



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) adalah suatu pembangkit listrik yang menggunakan sinar matahari melalui sel surya (*photovoltaic*) untuk mengkonversikan radiasi sinar foton matahari menjadi energi listrik. Sel surya merupakan lapisan-lapisan tipis dari bahan semikonduktor silikon (Si) murni, dan bahan semikonduktor lainnya. PLTS memanfaatkan cahaya matahari untuk menghasilkan listrik DC, yang dapat diubah menjadi listrik AC apabila diperlukan, oleh karena itu meskipun cuaca mendung, selama masih terdapat cahaya, maka PLTS tetap dapat menghasilkan listrik.



Gambar 2.1 Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) pada dasarnya adalah pencatu daya, dan dapat dirancang untuk mencatu kebutuhan listrik yang kecil sampai dengan besar, baik secara mandiri maupun *hybrid* (dikombinasikan dengan sumber energi

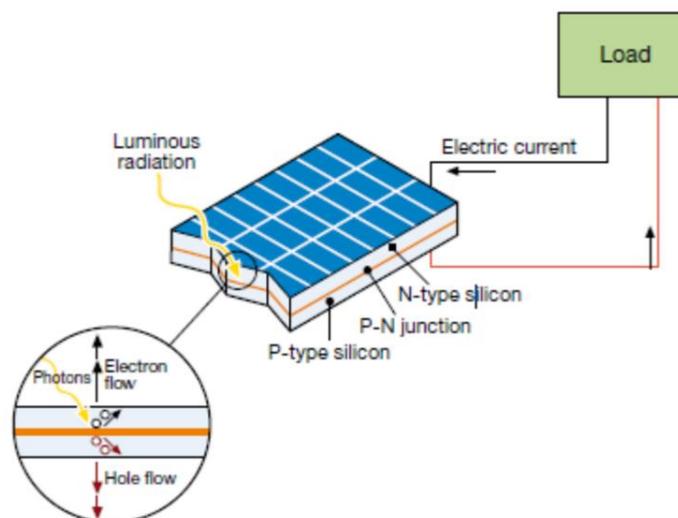


lain), baik dengan metode desentralisasi (satu rumah satu pembangkit) maupun dengan metode sentralisasi (listrik didistribusikan dengan jaringan kabel).¹

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan dari sumber energi terbarukan, dimana sinar matahari sebagai sumber energi yang tidak ada habisnya, selain itu Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan pembangkit listrik yang ramah lingkungan tanpa ada bagian yang berputar, tidak menimbulkan kebisingan, dan tanpa mengeluarkan gas buangan/limbah.

2.2 Prinsip kerja Sel Surya

Mekanisme konversi energi cahaya terjadi akibat adanya perpindahan elektron bebas di dalam suatu atom. Sel surya pada umumnya menggunakan material semikonduktor sebagai penghasil elektroda bebas. Material semikonduktor adalah suatu padatan berupa logam, yang konduktifitas elektriknya ditentukan oleh elektron valensinya. Material semikonduktor konduktifitasnya akan meningkat secara signifikan.



Gambar 2.2 Prinsip Kerja Sel Surya

¹ Yuni Rahmawati dan Sujito, *Pembangkit Listrik Tenaga Surya* (Malang : Jurusan Pembangkit Tenaga Listrik Universitas Negeri Malang, 2019), hal 21 – 22.



Saat foton dari sumber cahaya menumbuk suatu elektron valensi dari atom semikonduktor, akan mengakibatkan suatu energi yang cukup besar untuk memisahkan elektron tersebut terlepas dari struktur atomnya. Elektron yang terlepas tersebut bermuatan negatif menjadi bebas bergerak di dalam bidang Kristal dan berada pada daerah pita konduksi dari material semi konduktor. Hilangnya elektron mengakibatkan terbentuknya suatu kekosongan pada struktur kristal yang disebut dengan “hole” dengan muatan positif. Daerah semikonduktor dengan elektron bebas dan bersifat negatif bertindak sebagai donor elektron.

Daerah ini disebut *negative type (n-type)*. Sedangkan daerah semikonduktor dengan hole, bersifat positif dan bertindak sebagai penerima (*acceptor*) elektron. Daerah ini disebut dengan *positive type (p-type)*. Ikatan dari kedua sisi positif dan negatif menghasilkan energi listrik internal yang akan mendorong elektron bebas dan hole untuk bergerak kearah yang berlawanan. Elektron akan bergerak menjauhi sisi negatif, sedangkan hole bergerak menjauhi sisi positif. Ketika *p-n junction* ini dihubungkan dengan sebuah beban (lampu) maka akan tercipta sebuah arus listrik.

Silikon adalah suatu material semikonduktor bervalensi empat. Keunggulan dari silikon adalah memiliki resistifitas yang sangat tinggi hingga 300.000 Ωcm dan ketersediaan yang banyak di alam. Namun kekurangannya adalah biaya produksi silikonwafer yang sangat tinggi. Dikarenakan untuk mendapatkan performa sel surya yang baik dibutuhkan silikon dengan kemurnian sangat tinggi yaitu di atas 99,9%. Untuk mengurangi biaya produksi, maka pengembangan dilakukan dengan meminimalisir material yang digunakan.

2.3 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Berdasarkan aplikasi dan konfigurasinya, secara garis besar PLTS diklarifikasi menjadi dua yaitu. Sistem PLTS yang tidak terhubung dengan jaringan (*off-grid PV plant*), atau lebih dikenal dengan sebutan PLTS berdiri sendiri (*stand-alone*), dan sistem PLTS terhubung dengan jaringan (*grid-connected PV plant*) atau lebih dikenal dengan sebutan PLTS *On-grid*. Sedangkan apabila PLTS dalam penggunaannya digabung dengan jenis pembangkit listrik lain disebut sistem *hybrid*.



Menurut IEEE standard 929-2000 sistem PLTS dibagi menjadi tiga kategori, yaitu PLTS skala kecil dengan batas 10 kW atau kurang, skala menengah dengan batas antara 10 kW hingga 500 kW, skala besar dengan batas di atas 500 kW (Omran, IEEE, 2000).

Sedangkan, menurut buku Energi Surya untuk Komunitas (2017), Secara umum PLTS memiliki dua jenis sistem ditinjau dari pembangkitannya, yakni PLTS Tersebar dan PLTS Terpusat. PLTS Tersebar berarti peralatan PLTS dipasang di rumah-rumah sebagai penerima manfaat. Ini biasa disebut PLTS *rooftop* atau PLTS Solar Home System (SHS). Sementara itu, PLTS Terpusat berarti PLTS dipasang di satu lokasi yang relatif luas untuk kemudian didistribusikan dengan kabel ke rumah – rumah penerima manfaat.²

2.3.1 PLTS Terpusat (*Off-Grid*)

Suatu PLTS *off-grid* yang dikelola secara komunal atau yang sering disebut sistem PLTS berdiri sendiri (*stand-alone*), beroperasi secara independen tanpa terhubung dengan jaringan PLN.³ Sistem PLTS *off-grid* ini hanya mengandalkan energi matahari sebagai satu-satunya sumber energi utama dengan menggunakan rangkaian *photovoltaic module* untuk menghasilkan energi listrik sesuai kebutuhan. Sistem ini membutuhkan baterai untuk menyimpan energi listrik yang dihasilkan di siang hari untuk memenuhi kebutuhan listrik di malam hari.

Stand-alone PV system atau Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya Terpusat (PLTS Terpusat) merupakan sistem pembangkit listrik alternatif untuk daerah-daerah terpencil/pedesaan yang tidak terjangkau oleh jaringan PLN.

² Rachmawan Budiarto, dkk, *Energi Surya untuk Komunitas: Meningkatkan Produktivitas Masyarakat Pedesaan Melalui Energi Terbarukan*. (Jakarta : Lembaga Kajian dan Pengembangan Sumber Daya Manusia, 2017), hal 33.

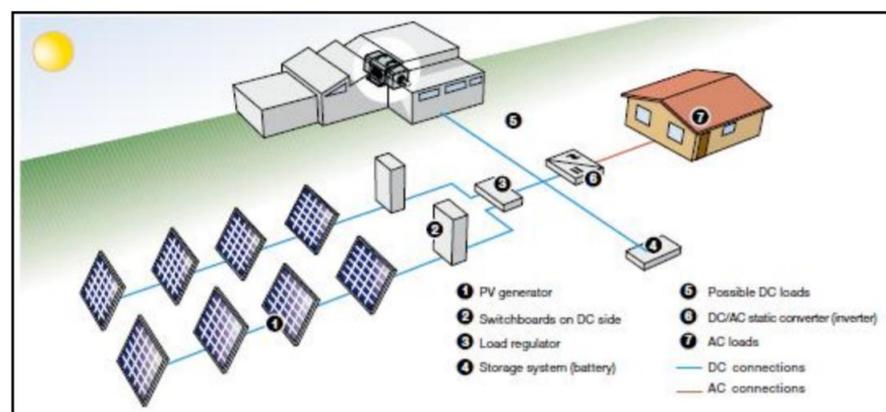
³ Bagus Ramadhani, *Instalasi Pembangkit Listrik Tenaga Surya : Dos & Don'ts*. (Jakarta : Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 2018), hal 1 – 3.



2.3.1.1 Prinsip Kerja PLTS (*Off-Grid*)

Prinsip Kerja Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) *Off-Grid* dapat diuraikan sebagai berikut :

- a. Pada PLTS sistem terpusat ini, sumber energi listrik yang dihasilkan oleh modul surya (PV) pada siang hari akan disimpan dalam baterai. Proses pengisian energi listrik dari PV ke baterai diatur oleh *Solar Charge Controller* agar tidak terjadi *over charge*. Besar energi yang dihasilkan oleh PV sangat tergantung kepada intensitas penyinaran matahari yang diterima oleh PV dan efisiensi *cell*. Intensitas matahari maksimum mencapai 1000 W/m^2 , dengan efisiensi *cell* 14% maka daya yang dapat dihasilkan oleh PV adalah sebesar 140 W/m^2 .
- b. Selanjutnya energi yang tersimpan dalam baterai digunakan untuk menyuplai beban melalui inverter saat dibutuhkan. Inverter mengubah tegangan DC pada sisi baterai menjadi tegangan AC pada sisi beban.



Gambar 2.3 Prinsip Kerja PLTS (*Off-Grid*)



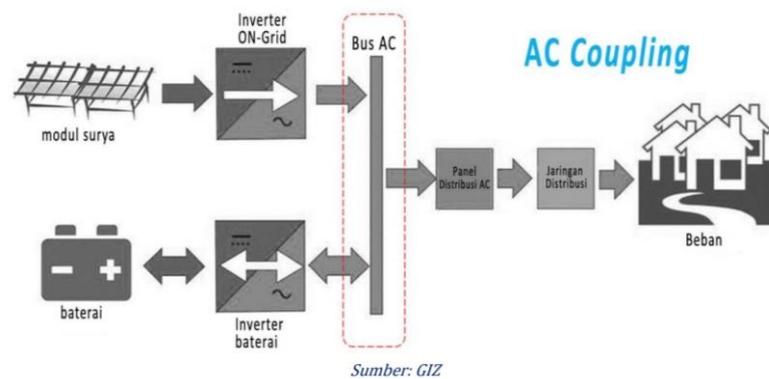
2.3.1.2 Konfigurasi PLTS (*Off-Grid*)⁴

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

a. 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) bertanggung jawab 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).

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 4 – 5.



Gambar 2.4 Diagram Sistem PLTS *Off-Grid* tipe *AC Coupling*

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*.

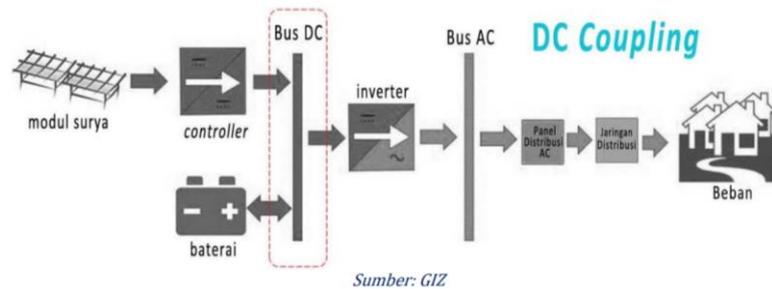
Ketika PLTS kehilangan suplai energi matahari, inverter baterai akan memutus inverter *grid-tied* dari sistem kelistrikan kemudian inverter baterai akan mengambil alih sinkronasi dengan menyuplai tegangan listrik AC ke utilitas. Pada situasi ini, *Bidirectional Inverter* menjalankan fungsi inverter untuk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

b. 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.



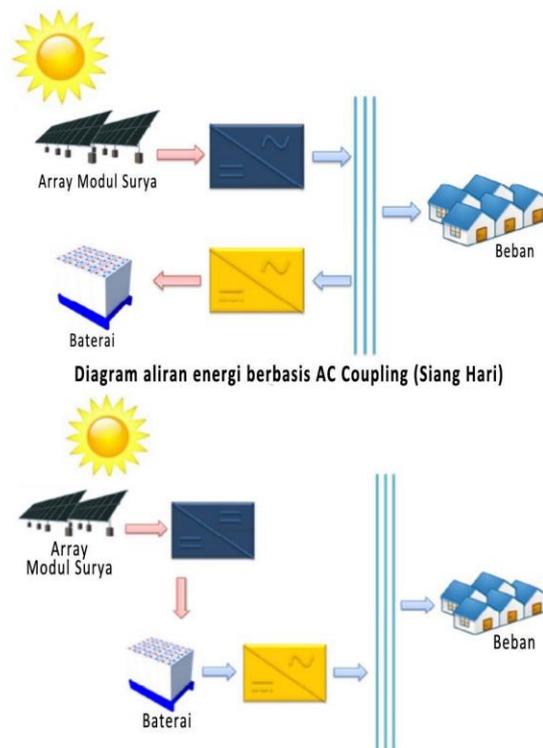
Gambar 2.5 Diagram Sistem PLTS *Off-Grid* tipe *DC Coupling*

2.3.1.3 Pola Operasi PLTS (*Off-Grid*)

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

a. Siang Hari pada saat Energi PLTS (*Off-Grid*) lebih besar dari kebutuhan beban

Besar energi yang dihasilkan oleh PLTS *off-grid* sangat tergantung kepada intensitas penyinaran matahari yang diterima oleh modul surya dan efisiensinya. Intensitas matahari maksimum mencapai 1000 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 2.6.



Gambar 2.6 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* / *inverter on-grid*, apabila beban sudah tercukupi energi berlebih yang dihasilkan modul surya digunakan untuk pengisian baterai melalui inverter baterai / *inverter bidirectional*.

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

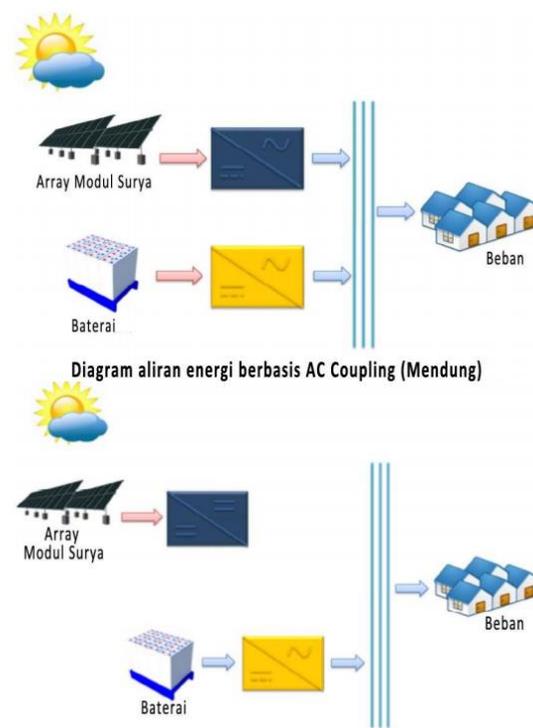


b. Siang Hari pada saat Energi PLTS (*Off-Grid*) lebih kecil dari kebutuhan beban

Kondisi ini dapat terjadi apabila :

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

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



Gambar 2.7 Diagram Aliran Energi yang dihasilkan pada Kondisi Berawan/Mendung

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.

c. 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 arus searah (DC) pada sisi baterai menjadi arus arus bolak-balik (AC) ke sisi beban. Diagram aliran energi pada malam hari dapat dilihat pada Gambar 2.8.

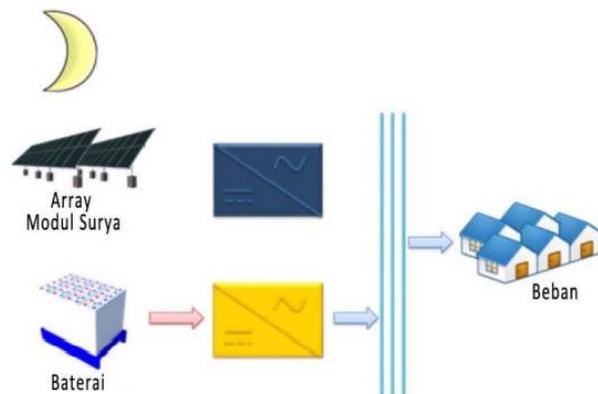
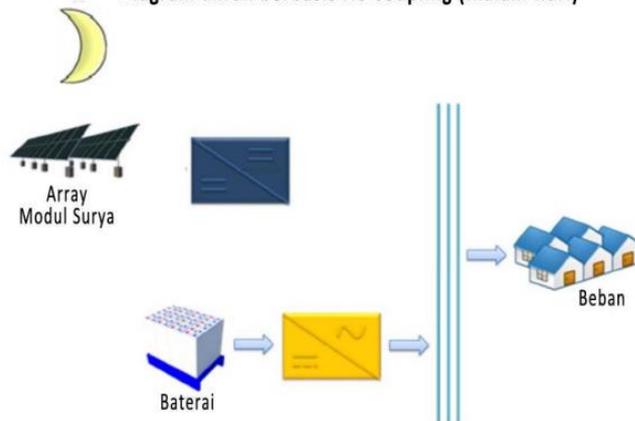


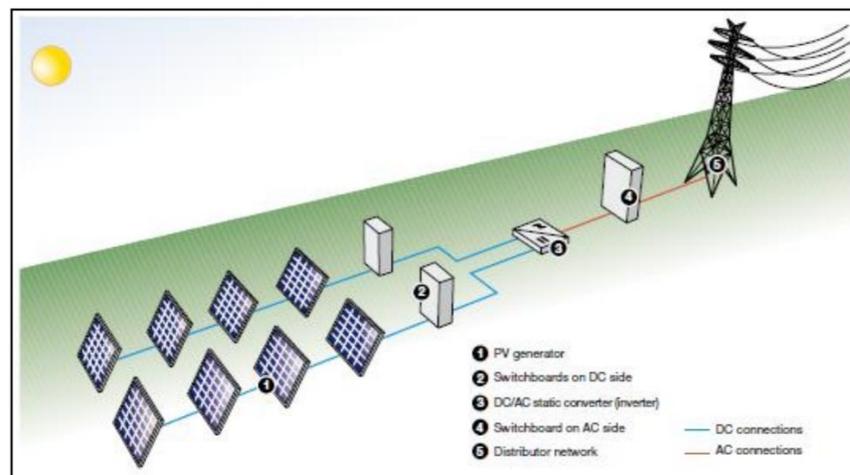
Diagram aliran berbasis AC Coupling (Malam Hari)



Gambar 2.8 Diagram Aliran Energi pada Malam Hari

2.3.2 PLTS Terinterkoneksi (*On-Grid*)

Grid Connected PV System atau PLTS terinterkoneksi merupakan solusi *Green Energi* bagi penduduk perkotaan baik perumahan ataupun perkantoran. Sistem ini menggunakan modul surya (*photovoltaic module*) untuk menghasilkan listrik yang ramah lingkungan dan bebas emisi. Dengan adanya sistem ini akan mengurangi tagihan listrik rumah tangga, dan memberikan nilai tambah pada pemiliknya. Sesuai namanya, *grid connected PV*, maka sistem ini akan tetap berhubungan dengan jaringan PLN dengan mengoptimalkan pemanfaatan energi PV untuk menghasilkan energi listrik semaksimal mungkin.



Gambar 2.9 Prinsip Kerja PLTS (*On-Grid*)

2.3.3 PLTS *Hybrid*

Sistem *hybrid* yaitu sistem yang melibatkan 2 atau lebih sistem pembangkit listrik, umumnya sistem pembangkit yang banyak digunakan untuk *hybrid* adalah genset, PLTS, Mikrohidro, dan tenaga angin. Sehingga sistem *hybrid* bisa berarti PLTS-Genset, PLTS-Mikrohidro, PLTS-Tenaga Angin, dan lainnya. Di Indonesia sistem hybrid telah banyak digunakan, baik PLTS Genset, PLTS Mikrohidro, maupun PLTS tenaga angin-mikrohidro. Namun demikian hybrid PLTS-Genset yang paling banyak dipakai. Umumnya digunakan pada captive genset/*isolated grid* (*stand alone* genset, yakni genset yang tidak diinterkoneksi).

Tujuan dari *Hybrid PV-Genset* adalah mengkombinasikan keunggulan dari setiap pembangkit (dalam hal ini genset dan PLTS) sekaligus menutupi kelemahan masing-masing pembangkit untuk kondisi-kondisi tertentu, sehingga secara keseluruhan sistem dapat beroperasi lebih ekonomis dan efisien. Kombinasi *Hybrid PV-Genset* akan mengurangi jam operasi genset (misalnya dari 24 jam per hari menjadi hanya 4 jam per hari pada saat *peak load* saja) sehingga biaya operasi dan manajemen dapat lebih efisien, sementara PLTS digunakan untuk mencatu *base load*, sehingga tidak



dibutuhkan investasi awal yang besar. Dengan demikian *Hybrid PV-Genset* akan dapat menghemat operasi dan management cost, mengurangi inefisiensi penggunaan genset, serta sekaligus menghindari kebutuhan investasi awal yang besar.



Gambar 2.10 Skema *Hybrid Photovoltaic Power System*

2.4 Komponen Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS)

Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) merupakan suatu kesatuan sistem yang terdiri dari beberapa komponen, baik komponen utama maupun komponen pendukung, diantaranya yaitu:

2.4.1 *Solar Cell (Photovoltaic)*

Solar cell atau sel surya adalah alat untuk mengkonversi tenaga matahari menjadi energi listrik. *Photovoltaic* adalah teknologi yang berfungsi untuk mengubah atau mengkonversi radiasi matahari menjadi energi listrik secara langsung. PV biasanya dikemas dalam sebuah unit yang disebut modul. Dalam sebuah modul surya terdiri dari banyak sel surya yang bisa disusun secara seri maupun paralel. Sedangkan yang dimaksud dengan surya adalah

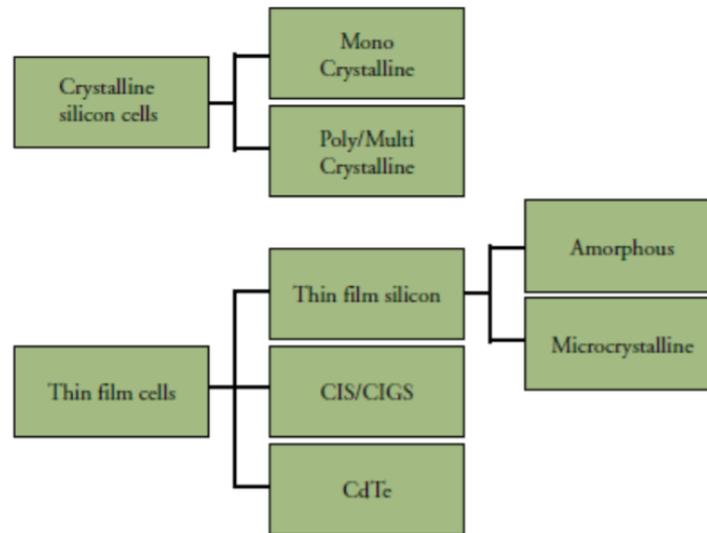


sebuah elemen semikonduktor yang dapat mengkonversi energi surya menjadi energi listrik atas dasar efek *photovoltaic*.

2.4.1.1 Teknologi Solar Cell

Unjuk kerja sel surya dalam mengkonversikan energi foton dari sinar matahari menjadi energi listrik tidak terlepas dari teknologi yang digunakan oleh sel surya itu sendiri. Teknologi yang dimaksudkan seperti jenis material yang digunakan sebagai bahan utama pembuatan sel surya, maupun proses/teknologi pembuatannya. Bahan semikonduktor jenis silikon merupakan bahan yang paling umum digunakan dalam pembuatan sel surya, meskipun saat ini digunakan juga jenis bahan seperti *cadmium telluride* dan *copper indium (gallium) di-selenide*. Setiap bahan memiliki karakteristik yang unik dan memiliki pengaruh kuat terhadap performa sel surya, metode pabrikasi, dan dari segi biaya.

Sel surya salah satunya terbuat dari teknologi irisan silikon (*silikon wafers*), pembuatannya dengan cara memotong/mengiris tipis silikon dari balok batang silikon. Sel surya juga bisa terbuat dari teknologi film tipis biasa disebut thin film *technologies*, dimana lapisan tipis dari bahan semikonduktor diendapkan pada *low-cost substrates*. Sel surya selanjutnya digolongkan sesuai dengan batasan struktur dari bahan semikonduktornya seperti, *mono-crystalline*, *multicrystalline (poly-crystalline)* atau *amorphous material* (Setiawan, Agus (2014)).



Gambar 2.11 Kelas Teknologi Sel Surya

a. Crystalline Silikon (c-Si)

Teknologi pertama yang berhasil dikembangkan oleh para peneliti adalah teknologi yang menggunakan bahan silikon kristal tunggal. Teknologi ini mampu menghasilkan sel surya dengan efisiensi yang sangat tinggi. Teknologi *crystalline silikon (c-Si)* dibagi menjadi dua yaitu *monocrystalline* dan *multi-crystalline (poly-crystalline)*.

- Monocrystalline

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



pembuatan dengan sel surya atau sel photovoltaic dengan metode Czochralski. Proses pembuatan produksi selsel ini sangat mahal dan panjang dalam menciptakan silikon.



Gambar 2.12 Panel *Monocrystalline*

- ***Polycrystalline***

Polycrystalline terbuat dari batang silikon yang dihasilkan dengan cara dilelehkan dan dicetak oleh pipa paralel, didinginkan untuk membentuk Ingot. Ingot tersebut kemudian dipotong menjadi bagian-bagian yang lebih kecil dengan ukuran 40 x 40 cm², kemudian diiris menjadi wafer tipis. Wafers sel surya ini biasanya berbentuk persegi dengan ketebalan 180- 300 μm. Sel surya *Polycrystalline* mempunyai efisiensi (12 – 14%). *Polycrystalline* dibuat dengan tujuan untuk menurunkan harga produksi, sehingga memperoleh sel surya dengan harga yang lebih murah.



Gambar 2.13 Panel *Polycrystalline*

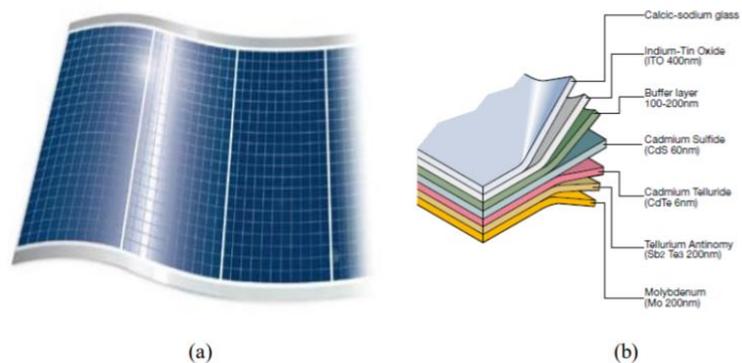
b. Lapisan Tipis (*Thin Film*)

Teknologi kedua adalah sel surya yang dibuat dengan teknologi lapisan tipis (*thin film*). Teknologi pembuatan sel surya dengan lapisan tipis ini dimaksudkan untuk mengurangi biaya pembuatan solar sel mengingat teknologi ini hanya menggunakan kurang dari 1% dari bahan baku silikon jika dibandingkan dengan bahan baku untuk tipe silikon wafer. Metode yang paling sering dipakai dalam pembuatan silikon jenis lapisan tipis ini adalah dengan *plasma-enhanced chemical vapor deposition* (PEVCD) dari gas silane dan hidrogen. Lapisan yang dibuat dengan metode ini menghasilkan silikon yang tidak memiliki arah orientasi kristal atau yang dikenal sebagai amorphous silikon (non kristal).

Selain menggunakan material dari silikon, sel surya lapisan tipis juga dibuat dari bahan semikonduktor lainnya yang memiliki efisiensi solar sel tinggi seperti *Cadmium Telluride* (Cd Te) *Amorphous Silikon* (aSi), *Cadmium Sulfide* (CdS), *Gallium Arsenide* (GaAs), *Copper Indium Selenide* (CIS), dan *Copper Indium Gallium Selenide* (CIGS). Efisiensi tertinggi



saat ini yang bisa dihasilkan oleh jenis solar sel lapisan tipis ini adalah sebesar 19,5% yang berasal dari solar sel CIGS. Keunggulan lainnya dengan menggunakan tipe lapisan tipis adalah semikonduktor sebagai lapisan solar sel bisa dideposisi pada substrat yang lentur sehingga menghasilkan *device solar* sel yang fleksibel (Setiawan, Agus (2014)).



Gambar 2.14 (a) Modul Surya jenis *Thin Film*
(b) Struktur *Thin Film* dengan bahan CdTe-CdS

2.4.1.2 Sistem Instalasi *Solar Cell*

Terdapat dua sistem dalam instalasi *solar cell*, yaitu sistem dengan rangkaian seri dan sistem dengan rangkaian paralel.

a. Rangkaian Seri *Solar Cell*

Hubungan seri suatu sel surya didapat apabila bagian depan (+) sel surya utama dihubungkan dengan bagian belakang (-) sel surya kedua

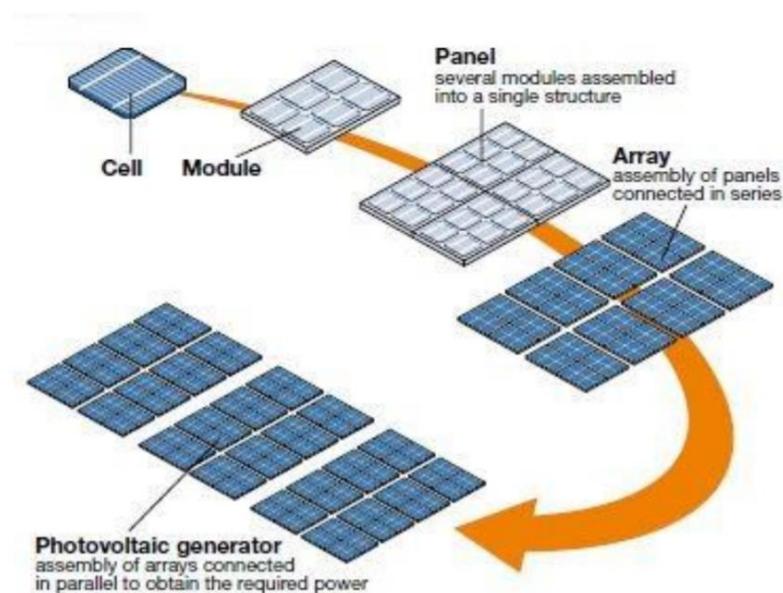
b. Rangkaian Paralel *Solar Cell*

Rangkaian paralel *solar cell* didapat apabila terminal kutub positif dan negatif *solar cell* dihubungkan satu sama lain.

2.4.2 Modul Surya



Modul surya atau *Photovoltaic Module* merupakan komponen PLTS yang tersusun dari beberapa sel surya yang dirangkai sedemikian rupa, baik dirangkai seri maupun paralel dengan maksud dapat menghasilkan daya listrik tertentu dan disusun pada satu bingkai (*frame*) dan dilaminasi atau diberikan lapisan pelindung. Kemudian susunan dari beberapa modul surya yang terpasang sedemikian rupa pada penyangga disebut array. PV modul yang terangkai seri dari sel-sel surya ditujukan untuk meningkatkan, atau dalam hal ini dapat dikatakan menggabungkan tegangan (VDC) yang dihasilkan setiap selnya. Sedangkan untuk arusnya dapat didesain sesuai kebutuhan dengan memperhatikan luas permukaan sel.



Gambar 2.15 Diagram Hubungan antara *Solar Cell*, Modul, Panel dan *Array*

Struktur Modul Modul surya atau *Photovoltaic Module* dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu:

a. Bingkai atau *Frame*



Biasanya terbuat dari aluminium *anodized* untuk menghindari korosi. Oleh karena pemasangan bingkai dilakukan di akhir proses pembuatan, bingkai memiliki fungsi untuk memastikan kekokohan panel.

b. Kaca Pelindung

Melindungi sel fotovoltaik dari lingkungan dan memastikan kekokohan panel. Karena fungsinya tersebut, kaca pelindung mengambil proporsi tertinggi dari total berat modul fotovoltaik.

c. Enkapsulasi atau Laminasi

Enkapsulasi atau Laminasi adalah lapisan antara sel fotovoltaik dan kaca pelindung. Laminasi digunakan untuk mencegah kerusakan mekanis pada sel fotovoltaik dan mengisolasi tegangan dari sel fotovoltaik dengan bagian modul lainnya. Biasanya lembaran laminasi menggunakan bahan *ethylene-vinyl acetate* (EVA).

d. Sel Fotovoltaik

Merupakan komponen utama dari modul fotovoltaik. Sel ini terbuat dari bahan semikonduktor yang menangkap sinar matahari dan mengubahnya menjadi listrik. Sel-sel saling terhubung secara seri untuk mendapatkan tegangan total yang lebih tinggi melalui kawat busbar. Bahan yang digunakan untuk sel fotovoltaik umumnya adalah silikon, seperti *polycrystalline* dan *monocrystalline*.

e. Lembar Insulasi (*Backsheet*)

Terbuat dari bahan plastik untuk melindungi dan secara elektrik mengisolasi sel-sel dari kelembaban dan cuaca.

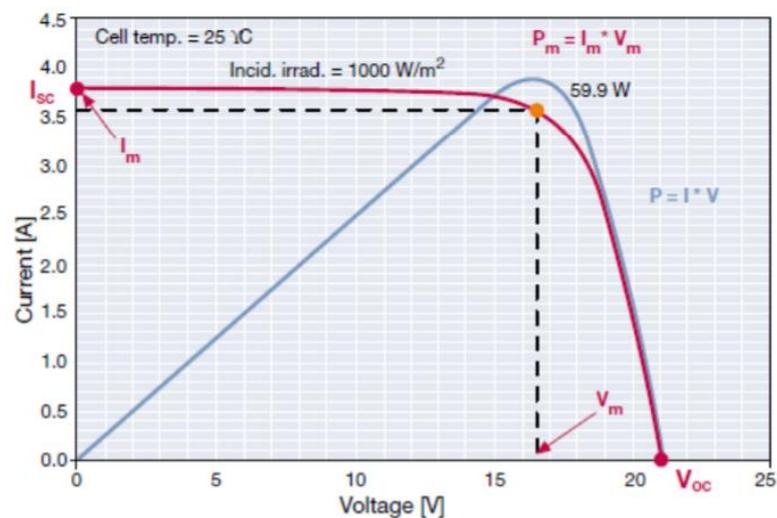
f. Kotak Penghubung (*Junction Box*)



Digunakan sebagai terminal penghubung antara serangkaian sel fotovoltaik ke beban atau ke panel lainnya. Perangkat ini berisi kawat busbar dari rangkaian sel fotovoltaik, kabel dan *bypass diode*.

2.4.2.1 Karakteristik Listrik dari Modul Surya

Karakteristik listrik dari sebuah modul surya secara umum dapat dilihat dari besarnya arus hubung singkat (*short circuit current*) dan tegangan rangkaian terbuka (*open circuit voltage*). Hal ini bertujuan untuk mengetahui besarnya daya puncak (peak power) yang dapat dicapai. Secara sederhana, karakteristik dari modul surya ini diterangkan lewat kurva arus terhadap tegangan (*I-V Curve*).



Gambar 2.16 Kurva Karakteristik Listrik sebuah Modul Surya

Ketika modul mendapatkan pancaran sinar matahari, tegangan yang dihasilkan dapat diukur pada kutub positif dan negatif dengan menggunakan voltmeter. Saat itu tidak ada arus yang mengalir karena sistem belum terhubung dengan beban. Jadi pengukuran ini disebut dengan *open circuit voltage* (V_{oc}). Ketika penerapan beban atau pengisian baterai tersambung diantara kedua terminal, maka arus



mengalir dari modul menuju beban. Saat hal itu terjadi maka tegangan modul lebih kecil daripada V_{oc} .

Dengan menambahkan beban yang tersambung secara paralel, maka arus lebih banyak mengalir dan tegangan menjadi rendah. Untuk arus tertinggi yang dapat dihasilkan modul, kedua terminal modul dapat disambungkan secara langsung, dengan demikian tegangan yang terjadi adalah 0 (*nol/zero*), dan saat ini apabila diukur dengan amperemeter maka dapat diketahui arus maksimum modul tersebut yang disebut short circuit current atau I_{sc} .

Salah satu spesifikasi yang terdapat pada PV (diberikan oleh pabrik pembuat) adalah *peak power* (daya maksimum). Daya listrik ini dapat diperoleh dengan cara menghasilkan arus dan tegangan. Untuk mendapatkan peak power dari modul maka tegangan dan arus harus maksimum, dan ini terdapat pada kurva I-V untuk 1000 W/m (ABB QT Vol. 10).⁵

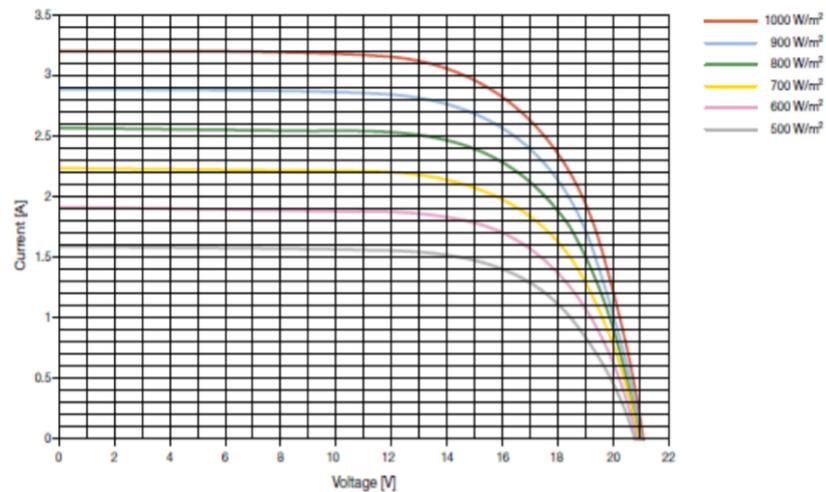
2.4.2.2 Variasi dalam Produksi Energi Modul Surya

Faktor utama yang mempengaruhi modul surya pada suatu PLTS dalam proses produksi energi listrik, adalah sebagai berikut:

a. Iradiasi (besarnya intensitas sinar matahari) pada Modul Surya

Pengaruh iradiasi terhadap produksi energi listrik pada panel surya dapat dilihat pada gambar di bawah, yang memperlihatkan fungsi peristiwa iradiasi terhadap kurva karakteristik tegangan (V) dan arus (I).

⁵ABB, *Technical Application Papers No. 10 : Photovoltaic Plants*, (2010), diakses dari : <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=1SDC007109G0202&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>, Pada tanggal 24 April 2021.



Gambar 2.17 Pengaruh Iradiasi terhadap Tegangan dan Arus Modul Surya

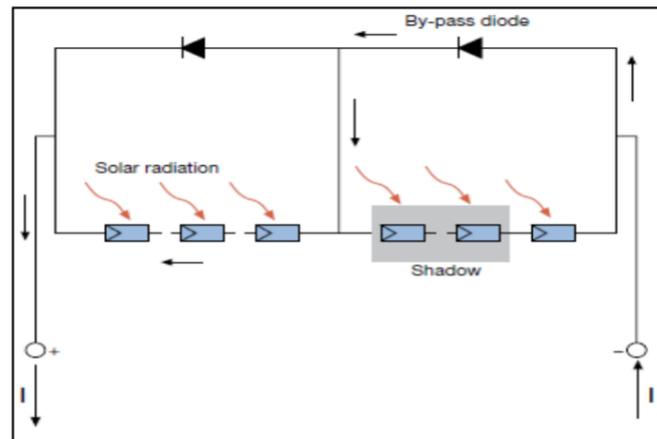
Ketika iradiasi menurun, arus yang dihasilkan oleh modul surya akan menurun dengan proporsional, sedangkan variasi dari tegangan tanpa beban sangatlah kecil. Sebagai suatu kenyataan, efisiensi dari konversi pada modul surya tidak terpengaruh oleh iradiasi yang bervariasi asalkan masih dalam batas standar operasi dari modul surya, yang berarti bahwa efisiensi konversi adalah sama untuk keduanya, baik dalam kondisi cerah begitu juga kondisi mendung, oleh karena itu kecilnya energi listrik yang dihasilkan modul surya saat langit dalam kondisi mendung dapat dijadikan acuan bukannya penurunan efisiensi melainkan penurunan produksi arus listrik karena iradiasi matahari yang rendah.

b. Bayangan (*Shading*)

Berbicara mengenai area yang digunakan oleh modul surya pada suatu PLTS, sebagian darinya (satu atau lebih sel) mungkin



dibayangi atau terhalangi oleh pepohonan, daun yang jatuh, asap, kabut, awan, atau panel surya yang terpasang di dekatnya. Pada khusus shading ini, sel surya yang tertutupi akan berhenti memproduksi energi listrik dan berubah menjadi beban pasif. Sel ini akan berlaku seperti diode dalam kondisi memblok arus yang diproduksi oleh sel lain dalam hubungan seri dan akan membahayakan keseluruhan produksi dari modul surya tersebut, terlebih dapat merusak modul akibat adanya panas yang berlebih. Dalam hal ini menghindari permasalahan yang lebih besar akibat shading pada suatu string, maka diantisipasi dengan penggunaan diode *by-pass* yang terpasang paralel pada masing-masing modul (ABB QT Vol. 10).



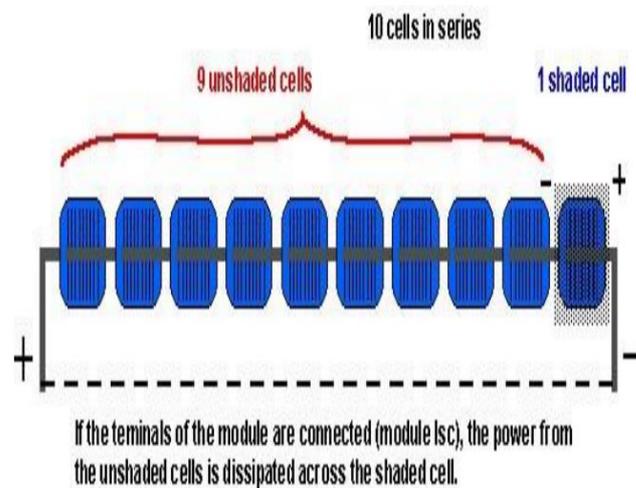
Gambar 2.18 Pengaruh *Shading* terhadap Modul Surya

c. Titik Panas (*Hotspot Heating*) Akibat Bayangan (*Shading*)

Titik pemanasan (*hotspot*) terjadi ketika salah satu sel suryanya terkena bayangan (*shading*) sehingga mengakibatkan



arus sel surya tidak mengalir didalam rangkaian ini yang terhubung seri. Akibatnya beberapa sel surya terjadi arus short-circuit yang tinggi, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.19. mengenai satu sel shading dalam sebuah string. Pada sel surya yang dinaungi bayangan akan menjadi panas dan dapat terbakar.



Gambar 2.19 Satu Sel *Shading* dalam Sebuah *String*

Pengaruh bayangan dalam sebuah sel mengakibatkan penurunan panas arus foton. Efek bayangan tidak hanya diakibatkan oleh bayangan pada modul surya, rumah pembangkit, tiang penyangga, daun – daun, debu, kotoran hewan, awan atau pohon tetapi juga berasal dari sel yang rusak atau buruk. Ketika arus foton pada sel yang rusak atau terkena bayangan menurun, maka arus yang mengalir pada keseluruhan rangkaian seri akan tertahan pada sel surya tersebut. Mengakibatkan pada sel surya yang terkena shading menimbulkan arus yang paling rendah dari sel – sel surya yang tidak terkena shading. Energi panas yang biasa disebut dengan “*hot - spot*”. Jika semakin banyak sel surya tidak terkena



bayangan dengan sel surya yang terkena bayangan menimbulkan energi panas pada sel surya yang terkena panas disipasi daya yang sangat besar terjadi dalam hasil area kecil dititik "*hot - spot*", yang pada gilirannya menyebabkan efek yang merusak, seperti sel atau retak kaca, mencairnya solder atau degradasi sel surya. Untuk memitigasi kerusakan ini digunakan dioda bypass. Dioda *bypass* digunakan untuk *bypass* arus balik.

2.4.3 Penyangga dan Sistem Pelacak (*Mounting and Tracking Systems*)

Modul surya harus terpasang pada suatu struktur/kerangka, untuk menjaganya tetap terarah pada arah yang tepat, agar lebih tersusun rapi dan terlindungi. Struktur pemasangan modul surya bisa pada struktur yang tetap (*fixed*) atau dengan sistem pelacak sinar matahari, atau biasanya disebut *tracking systems*.

2.4.3.1 Sistem Penyangga tetap (*Fixed Mounting Systems*)

Sistem pemasangan tetap (*fixed*) menjaga barisan dari modul surya pada sudut kemiringan yang tetap, menghadap pada suatu sudut tetap dari arah matahari yang telah ditentukan. Sudut kemiringan dan arah/orientasi pada umumnya disesuaikan berdasarkan lokasi PLTS terpasang. Sistem ini lebih sederhana, murah, dan lebih sedikit perawatan daripada sistem *tracking*.

2.4.3.2 Sistem Pelacak (*Tracking Systems*)

Sistem pelacak adalah suatu peralatan atau sistem yang digunakan untuk mengarahkan panel surya atau pemantul cahaya terpusat terhadap matahari, sehingga dengan mengarahkan panel surya secara tepat pada posisi matahari, panel surya tersebut dapat memaksimalkan tegangan yang akan dihasilkannya.



Sistem pengikut atau pelacak memiliki dua jenis pergerakan, yaitu pengikut matahari dengan dua arah gerak (ke arah timur-barat), dan pengikut matahari dengan empat arah gerak (ke arah timur-barat dan ke arah utara-selatan). Pengikut matahari (selanjutnya disebut solar tracker) yang memiliki dua arah gerak (timur-barat) biasanya digunakan pada daerah-daerah yang terletak di luar garis khatulistiwa (*equinox*) dan titik balik matahari (*solstice*). Hal ini dilakukan karena posisi matahari pada daerah tersebut selalu condong ke arah utara dan selatan. Sedangkan pengikut matahari jenis kedua yang memiliki empat arah gerak (timur-barat dan utara-selatan) biasanya digunakan pada daerah yang dilalui oleh garis khatulistiwa atau di dalam titik balik matahari. Hal ini dilakukan karena posisi matahari dalam setiap tahunnya bergerak condong ke arah utara maupun ke selatan.

2.4.4 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 bebannya kecil.
- b. Inverter 3 fasa untuk sistem PLTS yang besar dan terhubung dengan jaringan PLN.



Gambar 2.20 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.

2.4.5 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 beban keluar/digunakan. Berfungsi untuk menjaga baterai dari pengisian yang berlebihan (*over charge*), 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 2.21 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 ($< 0,5$ V) pada sisi PV – baterai dan pada sisi baterai – beban.
- f. Mempunyai “*Blocking Diode*” dan sesuai dengan kapasitas maksimum.

2.4.6 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 malam hari atau pada saat cuaca mendung, selain itu tegangan keluaran ke sistem cenderung lebih stabil. Satuan kapasitas energi yang dihasilkan pada baterai adalah *ampere hour* (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 2.22 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 *nicel 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 lempengan yang terbuat dari lead, dan sebagai elektrolitnya digunakan H₂SO₄ (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. Wadah sel

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.

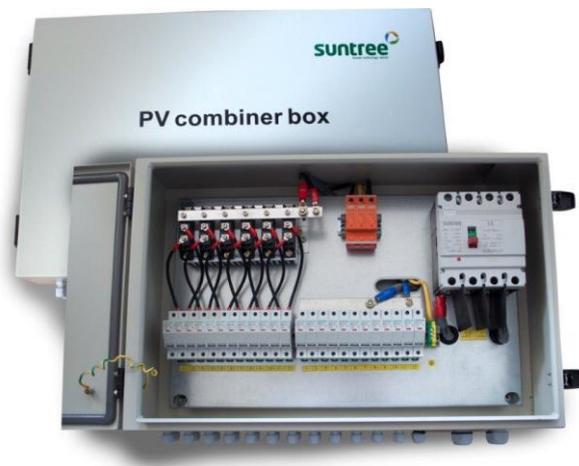
b. *Secondary batteries*

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

2.4.7 *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 2.23 *Combiner Box*

2.4.8 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 2.24 Sistem Monitoring (i)



Gambar 2.25 Sistem *Monitoring* (ii)

2.4.9 Panel Distribusi AC

Panel distribusi tegangan rendah 3 Phasa arus bolak-balik (AC) yang berfungsi menyalurkan daya dari pembangkit ke beban. Panel ini umumnya terdiri dari beberapa *output feeder*.



Gambar 2.26 Panel Distribusi AC

2.4.11 Automatic Transfer Switch (ATS)

Secara umum fungsi dari ATS adalah untuk menghubungkan beban dengan dua sumber tenaga (sumber utama & sumber cadangan) atau lebih yang



terpisah yang bertujuan untuk menjaga ketersediaan dan keandalan aliran daya menuju beban. Secara sederhana fungsi ATS adalah untuk melakukan transfer daya secara otomatis ke beban, dari sebuah sumber utama (jaringan listrik) ke sumber cadangan ketika terjadi gangguan pada sumber utama. Secara luas ATS telah diaplikasikan di industri maupun perkantoran yang membutuhkan sistem kelistrikan dengan tingkat keandalan yang tinggi (Ginting & Sinuraya, 2014).



Gambar 2.27 *Automatic Transfer Switch (ATS)*

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).



Gambar 2.28 Kabel