aman dari solar charge controller atau inverter jaringan saat pemeliharaan dilakukan.
- 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.
- Selungkup pelindung (enclosure) merupakan rumah dari komponen listrik dengan fungsi untuk melindungi komponen dari paparan langsung terhadap lingkungan dan mencegah gangguan luar.
- 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 surya.



2.5.7 Combiner Box

Combiner Box berfungsi sebagai Panel listrik arus searah (DC) yang menggabungkan keluaran dari beberapa string modul surya menjadi satu.

Berfungsi juga sebagai panel isolasi dan proteksi terhadap arus/tegangan lebih dan petir.



Gambar 2.17 *Combiner Box*

2.5.8 Sistem Monitoring

Sistem Monitoring mencatat, merekam, menampilkan dan memonitor data-data parameter serta informasi sistem PLTS.

Sistem monitoring dapat diakses dari jarak jauh melalui jaringan data yang ada. Alat ini lebih sering dikenal sebagai *Remote Monitoring System* (RMS).



Gambar 2.18 Sistem Monitoring (i)



Gambar 2.19 Sistem *Monitoring* (ii)

2.5.9 Panel Distribusi AC

Panel distribusi AC atau dikenal juga sebagai AC power distribution box (ACPDDB) 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. Pada umumnya panel distribusi AC berisikan busbar, perangkat proteksi arus lebih, perangkat proteksi tegangan surja, serta sistem pemantauan lokal seperti energi meter. 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 :

- Selungkup (enclosure) sebagai rumah perangkat proteksi dan busbar.
- 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 digunakan untuk konfigurasi satu-fasa.
- Meteran energi untuk mengukur total energi yang sudah diproduksi oleh



PLTS dan telah digunakan oleh beban.

- 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.
- Timer dan kontaktor mengatur waktu operasional lampu jalan. Biasanya lampu jalan hanya beroperasi selama lima jam waktu malam hari.
- Miniature circuit breaker (MCB) melindungi kabel masuk dari inverter baterai dan feeder keluar menuju jaringan distribusi.
- Sekering untuk memutus pengukuran tegangan dari busbar apabila ada hubungan arus pendek tiba-tiba atau kerusakan pada meteran energi.
- Perangkat proteksi tegangan surja - surge protection device (SPD) atau lightning arrester digunakan untuk melindungi perangkat AC dari tegangan surja atau sambaran petir.
- 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 neutral atau terdapat arus sisa yang lebih besar dari rating ELCB (biasanya 30 mA untuk proteksi terhadap manusia). Residual current device (RCD) juga sering digunakan untuk tujuan ini.
- Batang pbumian (grounding bar) memberikan pbumian pada selungkup, perangkat proteksi surja, serta transformator arus.

2.5.10 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*.



2.5.11 Automatic Transfer Switch(ATS)

ATS merupakan singkatan dari kata Automatic Transfer Swich, jika dipahami berdasarkan arti kata tersebut maka ATS adalah sakelar yang bekerja otomatis, namun kerja otomatisnya berdasarkan kemungkinan jika sumber listrik dari PLN terputus atau mengalami pemadaman maka sakelar akan berpindah ke sumber listrik yang lainnya misalnya adalah Inverter.

2.5.12 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).

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;

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.



Gambar 2.20 Kabel

2.6 Automatic Transfer Switch⁶

ATS merupakan singkatan dari kata *Automatic Transfer Switch*, jika dipahami berdasarkan arti kata tersebut maka ATS adalah sakelar yang bekerja secara otomatis, namun kerja otomatisnya berdasarkan kemungkinan jika sumber listrik dari PLTS terputus atau mengalami pemadaman maka sakelar akan berpindah ke sumber listrik yang lainnya misalnya adalah PLN.

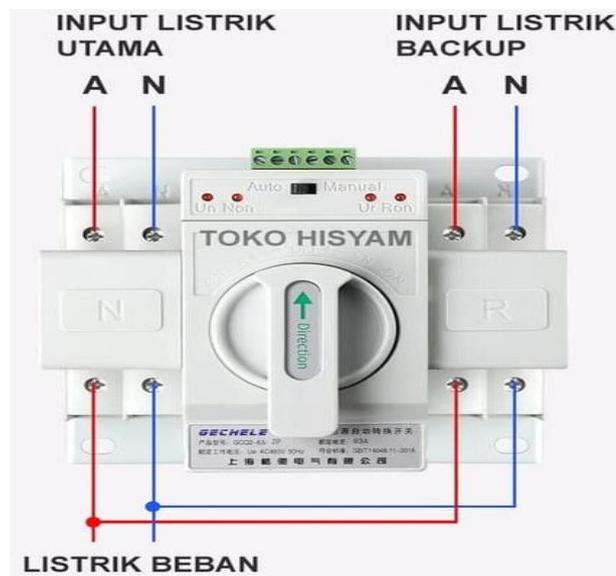
Automatic Transfer switch merupakan rangkaian kontrol sakelar power PLTS dengan PLN yang sudah full automatic. Alat ini berguna untuk menghubungkan PLN ke beban secara otomatis pada saat PLTS padam. Pada saat PLTS hidup kembali, alat ini akan memindahkan sumber daya ke beban dari PLN ke PLTS. Dalam perkembangan teknologi dunia elektrikal akhirnya merekayasa hal tersebut kemudian dijalankan secara Automatic yang di singkat ATS (*Auto Transfer Swicth*) yang di fungsikan secara otomatis untuk memindahkan daya sesuai dengan kebutuhan tanpa menggunakan tenaga manusia untuk mengoperasikannya.

Dalam perkembangan dunia elektrikal akhirnya merekayasa hal tersebut kemudian dijalankan secara Automatic yang di singkat ATS (*Automatic Transfer Swicth*) yang di fungsikan secara otomatis untuk memindahkan daya sesuai dengan kebutuhan tanpa menggunakan tenaga manusia untuk mengoperasikannya. Beberapa jenis ATS dibedakan menurut kapasitas daya yang dibutuhkan atau berdasarkan fasa dan ampere yang melalui panel tersebut, namun untuk prinsip kerjanya tetaplah sama.

⁶Susanto, Eko. 2013. *Automatic Transfer Switch*. Jurnal Teknik Elektro Universitas Negeri Semarang. hal 18-21



Panel ATS memiliki prinsip kerja yang sangat sederhana. Saat sumber utama mengalami gangguan atau pemadaman, maka sistem ATS akan memindahkan aliran energi listrik ke sumber alternatif. sehingga sumber alternatif akan langsung menggantikan sumber utama dalam menyuplai beban secara penuh. Dan sebaliknya saat sumber energi listrik utama sudah dapat bekerja lagi, sistem ATS akan memindahkan aliran energi listrik ke sumber utama, meskipun sumber alternatif masih dalam keadaan hidup.



Gambar 2.21 Automatic Transfer Switch (ATS)

Sistem Automatic Transfer Switch (ATS) sangat berguna pada suatu gedung atau bangunan yang mengharuskan supply energi listrik terus-menerus bekerja, khususnya dalam otomatisasi pergantian sumber energi listrik yang digunakan. Dibawah ini merupakan keuntungan pemanfaatan sistem ATS, antara lain :

a. Efisiensi dan Efektivitas Waktu

Cara kerja sistem dalam memindahkan sumber satu ke sumber energi listrik lainnya dan sebaliknya sangat singkat, sehingga supply energi listrik saat salah satu sumber energi listrik padam atau terjadi gangguan tidak akan terganggu dan proses kerja beban akan terus berjalan

b. Efisiensi dan Efektifitas Penggunaan, Pengontrolan dan Perawatan



Sistem ini bekerja secara otomatis, dimana saat salah satu sumber energi listrik utama padam atau terjadi gangguan, sistem ATS secara otomatis akan memindahkan ke sumber energi listrik alternatif dan sebaliknya jika sumber energi listrik utama kembali bekerja. Sehingga dalam pengoperasiannya tidak perlu kontrol manual, hal ini sangat mengurangi beban kerja fisik dan mempermudah pengguna

Sedangkan untuk perawatannya sistem ATS ini tergolong mudah dan praktis, yaitu operator hanya perlu memastikan kondisi PLTS agar tetap dapat bekerja dengan baik. Sistem ini dapat dipantau berdasarkan indikator arus, tegangan dan besaran lainnya pada bagian metering panel, dan terdapat sistem kontrol manual yang digunakan untuk menguji sistem maupun perawatan secara berkala

c. Melindungi Beban Listrik yang Terpasang

Sistem ini secara tidak langsung dapat melindungi beban listrik yang digunakan baik beban resistif, induktif maupun kapasitif. Dikarenakan pada kondisi tertentu tegangan listrik dari sumber energi yang digunakan akan turun atau naik sampai dengan batas toleransi keamanan beban-beban listrik tersebut.

Adapun kondisi lain yang mengganggu proses kerja beban seperti : hilangnya supply tegangan secara tiba-tiba yang berulang-ulang, adanya salah satu fasa yang hilang serta saat adanya hubung singkat dalam sistem . Beberapa kondisi tersebut dapat diminimalisir ataupun dicegah dengan adanya sistem ATS ini.

Pemakaian panel listrik dengan sistem ATS ini dibedakan pada besar kecilnya pemakaian listrik Semakin tinggi pemakaian daya listrik, tentunya akan semakin besar pula spesifikasi komponen komponennya terutama Breaker dan kontaktornya dan juga ukuran kabelnya.



Gambar 2.22 Sakelar ATS

Sakelar Automatic Transfer Switch berfungsi untuk memindahkan sumber listrik secara otomatis atau manual dari PLTS ke sumber listrik yang sumber listrik lain yaitu PLN. Ada 2 mode sistem ini bekerja, yaitu :

- Mode Otomatis, pada saat saklar otomatis dipilih, maka ketika sumber power utama PLTS OFF, secara otomatis ATS akan memindahkan sumber power ke sumber power cadangan PLN dengan catatan sumber power cadangan sudah posisi ON. ketika sumber power utama PLTS ON kembali, ATS akan secara otomatis memindahkan sumber power kembali ke PLTS.
- Mode Manual, cara ini dilakukan dengan mematikan saklar ke posisi OFF, pada saat PLTS mati, maka proses pemindahan sumber listrik harus dilakukan secara manual dengan memutar switch pada ATS.

Prinsip kerja ATS menggunakan , medan magnet yang ditimbulkan oleh terjadinya aliran listrik ke dalam spool magnetik, sehingga mampu menarik kontak ke arah jalur yang bekerja.

ATS dapat berupa kesatuan unit panel yang menggunakan rangkaian elektronik pengatur kombinasi sejumlah konduktor.



Seiring dengan perkembangan teknologi. ATS tidak lagi harus berupa unit panel yang sangat mahal hanya untuk fungsi sebagai ATS. ATS saat ini juga dipergunakan sebagai sebutan untuk unit ATS kompak yang sangat sederhana menggunakan sumber arus yang mengalir untuk bekerja.

Dengan adanya ATS generasi terbaru tersebut, maka ruang panel akan semakin luas dan siap untuk dipasang peralatan lain tanpa tertutup oleh banyak komponen untuk ATS seperti sebelumnya.

Saat arus PLN mengalir, maka ATS tidak bekerja walaupun PLTS sedang bekerja, sedangkan ATS akan bekerja atau mengalihkan hubungan ke PLTS apabila sumber listrik PLN di padamkan.

2.7 Energi Listrik

Energi didefinisikan sebagai suatu kemampuan untuk melakukan kerja. Ada berbagai jenis energi, misal energi mekanis, energi kimia, energi listrik, juga energi panas maupun energi cahaya. Energi-energi tersebut tidak dapat diciptakan ataupun dimusnahkan, namun sangat mudah untuk berubah bentuk. Hal ini sesuai dengan hukum kekekalan energi . Satuan energi menurut Satuan Internasional adalah Joule, selain itu energi juga dinyatakan dalam kalori, BTU, atau Watt hour.

Energi listrik adalah energi utama yang dibutuhkan bagi peralatan listrik/energi yang tersimpan dalam arus listrik dengan satuan amper (A) dan tegangan listrik dengan satuan Volt (V) dengan ketentuan kebutuhan konsumsi daya listrik dengan satuan Watt (W) untuk menggerakkan motor, lampu penerangan, memanaskan, mendinginkan ataupun untuk menggerakkan kembali suatu peralatan mekanik untuk menghasilkan bentuk energi yang lain. Energi yang dihasilkan ini dapat berasal dari berbagai sumber misalnya, air, minyak, batu bara, angin, panas bumi, nuklir, matahari dan lainnya.

Energi listrik merupakan suatu bentuk energi yang berasal dari sumber arus.3 Energi listrik dapat diubah menjadi bentuk lain, misalnya :

- Energi listrik menjadi energi kalor / panas, contoh: setrika, solder, dan kompor listrik.
- Energi listrik menjadi energi cahaya, contoh: lampu.



- Energi listrik menjadi energi mekanik, contoh: motor listrik.
- Energi listrik menjadi energi kimia, contoh: peristiwa pengisian accu, peristiwa penyepuhan (peristiwa melapisi logam dengan logam lain).

Jika arus listrik mengalir pada suatu penghantar yang berhambatan R , maka sumber arus akan mengeluarkan energi pada penghantar yang bergantung pada:

- Beda potensial pada ujung-ujung penghantar (V).
- Kuat arus yang mengalir pada penghantar (i)
- Waktu atau lamanya arus mengalir (t).

Berdasarkan pernyataan di atas, dan karena harga $V = I.R$ maka persamaan energi listrik dapat dirumuskan dalam bentuk :

$$W = V.I.t \text{ (satuan Wh)} \dots\dots\dots (2.1)$$

$$W = (I.R).I.t \text{ (satuan Wh)} \dots\dots\dots (2.2)$$

$$W = I^2.R.t \text{ (satuan Wh)} \dots\dots\dots (2.3)$$

Keuntungan menggunakan energi listrik:

- Mudah diubah menjadi energi bentuk lain.
- Mudah ditransmisikan.
- Tidak banyak menimbulkan polusi/ pencemaran lingkungan.

Energi listrik yang dilepaskan itu tidak hilang begitu saja, melainkan berubah menjadi panas (kalor) pada penghantar. Besar energi listrik yang berubah menjadi panas (kalor) dapat dirumuskan :

$$Q = 0,24 V i t \dots\dots\dots (2.4)$$

$$Q = 0,24 i^2 R t \dots\dots\dots (2.5)$$

$$Q = 0,24 V^2.t/R \dots\dots\dots (2.6)$$

Keterangan :

Q = banyaknya energi / panas yang dibutuhkan atau diserap (Kalori)

V = Tegangan (Volt)

I = Arus yang mengalir (Ampere)

t = waktu yang dibutuhkan dalam menyerap energi

Jika V , i , R , dan t masing-masing dalam volt, ampere, ohm, dan detik, maka panas (kalor) dinyatakan dalam kalori. Besarnya energi listrik sebanding dengan besarnya daya yang terpakai pada peralatan listrik terhadap waktu. Semakin lama



daya yang terpakai maka semakin besar energy listrik yang digunakan. Energi listrik didefinisikan sebagai laju penggunaan daya listrik dikalikan dengan selama waktu tersebut.

Untuk mencari mencari energi listrik yang terpakai dapat digunakan rumus di bawah ini.

$$W = P \times t \dots\dots\dots (2.7)$$

Dimana,

$$P = V \times I \dots\dots\dots (2.8)$$

Keterangan :

W = Energi listrik yang terpakai (watt-jam)

P = Daya listrik yang terpakai (watt)

V = Tegangan pada peralatan listrik (Volt)

I = Arus listrik yang mengalir (Ampere)

t = Waktu pemakain listrik (sekon)

Dari keterangan di atas satuan energy listrik adalah watt – jam, jika dikonversikan ke dalam satuan energi yang sebenarnya maka :

$$1 \text{ watt} = 1 \text{ joule/second}$$

$$1 \text{ watt sekon} = 1 \text{ joule}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ kilowattjam} &= 1000 \text{ watt} \times 3.600 \text{ sekon} \\ &= 3.600.000 \text{ joule} \end{aligned}$$

Namun perhitungan untuk energi listrik biasanya langsung dikalikan per jam. Jadi energi listrik yang terpakai dalam 1 kWh = 3.600.000 joule.

2.8 Daya Listrik⁷

Daya listrik adalah banyaknya energi tiap satuan waktu dimana pekerjaan sedang berlangsung atau kerja yang dilakukam dalam persatuan waktu. Dari definisi ini, maka daya listrik (P) dapat dirumuskan sebagai berikut :

$$\text{Daya} = \text{Energi/waktu}$$

$$P = W/t$$

$$P = V.i.t/t = V.i$$

⁷Owen Bishop, "Dasar-dasar Elektronika", (Jakarta: Penerbit Erlangga, 2004) hal:49



$$P = i^2 \cdot R$$

$$P = V^2 \cdot R \text{ (dalam satuan volt-ampere, VA) (2.9)}$$

Satuan daya listrik :

a. watt (W) = joule/detik

b. kilowatt (kW): 1 kW = 1000 W.

Dari satuan daya maka muncul lah satuan energi lain yaitu jika daya dinyatakan dalam kilowatt (kW) dan waktu dalam jam, maka satuan energi adalah kilowatt jam atau kilowatt-hour (kWh).

$$1 \text{ kWh} = 36 \times 10^5 \text{ joule}$$

Dalam satuan Internasional (SI), satuan daya adalah watt (W) atau setara Joule per detik (J/sec). daya listrik juga diekspresikan dalam watt (W) atau kilowatt (kW). Konversi antara satuan HP dan watt, dinyatakan dengan formula sebagai berikut :

$$1 \text{ HP} = 746 \text{ W} = 0,746 \text{ kW}$$

$$1 \text{ kW} = 1,34 \text{ HP}$$

2.8.1 Daya Aktif

Merupakan daya listrik yang dibutuhkan oleh peralatan listrik untuk mengoperasikan peralatan tersebut. Atau dengan kata lain daya aktif adalah daya yang terpakai oleh peralatan listrik. Daya aktif mempunyai nilai besaran dan arah. Besarnya daya aktif dapat dicari dengan menggunakan rumus di bawah ini :

$$P = V \cdot I \cos \varphi \text{ (Untuk 1 Phasa) (2.10)}$$

$$P = \sqrt{3} V \cdot I \cos \varphi \text{ (Untuk 3 Phasa) (2.11)}$$

Dengan :

P = daya aktif yang diserap beban (watt)

V = tegangan yang mencatu beban (volt)

I = arus yang mengalir pada beban (A)

$\cos \varphi$ = faktor daya (0,85)



2.8.2 Daya Reaktif

Daya reaktif merupakan daya yang tidak terpakai dalam suatu system tenaga listrik. Yang akan kembali lagi ke system distribusi tenaga listrik. Adanya daya reaktif juga sering dipengaruhi oleh beban induktif atau kapasitif suatu rangkaian listrik. Secara matematis daya reaktif dapat dicari dengan menggunakan rumus di bawah ini :

$$Q = V \cdot I \sin \varphi \text{ (Untuk 1 Phasa) } \dots\dots\dots (2.12)$$

$$Q = \sqrt{3} V \cdot I \sin \varphi \text{ (Untuk 3 Phasa) } \dots\dots\dots (2.13)$$

Dengan :

Q = daya reaktif (VAR)

V = tegangan yang mencatu beban (volt)

I = arus yang mengalir pada beban (A)

$\sin \varphi$ = faktor reaktif

2.8.3 Daya Semu

Daya semu adalah daya hasil resultan atau penjumlahan dari daya aktif dan daya reaktif. Umumnya daya semu ini adalah daya sambung yang tertera pada kWh meter atau dengan kata lain daya semu adalah daya yang diberikan oleh sumpai tenaga listrik. Dalam masyarakat umum daya inilah yang diberikan langsung oleh PLN dalam satuan VA(Volt Amper). Secara matematis daya semu dapat duhitng dengan rumus di bawah ini :

$$S = V \times I \text{ (untuk 1 Phasa) } \dots\dots\dots (2.14)$$

$$S = \sqrt{3} \times V \times I \text{ (untuk 3 Phasa) } \dots\dots\dots (2.15)$$

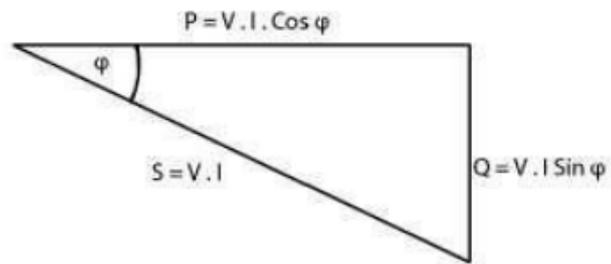
Keterangan :

S = Daya semu (VA)

I = Arus yang mengalir (Ampere)

V = Tegangan (Volt)

Adapun hubungan antara daya aktif, daya reaktif dan daya semu dapat digambarkan dalam sebuah diagram daya seperti di bawah ini :



Gambar 2.23 Segitiga Daya