

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Berdasarkan kajian pustaka sebelumnya telah banyak dilakukan penelitian tentang perencanaan pembangkit listrik tenaga surya, dengan hasil-hasil yang sudah di publikasikan baik secara nasional dan internasional sebagai berikut:

Yogi. Dkk. (2014), melakukan penelitian tentang perencanaan PLTS Terpusat dengan 83 rumah yang akan dialiri listrik dan dibatasi penggunaan energi listriknya sebesar 2425 Wh. Sehingga total pemakaian energi listrik yang digunakan adalah sebesar 203,52 kWh/hari. Untuk memenuhi energi sebesar 203,52 kWh, maka harus dipasang 450 unit panel surya dengan kapasitas per-unit sebesar 330 Wp, 20 unit BCC dengan kapasitas per-unit sebesar 150 A dengan kapasitas total sebesar 3000 A, 168 unit baterai dengan kapasitas per-unit sebesar 2 Volt dc dan 800 Ah dengan kapasitas total 48 Volt, 5600 Ah dan 10 unit inverter dengan kapasitas per-unit sebesar 15.000 Watt dengan kapasitas total 150.000 Watt.

Deden. Dkk. (2014), melakukan penelitian tentang analisa dan perancangan pembangkit listrik tenaga surya dengan menggunakan metode pendekatan perencanaan dengan membuat *prototyping* dalam bentuk maket melalui beberapa tahap yaitu tahap *planning*, desain dan analisa kebutuhan dapat diketahui bahwa untuk memenuhi kebutuhan listrik dengan jumlah 30 unit rumah dan penerangan umum dibutuhkan listrik 13,5 kW per jam. Untuk memenuhi kebutuhan itu, maka diperlukan 207 panel surya, 216 baterai, 6 buah *charge controller* dengan kapasitas 300 Ampere dan 3 buah inverter dengan kapasitas 15 kW.

Wisna. dkk. (2014), yang meneliti tentang analisa kapasitas dan biaya PLTS komunal menentukan kapasitas sistem PLTS (*photovoltaic array*, baterai, *charge controller*, dan *inverter*), potensi pengurangan emisi karbondioksida, perhitungan biaya dan analisis ekonomi. Analisis ekonomi digunakan untuk mengevaluasi keberlangsungan pengoperasian PLTS, metode yang digunakan, yaitu NPW (*Net Present Worth*), ACF (*Annual Cash Flowanalysis*), B-CR (*Benefit–Cost Ratio analysis*), FW (*Future Worth analysis*), dan PP (*Payback Period*).

M. Ishaq et al. (2013), yang meneliti tentang *design of an Off-Grid photovoltaik system: a case study of government technical college, wudil, kano state*

menunjukkan bahwa permintaan energi listrik (beban) diperkirakan berdasarkan kebutuhan energi *Watt*-jam. Sebuah sistem *grid PV off* dirancang berdasarkan perkiraan beban. Berdasarkan sel peralatan *ected* untuk desain, 72 modul PV, 20 baterai, tegangan regulator dan inverter akan diperlukan untuk memasok kebutuhan energi listrik. Sistem *PV off-grid* membutuhkan kabel tembaga dari luas penampang 1,22 mm², 32 mm² dan 3 mm² untuk instalasi.

Penelitian ini mengacu pada penelitian Yogi Dkk. (2014), yang menentukan berapa panel surya, bcc, baterai, inverter, yang akan dipasang serta kapasitas per-unitnya. Perbedaan penelitian ini adalah pada penentuan lokasi yang akan dibangun PLTS. Berdasarkan tinjauan pustaka yang ada, kami melakukan penelitian dengan judul “Perencanaan Pembangkit Listrik Tenaga Surya Komunal Sistem *Off-Grid* Di Pegadungan Kabupaten Lombok Utara”.

2.2 Pembangkit Listrik Tenaga Surya

2.2.1 Intensitas Radiasi Surya

Sinar matahari dalam arti luas adalah spektrum total radiasi elektromagnetik yang diberikan oleh matahari. Di Bumi, sinar matahari disaring melalui atmosfer, dan radiasi matahari terlihat jelas saat siang hari ketika matahari berada di atas cakrawala, hal ini biasanya selama sehabian. Di musim panas matahari berada mendekati kutub, sehingga lama siang pada kutub berlangsung lebih lama dibandingkan malam hari, bahkan daerah kutub dapat terkena matahari selama 24 jam secara penuh dan saat musim dingin di daerah kutub, sinar matahari mungkin tidak terjadi setiap saat atau bahkan tidak ada matahari sama sekali.

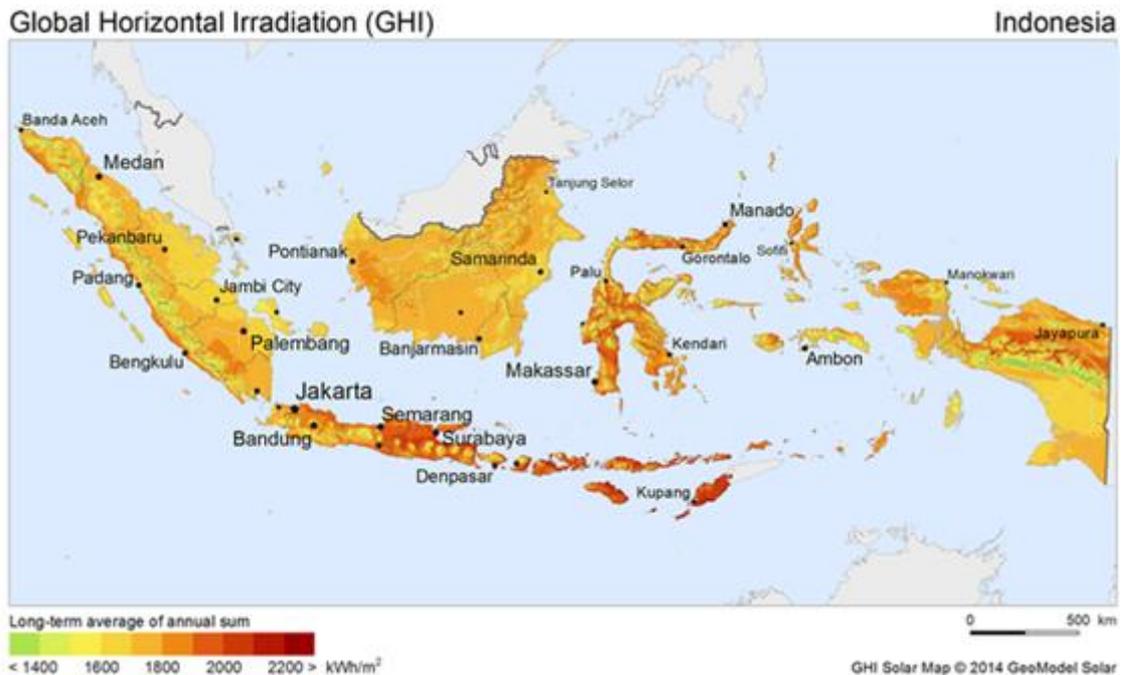
Ketika radiasi langsung tidak terhalang oleh awan, itu dikatakan sebagai sinar matahari, dengan kombinasi cahaya terang dan panas. Radiasi panas yang dihasilkan langsung dari Matahari berbeda dari peningkatan suhu atmosfer, karena pemanasan radiasi dari atmosfer disebabkan oleh radiasi matahari. Sinar matahari dapat direkam menggunakan perekam sinar matahari, *pyranometer* dan *pirheliometer*.

Organisasi Meteorologi Dunia (WMO) mendefinisikan sinar matahari yang radiasinya langsung dari matahari diukur atas dasar setidaknya memiliki 120 WM². sinar matahari langsung memberikan sekitar 93 lux penerangan per *Watt* daya elektromagnetik, termasuk inframerah, ultraviolet dan. sinar matahari cerah memberikan pencahayaan sekitar 100 000 lux per meter persegi di permukaan bumi.

Sinar matahari merupakan faktor kunci dalam proses fotosintesis. (G. N. Tiwari dan Swapnil Dubey, 2010)

Energi yang berasal dari radiasi matahari merupakan potensi energi terbesar dan terjamin keberadaannya di muka bumi. Berbeda dengan sumber energi lainnya, energi matahari bisa dijumpai di seluruh permukaan bumi. Pemanfaatan radiasi matahari sama sekali tidak menimbulkan polusi ke atmosfer. Berbagai sumber energi seperti tenaga angin, bio-fuel, tenaga air, dan sebagainya. Pemanfaatan radiasi matahari umumnya terbagi dalam dua jenis, yakni termal dan *photovoltaic*. Pada sistem termal, radiasi matahari digunakan untuk memanaskan fluida atau zat tertentu yang selanjutnya fluida atau zat tersebut dimanfaatkan untuk membangkitkan listrik. Sedangkan pada sistem *photovoltaic*, radiasi matahari yang mengenai permukaan semikonduktor akan menyebabkan loncatan elektron yang selanjutnya menimbulkan arus listrik.

Berdasarkan data dari Dewan Energi Nasional, potensi energi matahari di Indonesia mencapai rata-rata 4,8 *KiloWatt Hour* (kWh) per meter persegi per hari, setara dengan 112.000 GWp jika dibandingkan dengan potensi luasan lahan di Indonesia atau sepuluh kali lipat dari potensi Jerman dan Eropa. Namun hingga saat ini, kapasitas yang tersalurkan dari intensitas yang terpasang baru ± 30 *MegaWatt* (MW). Kurang dari satu persen dari total potensi di seluruh Indonesia. Total potensi daya penyinaran matahari ini didapatkan dari besar radiasi matahari per m^2 , sebesar 1 kWh, dikalikan dengan lama rata-rata jam puncak matahari. Misalkan di daerah Papua jam puncak matahari sebesar 5 jam, maka total potensi daya yang dapat terserap adalah 5 kWh/ m^2 per hari. Tingkat radiasi rata-rata matahari yang menyinari wilayah Indonesia dapat dilihat pada gambar berikut :

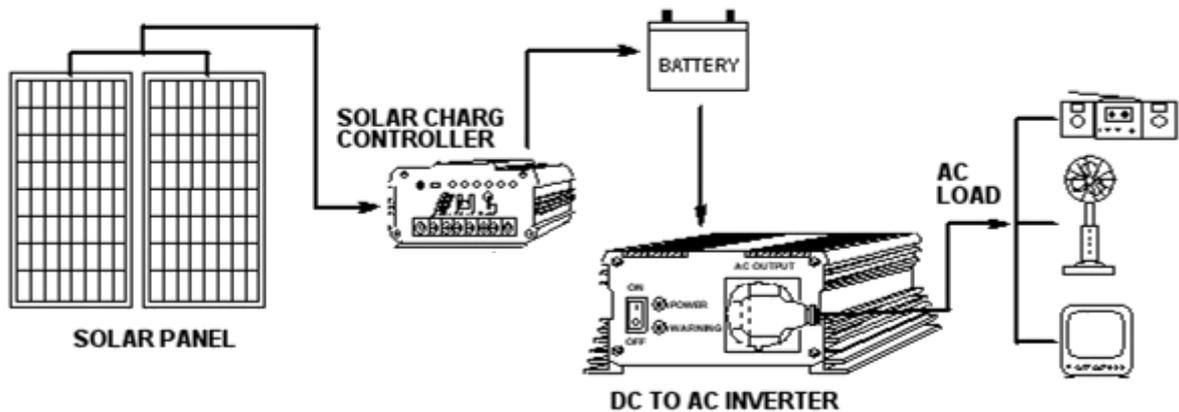


Gambar 2.1 *Global Horizontal Irradiation* rata-rata di Indonesia.
(solargis.com)

2.2.2 Prinsip Kerja PLTS

1. Rangkaian modul surya (*photovoltaic*) akan menghasilkan listrik arus searah (*Direct Current*), apabila terdapat radiasi matahari (baik cerah maupun mendung). Besarnya tegangan dan arus yang dihasilkan tergantung pada jumlah radiasi matahari, suhu udara disekitar modul surya dan lain-lain.
2. Listrik yang dihasilkan oleh modul surya disalurkan ke inverter, lalu *output* dari inverter diubah menjadi arus bolak-balik (*Alternating Current*). Listrik AC ini dapat langsung disalurkan ke jaringan.
3. Apabila terdapat beban di siang hari, maka sebagian listrik yang keluar akan langsung dipakai dan sisanya akan digunakan untuk mengisi baterai.
4. Pada saat malam hari, atau saat produksi listrik dari modul surya lebih kecil dari pemakaian listrik, maka inverter akan mengambil listrik dari baterai kemudian merubahnya menjadi listrik AC untuk disuplai ke jaringan sesuai kebutuhan dan kapasitasnya.

Secara umum dapat digambarkan dengan rangkaian komponen seperti gambar berikut :



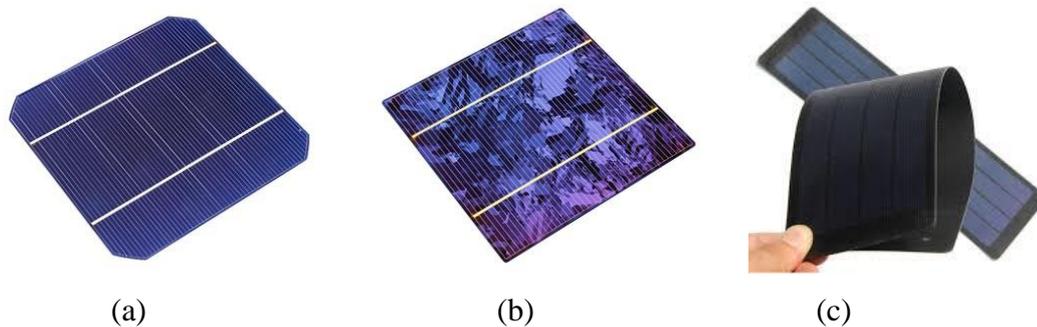
Gambar 2.2 Prinsip kerja pembangkit listrik tenaga surya
(plts.wordpress.com)

2.2.3 Komponen – komponen PLTS

a. Sel Surya (*Photovoltaic*)

Sebuah sel surya atau sel *photovoltaic* (PV) adalah perangkat yang mengubah energi matahari menjadi listrik oleh efek fotovoltaiik. Fotovoltaiik adalah bidang teknologi dan penelitian yang berkaitan dengan penerapan sel surya sebagai energi surya. Daya dari generasi fotovoltaiik disebabkan oleh radiasi yang memisahkan pembawa muatan positif dan negatif dalam menyerap bahan.

Sel surya terbuat dari berbagai bahan dan dengan struktur yang berbeda dalam rangka untuk mengurangi biaya dan mencapai efisiensi maksimum. Ada berbagai jenis bahan solar *cell*, kristal tunggal, polikristalin dan silikon *amorf*, senyawa bahan lapisan tipis dan semi-konduktor menyerap lapisan lainnya, yang memberikan sel-sel yang sangat efisien untuk aplikasi khusus. Sel-sel silikon kristal yang paling populer, meskipun mahal. Sel surya tipe *amorf* silikon tipis yang lebih murah. Lapisan silikon *amorf* digunakan dengan baik hidrogen dan *fluorine* dimasukkan dalam struktur. Sebuah sel surya merupakan unit dasar dari PV yang merupakan komponen utama dari alat pembangkit tenaga listrik surya.



Gambar 2.3 (a) kristal tunggal, (b) polikristalin, (c) *silicon amorf*
(panelsurya.com)

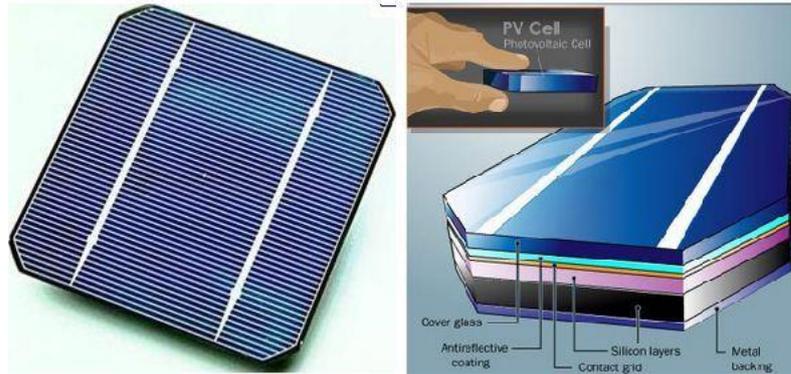
Dari ketiga jenis sel surya diatas, memiliki beberapa perbedaan kelebihan dan kekurangan untuk tiap masing-masing jenis. Berikut adalah perbedaan dari jenis sel surya yang ada.

Tabel 2.1 Kelebihan dan kekurangan jenis-jenis sel surya

Perbandingan	Kristal tunggal	Polikristalin	<i>Silicon amorf</i>
Harga	Mahal	Murah	Sangat mahal
Efisiensi rata-rata	19%	18%	8,5%
Daya serap	Daya serap sangat baik dikala terik, tetapi saat mendung/ berawan agak kurang optimal menyerap cahaya	Daya serap berada dibawah tipe mono saat matahari terik, akan tetapi tetap dapat menyerap energi dengan baik disaat mendung/ berawan	Daya serap masih sangat baik dalam udara yang sangat berawan dan dapat menghasilkan daya listrik sampai 45% dibanding jenis yang lain dengan daya yang tertera setara.
Ukuran untuk menghasilkan daya yang sama	Sedang	Besar	Sangat besar
Umur panel	15-50 tahun	10-25 tahun	15-30 tahun

(teknologisurya.wordpress.com)

Struktur *cell* surya yang umumnya dipasaran yaitu sel surya berbasis material *silicon* dimana sel surya jenis ini tersusun atas beberapa bagian seperti gambar 2.4 :



Gambar 2.4 Struktur *cell* surya jenis silikon
(howstuff work)

Gambar 2.4 menunjukkan ilustrasi sel surya dan juga bagian-bagiannya. Secara umum terdiri dari :

1. Substrat/ metal *backing*

Substrat adalah material yang menopang seluruh komponen sel surya. Material substrat juga harus mempunyai konduktifitas listrik yang baik karena juga berfungsi sebagai kontak terminal positif sel surya, sehingga umumnya digunakan material metal atau logam seperti aluminium atau *molybdenum*. Untuk sel surya *dye-sensitized* (DSSC) dan sel surya organik, substrat juga berfungsi sebagai tempat masuknya cahaya sehingga material yang digunakan yaitu material yang konduktif tapi juga transparan seperti *indium tin oxide* (ITO) dan *flourine doped tin oxide* (FTO).

2. Material semikonduktor

Material semikonduktor merupakan bagian inti dari sel surya yang biasanya mempunyai tebal sampai beberapa ratus mikrometer untuk sel surya generasi pertama (silikon), dan 1-3 mikrometer untuk sel surya lapisan tipis. Material semikonduktor inilah yang berfungsi menyerap cahaya dari sinar matahari. Untuk kasus gambar 2.5, semikonduktor yang digunakan adalah material silikon, yang umum diaplikasikan di industri elektronik. Sedangkan untuk sel surya lapisan tipis, material semikonduktor yang umum digunakan dan telah masuk pasaran, contohnya material Cu(In,Ga)(S,Se)_2 (CIGS), CdTe (*kadmium telluride*), dan *amorphous* silikon, disamping material-material semikonduktor potensial lain yang dalam sedang dalam penelitian intensif seperti $\text{Cu}_2\text{ZnSn (S,Se)}_4$ (CZTS) dan Cu_2O (*copper oxide*).

Bagian semikonduktor tersebut terdiri dari *junction* atau gabungan dari dua material semikonduktor yaitu semikonduktor tipe-p dan tipe-n yang membentuk p-n *junction*. P-N *junction* ini menjadi kunci dari prinsip kerja sel surya.

3. Kontak metal / *contact grid*

Selain substrat sebagai kontak positif, diatas sebagian material semikonduktor biasanya dilapiskan material metal atau material konduktif transparan sebagai kontak negatif.

4. Lapisan anti-reflektif

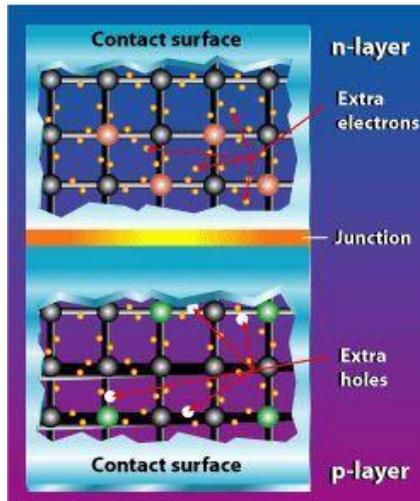
Refleksi cahaya harus diminimalisir agar mengoptimalkan cahaya yang terserap oleh semikonduktor. Oleh karena itu biasanya sel surya dilapisi oleh lapisan anti-refleksi. Material anti-refleksi ini adalah lapisan tipis material dengan besar indeks refraktif optik antara semikonduktor dan udara yang menyebabkan cahaya dibelokkan ke arah semikonduktor, sehingga meminimumkan cahaya yang dipantulkan kembali.

5. Enkapsulasi/ *cover glass*

Bagian ini berfungsi sebagai enkapsulasi untuk melindungi modul surya dari hujan atau kotoran.

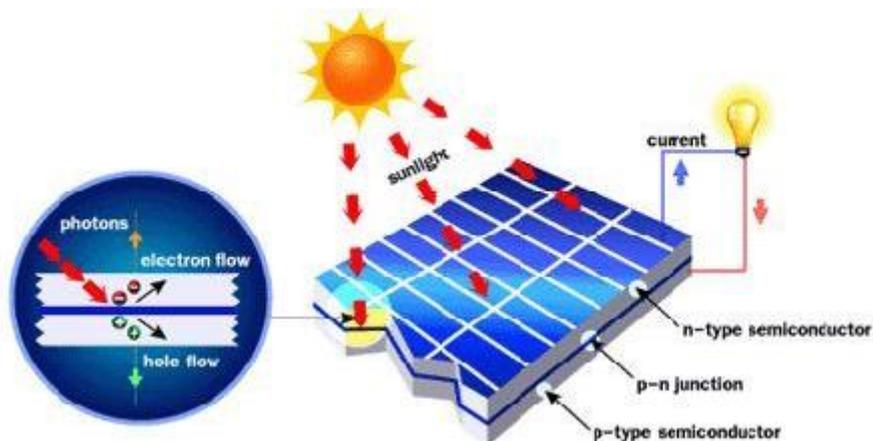
Cara Kerja Sel Surya

Sel surya konvensional bekerja menggunakan prinsip p-n *junction*, yaitu *junction* antara semikonduktor tipe-p dan tipe-n. Semikonduktor ini terdiri dari ikatan-ikatan atom yang dimana terdapat elektron sebagai penyusun dasar. Semikonduktor tipe-n mempunyai kelebihan elektron (muatan negatif), sedangkan semikonduktor tipe-p mempunyai kelebihan *hole* (muatan positif) dalam struktur atomnya. Kondisi kelebihan elektron dan *hole* tersebut bisa terjadi dengan mendoping material dengan atom *dopant*. Sebagai contoh untuk mendapatkan material silikon tipe-p, silikon didoping oleh atom boron, sedangkan untuk mendapatkan material silikon tipe-n, silikon didoping oleh atom fosfor. Ilustrasi gambar 2.5 menggambarkan *junction* semikonduktor tipe-p dan tipe-n.



Gambar 2.5 *Junction* semi konduktor tipe-p dan tipe-n
(eere.energy.gov)

Peran dari p-n *junction* ini adalah untuk membentuk medan listrik, sehingga elektron dan *hole* bisa diekstrak oleh material kontak untuk menghasilkan listrik. Ketika semikonduktor tipe-p dan tipe-n terkontak, maka kelebihan elektron akan bergerak dari semikonduktor tipe-n ke tipe-p sehingga membentuk kutub positif pada semikonduktor tipe-n dan sebaliknya kutub negatif pada semikonduktor tipe-p. Akibat dari aliran elektron dan *hole* ini, maka terbentuk medan listrik yang dimana ketika cahaya matahari mengenai susuna p-n *junction* ini akan mendorong elektron bergerak dari semikonduktor menuju kontak negatif, yang selanjutnya dimanfaatkan sebagai listrik, dan sebaliknya *hole* bergerak menuju kontak positif menunggu elektron datang.

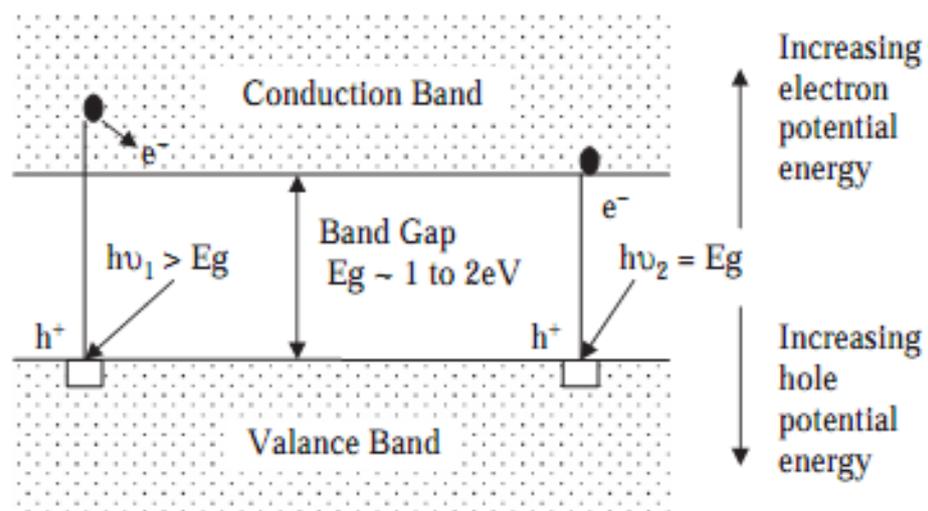


Gambar 2.6 Pergerakan elektron dari semikonduktor tipe-p menuju ke semikonduktor tipe-n.

(sun.nrg.org)

Zat padat dapat dibagi menjadi tiga kategori, berdasarkan konduksi listrik. Seperti: konduktor, semi-konduktor dan isolator. Diantara celah antara pita valensi dan pita konduksi (pita energi terlarang) dalam kasus isolator ($h\nu < E_g$, Misalnya, h adalah konstanta *Planck* dan ν adalah frekuensi) sangat besar. Jadi tidak mungkin untuk elektron pada pita valensi untuk mencapai pita konduksi, maka tidak ada konduksi saat ini. Dalam kasus semi-konduktor ($h\nu > E_g$), celah yang moderat dan elektron pada pita valensi dapat memperoleh energi cukup bagi mereka untuk menyeberangi daerah terlarang. Sementara, dalam kasus konduktor ($E_g \approx 0$), celah tidak dilarang ada dan elektron dapat dengan mudah pindah ke pita konduksi.

Semi-konduktor dapat lagi dibagi menjadi dua kategori: intrinsik dan ekstrinsik. Intrinsik (murni) semi-konduktor memiliki tingkat permifitas di tengah konduksi dan pita valensi. Dalam hal ini kepadatan elektron bebas di pita konduksi dan lubang bebas di pita valensi sama $n=p=n_i$ dan masing-masing sebanding dengan $(-E_g/2kT)$.



Gambar 2.7 Struktur pita semikonduktor bahan intrinsik. Penyerapan foton $h\nu < E_g$, tidak ada penyerapan *photoelectric*. $h\nu_1 > E_g$, kelebihan energi hilang sebagai panas. $h\nu_2 = E_g$, energi foton sama celah pita

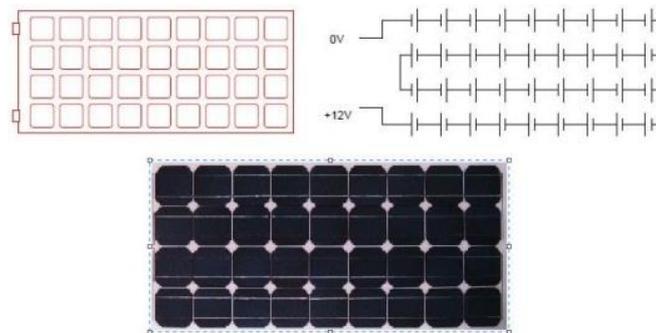
(Tiwari: 2010)

b. Array PV (Panel Surya)

Sebuah *array* fotovoltaik adalah kumpulan hubungan dari modul fotovoltaik, yang pada gilirannya terbuat dari beberapa sel surya yang saling berhubungan. Sel-sel mengubah energi matahari menjadi listrik arus searah (DC) melalui efek fotovoltaik.

Kebanyakan *array* PV menggunakan inverter untuk mengubah daya DC yang dihasilkan oleh modul ke dalam arus bolak-balik (AC) yang dapat masuk ke infrastruktur yang ada untuk lampu listrik, motor dan beban lainnya. Modul dalam *array* PV biasanya pertama-tama dihubungkan secara seri untuk mendapatkan tegangan yang diinginkan; *string* individu kemudian terhubung secara paralel untuk memungkinkan sistem untuk menghasilkan lebih banyak. *Array* surya biasanya diukur dengan daya listrik yang mereka hasilkan dalam *Watt*, *kiloWatt* atau bahkan *megaWatt*.

Output listrik dari modul tergantung pada ukuran dan jumlah sel. Panel listrik surya dapat dalam segala bentuk dan ukuran, dan dapat dibuat dari bahan yang berbeda. Kebanyakan panel PV surya memiliki 30-36 sel dihubungkan secara seri. Setiap sel memproduksi sekitar 0,5 V di bawah sinar matahari, sehingga panel menghasilkan 15 V sampai 18 V. Panel ini dirancang untuk mengisi baterai 12 V. Besar tegangan dan arus ini tidak cukup untuk berbagai aplikasi, sehingga umumnya sejumlah sel surya disusun secara seri membentuk modul surya. Modul surya tersebut bisa digabungkan secara paralel atau seri untuk memperbesar total tegangan dan arus *output*nya sesuai dengan daya yang dibutuhkan untuk aplikasi tertentu. Gambar 2.8 menunjukkan ilustrasi dari modul surya.



Gambar 2.8 Bentuk fisik dari solar sel

(*The Physics of solar cell*, jenny nelson)

Panel satuan dalam *Watt peak* (Wp), yaitu listrik yang dihasilkan dalam sebuah beban optimal disesuaikan dengan insiden radiasi matahari 1000 WM^2 . Sebuah rating panel khas adalah 40 Wp. Dalam iklim tropis 40 Wp bisa menghasilkan rata-rata 150 Wh listrik per hari, tetapi karena cuaca perubahan energi bervariasi, biasanya antara 100 Wh dan 200 Wh per hari.

Pengoperasian maksimum panel surya sangat tergantung pada hal – hal sebagai berikut:

1. Suhu

Sebuah panel surya dapat beroperasi secara maksimum jika suhu yang diterimanya tetap normal pada suhu. Kenaikan suhu lebih tinggi dari suhu normal pada panel surya akan melemahkan tegangan (V_{oc}) yang dihasilkan. Setiap kenaikan suhu panel surya 1°C (dari 25°C) akan mengakibatkan berkurang sekitar 0,5 % pada total tenaga (daya) yang dihasilkan.

2. Intensitas Cahaya Matahari

Intensitas cahaya matahari akan berpengaruh pada daya keluaran panel surya. Semakin rendah intensitas cahaya yang diterima oleh panel surya, maka arus (I_{sc}) akan semakin rendah. Hal ini membuat titik *Maximum Power Point* berada pada titik yang semakin rendah.

3. Orientasi Panel Surya (*Array*)

Misalnya, untuk lokasi yang terletak dibelahan bumi Utara, maka panel surya (*array*) sebaiknya diorientasikan ke Selatan. Begitu pula untuk lokasi yang terletak di belahan bumi Selatan, maka panel surya (*array*) diorientasikan ke Utara.

4. Sudut Kemiringan Panel Surya (*Array*)

Mempertahankan sinar matahari jatuh ke sebuah permukaan panel surya secara tegak lurus akan mendapatkan energi maksimum $\pm 1000 \text{ W/m}^2$ atau 1 kW/m^2 . Menurut Mark Hankins (2010) cara praktis dalam pemasangan panel surya adalah menghadapkannya ke khatulistiwa pada sudut yang sama ditambah 10° .

5. Kecepatan angin bertiup

Kecepatan tiupan angin disekitar lokasi sel surya akan sangat membantu terhadap pendinginan suhu pada permukaan sel surya sehingga suhunya dapat terjaga dikisaran 25°C .

6. Keadaan Atmosfir Bumi

Keadaan atmosfer bumi berawan, mendung, jenis partikel debu udara, asap, uap air udara, kabut dan polusi sangat menentukan hasil maksimum arus listrik dari sel surya.

c. *Solar Charger Controller (SCC)*

Charger Controller adalah suatu alat sebagai penerima arus dan tegangan dari *solar cell* yang berfungsi sebagai pengatur atau penyetara tegangan dan arus, dimana

arus diisikan ke *Accu (Battery)* sebagai media penyimpanan dan kemudian diterima oleh inverter. Fungsi dari *Solar Charger Controller* sebagai berikut:

1. Mengatur arus untuk pengisian ke baterai.
2. Menjaga baterai dari *overcharging* dan *overvoltage*.
3. Mengatur arus yang dibebaskan/ diambil dari baterai agar baterai tidak “*full discharge*” dan *overloading* serta memonitor temperatur baterai.

Charger-Discharge pengontrol melindungi baterai dari pengisian berlebihan dan melindungi dari pengiriman muatan arus berlebihan ke *input* terminal. Seperti yang telah disebutkan di atas *Solar Charge Controller* yang baik biasanya mempunyai kemampuan mendeteksi kapasitas *battery*. Bila *battery* sudah penuh terisi, maka secara otomatis pengisian arus dari panel sel surya berhenti.

SCC akan melewati arus dan tegangan sesuai dengan spesifikasi dari SCC yang digunakan. Pada kondisi cuaca normal dimana panel surya menghasilkan tegangan sesuai dengan *range* kerja dan arus maksimal dari SCC, maka SCC akan bekerja secara normal dengan mengisi baterai. SCC akan bersifat *short circuit* saat arus yang dihasilkan oleh panel surya melebihi dari arus maksimal SCC, sehingga SCC akan membuang arus ke tanah untuk mencegah terjadinya *overcharging* pada baterai. Pada kondisi cuaca tidak normal/ mendung SCC akan bersifat *open circuit*/ memutus karena panel surya menghasilkan tegangan dibawah *range* kerja SCC, sehingga SCC tidak akan bekerja selama tegangan yang dihasilkan oleh panel surya belum mencapai *range* kerja SCC.



(a)



(b)

Gambar 2.9 (a) *Solar Charge Controller* untuk PLTS komunal; (b) *Solar Charge Controller* untuk PLTS SHS

(schneider-electric.co.id)

Cara deteksi adalah melalui monitor *level* tegangan baterai. *Solar Charge Controller* akan mengisi *battery* sampai level tegangan tertentu, kemudian apabila level tegangan *drop*, maka baterai akan diisi kembali. SCC juga mempunyai beberapa indikator yang akan memberikan kemudahan kepada pengguna PLTS dengan memberikan informasi mengenai kondisi baterai, sehingga pengguna PLTS dapat mengendalikan konsumsi energi menurut ketersediaan listrik yang terdapat didalam baterai.

SCC sebagai pengatur sistem agar penggunaan listriknya aman dan efektif, sehingga semua komponen-komponen sistem aman dari bahaya perubahan *level* tegangan. SCC yang digunakan kapasitasnya tergantung dari kapasitas daya panel surya. Pemilihan kapasitas SCC ditentukan dengan tegangan nominal dan arus *input/output* sistem.

d. Battery

Baterai berfungsi menyimpan arus listrik yang dihasilkan oleh panel surya sebelum dimanfaatkan beban. Ukuran baterai yang dipakai sangat tergantung pada ukuran panel dan beban. Baterai mengalami proses siklus menyimpan dan mengeluarkan, tergantung pada ada atau tidak adanya sinar matahari.

Selama waktu adanya matahari, *array* panel menghasilkan daya listrik. Daya yang tidak digunakan dengan segera dipergunakan untuk mengisi baterai. Selama waktu tidak adanya matahari, permintaan daya listrik disediakan oleh baterai. Kapasitas baterai tergantung dari daya panel yang dikeluarkan dengan tegangan maksimal 1 buah baterai yang dikeluarkan adalah sebesar 24 Vdc.

Suatu ketentuan yang membatasi tingkat ke dalaman pengosongan maksimum, diberlakukan pada baterai. Tingkat ke dalaman pengosongan (*Depth of Discharge*) baterai biasanya dinyatakan dalam persentase. Misalnya, suatu baterai memiliki DoD 80 %, ini berarti bahwa hanya 80 % dari energi yang tersedia dapat dipergunakan dan 20 % tetap berada dalam cadangan. Pengaturan DoD berperan dalam menjaga usia pakai (*life time*) dari baterai tersebut. Semakin dalam DoD yang diberlakukan pada suatu baterai maka semakin pendek pula siklus hidup dari baterai tersebut.

Untuk sistem PLTS, baterai yang digunakan terdapat beberapa jenis yang dapat dipilih :

1) Baterai VRLA (*Valve Regulated Lead Acid*)

Baterai ini kemasannya tertutup rapi sehingga sangat sedikit senyawa/ bahan yang dapat keluar masuk baterai, oleh karena itu baterai ini tidak memerlukan perawatan lebih dan sangat cocok untuk diaplikasikan untuk sistem pembangkit listrik tenaga surya. Terdapat dua jenis baterai VRLA yaitu Gel dan AGM. Pada jenis Gel, elektrolit didalam baterai pada bentuk gel dengan penambahan bahan tertentu sedangkan tipe AGM (*Absorbed Glass Mat*) memiliki elektrolit yang terserap di sebuah material *glass mat*.

2) Baterai OPzV

Baterai OPzV didasarkan pada teknologi pelat tubular dan pengentalan elektrolit menjadi gel. Konstruksi baterai disegel membuat baterai OPzV bebas perawatan. Baterai ini juga merupakan baterai VRLA, sehingga memiliki katup untuk mengatur penguapan pada baterai dengan menggunakan pelat tubular pada kutub positif, baterai ini memiliki tingkat siklus pemakaian yang tinggi hingga 80% dan kuat hingga 20 tahun. Elektrolit pada baterai ini merupakan campuran gel dan *silica* untuk mengentalkan, sehingga memungkinkan baterai ini dirakit secara horizontal dan tidak tumpah. Baterai OPzV optimal untuk aplikasi di sektor dengan tingginya jumlah pemakaian (*discharge*) seperti misalnya pada sistem pembangkit listrik tenaga surya serta untuk operasi dengan pemakaian terus menerus seperti dalam aplikasi telekomunikasi.

3) Baterai *ion Litium*

Baterai *ion litium* merupakan baterai paling *energetic* dibandingkan baterai *recharger* yang lain, baterai ini dapat menyimpan listrik sampai 150 Wh dalam 1 kg baterai, dibandingkan dengan baterai NiMH dapat menyimpan sekitar 100 Wh per kg tapi secara umum biasanya hanya 60-70 Wh. Sementara baterai timbal asam (*led acid*) membutuhkan berat sampai 6 kg supaya bias menyamai energi baterai *ion litium* seberat 1 kg. Hal ini terjadi karena *ion litium* sangat reaktif, sehingga banyak energi dapat disimpan dalam ikatan *ion* nya. Baterai *ion litium* ini dapat menjaga isinya dengan hanya kehilangan 5% isinya tiap bulannya dibandingkan dengan baterai NiMH yang kehilangan sampai 20% tiap bulannya. Akan tetapi baterai *ion litium* juga memiliki beberapa kekurangan, seperti baterai ini menurun performa/ kualitasnya segera setelah keluar pabrik, paling lama 2 atau 3 tahun dari tanggal pembuatan akan menurun jauh/ rusak, mau dipakai ataupun tidak dipakai. Selain itu baterai jenis ini *sensitive* terhadap

suhu tinggi, sehingga apabila kepanasan baterai akan lebih cepat rusak bahkan ada kemungkinan baterai dapat meledak, dan apabila isi baterai sampai habis dapat juga membuat baterai menjadi rusak.

e. Inverter

Sebuah *photovoltaic (PV) array*, terlepas dari ukuran atau kecanggihannya, dapat menghasilkan hanya listrik arus searah (DC). Pengisian baterai, misalnya dapat dengan mudah dilakukan dengan langsung menghubungkan mereka dengan modul surya. Inverter yang diperlukan dalam sistem yang memasok listrik ke arus bolak-balik (AC) beban atau konsumsi PV listrik ke jaringan utilitas.

Inverter mengubah *output* DC dari *array* PV dan atau baterai untuk listrik AC standar yang sama dengan yang disediakan oleh utilitas (AC 220/ 380 Volt). Menurut efisiensi inverter pada saat pengoperasian adalah antara 60-95 %, akan tetapi hampir rata-rata inverter yang dijual dipasaran memiliki efisiensi 95 % tergantung harganya.

Spesifikasi inverter harus sesuai dengan *Battery Charge Controller (BCC)* yang digunakan. Arus yang mengalir melewati inverter juga harus sesuai dengan arus yang melalui BCC. Pada pemilihan inverter, diupayakan kapasitas kerjanya mendekati kapasitas daya yang dilayani, hal ini agar efisiensi kerja inverter menjadi maksimal.

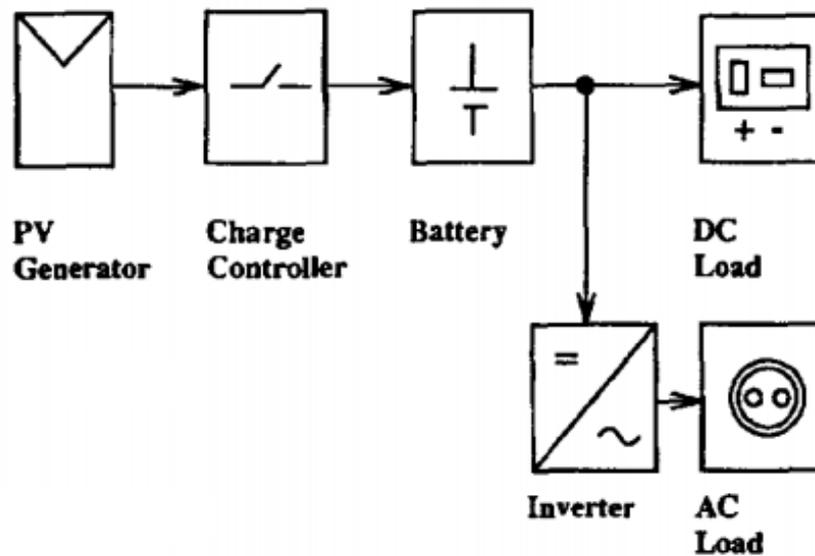
2.2.4 Desain PLTS

a. PLTS Terpusat (*Stand-Alone*)

Sistem PLTS yang terpusat (*Stand-Alone*) dirancang beroperasi mandiri untuk memasok beban DC atau AC. Jenis sistem ini dapat diaktifkan oleh *array photovoltaic* saja, atau dapat menggunakan sumber tambahan energi lain seperti: air, angin dan mesin diesel. Baterai digunakan pada kebanyakan sistem PLTS yang berdiri sendiri untuk penyimpanan energi.

PLTS terpusat merupakan sistem pembangkit listrik dengan menggunakan energi matahari berskala menengah sampai besar yang keluaran energinya yang sama dengan jaringan listrik PLN, PLTS terpusat merupakan solusi untuk mengatasi kelangkaan listrik pada daerah terpencil dan terisolasi. Kapasitas listrik PLTS terpusat ini biasanya mulai dari kapasitas 1.000-500.000 *Watt* (sesuai ukuran panel PV) mampu melayani dan memenuhi kebutuhan listrik rumah-rumah warga sebanyak 10-200 rumah.

Dalam perencanaan pembangunan PLTS terpusat adalah pemakaian energi listrik pada setiap konsumen harus dibatasi pemakaian energi listrik perhari dalam satuan *Watt hour* (Wh). Yang perlu diperhitungkan adalah adanya keseimbangan antara jumlah pelanggan (total pemakaian Wh harian) dan kapasitas total energi yang dihasilkan panel surya (total produksi Wh harian). Pembatasan pemakaian energi listrik perlu dilakukan sebagai upaya untuk menjaga baterai dalam kondisi SOC (*State of Charge*) yang tinggi sehingga baterai tidak cepat rusak.



Gambar 2.10 Bagan prinsip dari sistem daya PV berdiri sendiri
(IEA: 2005)

b. Kebutuhan Beban

Langkah awal dalam perencanaan kapasitas *photovoltaik* adalah penentuan total beban harian rumah tangga (E_S) yang merupakan jumlah energi yang dibutuhkan oleh rumah tangga setiap harinya. Pada penelitian ini kelompok beban rumah tangga dibedakan menjadi kelompok beban rumah tangga *Poor* dan *Near Poor* serta sejumlah fasilitas umum, seperti jalan raya, sarana pendidikan formal, sarana kesehatan umum, dan sebagainya.

Dari total beban harian perlu ditambahkan 30% dari beban total harian yang digunakan sebagai cadangan energi untukantisipasi pertambahan penduduk dan penurunan kinerja komponen PLTS. Total energi sistem dapat dihitung menggunakan persamaan (Putra, 2012):

$$E_T = E_S + (30\% \times E_S) \quad (2.1)$$

Dengan :

E_T = total energi sistem (Wh)

E_S = total energi beban (Wh)

c. Panel Surya

Perhitungan kapasitas panel surya dapat dihitung dengan persamaan-persamaan sebagai berikut:

1. Menghitung efisiensi

Efisiensi panel surya dapat dihitung dengan cara sebagai berikut (Yogi, 2014):

$$\eta = \frac{P_{MPP}}{PSI \times A} \times 100 \% \quad (2.2)$$

Dimana :

η adalah efisiensi panel surya.

P_{MPP} adalah maksimum keluaran (*output*) panel surya (*Watt*).

PSI adalah *peak sun insolation* (1000 W/m^2).

A adalah luas dari panel surya (m^2).

2. Menghitung Area Array (PV Area)

Area *array* (*PV Area*) diperhitungkan dengan menggunakan rumus sebagai berikut (Yogi, 2014):

$$PV \text{ area} = \frac{E_T}{G_{AV} \times \eta_{PV} \times TCF \times \eta_{Out}} \quad (2.3)$$

Dimana :

E_T adalah pemakaian energi (kWh/ hari).

G_{AV} adalah insolasi harian matahari rata – rata (kWh/ m^2 / hari).

η_{PV} adalah efisiensi panel surya

TCF adalah *Temperature Correction Factor*

η_{Out} adalah efisiensi komponen PLTS

3. Menghitung Daya yang dibangkitkan PLTS (*Watt Peak*)

Dari perhitungan area *array*, maka besar daya yang dibangkitkan PLTS (*Watt Peak*) dapat diperhitungkan dengan rumus sebagai berikut (Yogi, 2014):

$$P_{Wattpeak} = PV \text{ area} \times PSI \times \eta_{PV} \quad (2.4)$$

Dimana :

$P_{Wattpeak}$ adalah daya yang mampu dibangkitkan PLTS (*Watt Peak*)

PV area adalah luas daerah panel surya (m^2)

PSI (*Peak Solar Insolation*) adalah 1000 (W/m^2)

η_{PV} adalah efisiensi panel surya

Selanjutnya berdasarkan besar daya yang akan dibangkitkan (*Watt peak*), maka jumlah panel surya yang diperlukan, diperhitungkan dengan rumus sebagai berikut (Yogi, 2014):

$$\text{Jumlah Panel Surya} = \frac{P_{wattpeak}}{P_{MPP}} \quad (2.5)$$

Dimana :

$P_{Wattpeak}$ adalah daya yang dibangkitkan (*Watt Peak*).

P_{MPP} adalah maksimum keluaran (*output*) panel surya (*Watt*).

d. *Battery*

Kapasitas (Ah) dari suatu *battery* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut (Dewi, 2015):

- Kapasitas *battery*

$$Ah = \frac{E_T}{V_{sistem}} \quad (2.6)$$

- Kapasitas *battery* yang melibatkan efisiensi kerja *inverter*

$$Ah \text{ dgn efisiensi kerja inv.} = \text{Kap. batt} + [(100\% - \text{Eff. inv}) \times \text{Kap. batt}] \quad (2.7)$$

- Kapasitas minimal *battery* yang dibutuhkan

$$Ah_{min} = \frac{Ah \text{ dgn efisiensi kerja inv.} \times t_{otonomi}}{\% DOD} \quad (2.8)$$

Dimana:

E_T = pemakaian energi (kWh/ hari)

V_{sistem} = tegangan sistem (Volt)

$V_{Battery}$ = tegangan nominal *battery* (Volt)

Ah = kapasitas *battery* (Ah)

%DOD = persentase tingkat kedalaman *discharge* maksimum yang dapat diberlakukan pada *battery*

$t_{otonomi}$ = suatu kondisi hari dimana jumlah hari yang diasumsikan terjadi hujan/mendung/ tidak ada sinar matahari selama 3 hari berturut-turut.

- Jumlah *battery*

$$\text{Jumlah } battery = \frac{V_{sistem}}{V_{battery}} \quad (2.9)$$

e. *Inverter*

Pemilihan *inverter* yang akan digunakan diupayakan kapasitas kerjanya mendekati kapasitas daya yang dilayani, sehingga efisiensi kerja *inverter* menjadi maksimal sesuai dengan kebutuhan daya yang akan dilayani. Ukuran *inverter* harus 25-30% lebih besar dari P_{PM} *array* pada konfigurasi panel surya. Perhitungan kapasitas *inverter* dapat dilihat pada persamaan dibawah ini (Dewa, 2011):

$$Inverter = 130\% \times P_{PM} \text{ array} \quad (2.10)$$

Dimana :

$P_{PM} \text{ array}$: Daya maksimum *array* panel surya (W)

Jenis *inverter* dibagi menjadi 3 jenis yaitu *inverter Grid Tie*, *inverter Hybrid (bi-directional)* dan *inverter Stand Alone (directional)*.

1. *Inverter Grid Tie* berfungsi untuk memberikan aliran jaringan listrik setelah menerima energi dari Panel Surya. *Inverter* ini akan otomatis mati atau tidak memiliki daya saat terjadi *power outage* pada sistem *On Grid*, kelebihan KWh yang diperoleh dari Panel Surya bisa disalurkan kembali ke jaringan listrik PLN untuk dapat dipakai bersama.
2. *Inverter Stand Alone/ directional* adalah *inverter* yang secara langsung terhubung dengan *battery* dari panel surya dalam suatu sistem yang terisolasi atau jauh dari jaringan PLN dan pembangkit listrik lainnya.
3. *Inverter Hybrid bi-directional* adalah *inverter* yang secara fungsi merupakan gabungan dari sistem *On Grid* dan *Off Grid*, dengan cara menggunakan *battery* sebagai penyimpanan energi listrik dari panel surya, kemudian energi tersebut dialirkan kepada beban tanpa bantuan listrik dari PLN yang terhenti.

Terdapat beberapa kapasitas inverter yang tersedia seperti 5 kW, 7.5 kW, 10 kW, 15 kW dan 20 kW, sehingga dapat dipilih besar kapasitas yang dibutuhkan untuk memenuhi kebutuhan daya di lokasi tersebut sesuai dengan hasil perhitungan inverter. Setelah mengetahui besar kapasitas inverter yang dibutuhkan, pemilihan inverter tidak hanya melihat pada perhitungan kapasitas tetapi juga harus memilih spesifikasi pendukung lainnya yang cocok untuk digunakan di lokasi tersebut.

Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan barulah ditentukan spesifikasi jenis inverter yang digunakan setidaknya memenuhi standar sebagai berikut (SMA, 2009):

1. Kapasitas dari inverter disesuaikan dengan kebutuhan beban.
2. Tegangan *output* inverter 220/ 380 Vac.
3. Tegangan masukan inverter disesuaikan dengan tegangan dari baterai.
4. Tegangan baterai sesuai dengan tegangan *array* modul panel surya.
5. Bentuk gelombang keluaran adalah gelombang sinus murni (*pure sine wave*).
6. Frekuensi inverter sebesar 45-65 Hz.
7. *Output Voltage THD Factor* < 3%.
8. Efisiensi dari inverter sebesar > 95 %.
9. Memiliki sistem proteksi seperti: *DC Over/ Under Voltage, AC Over/ Under Voltage, Overload* dan *Short Circuit Protection*.
10. Dilengkapi dengan *display*, data *logger* dan fasilitas *Remote Monitoring System* yang terintegrasi.

f. Solar Charger Controller (SCC)

Dalam pemilihan SCC biasanya dinilai terhadap kapasitas arus dan tegangan pada baterai dan panel surya sebagai acuan untuk menentukan jenis SCC yang akan digunakan. Pada perhitungan SCC terlebih dahulu melihat spesifikasi dari panel surya yang akan digunakan, ukuran dari SCC adalah arus hubung singkat (I_{SC}) dari PV *array* dikali dengan 1,3. Perhitungan kapasitas SCC dapat dilihat pada persamaan berikut (Abdul, 2016):

$$SCC_{\text{rating}} = I_{SC \text{ PV array}} \times 1,3 \quad (2.11)$$

Dimana :

$I_{SC \text{ PV array}}$: Arus *short circuit* pada *array* panel surya (A)

Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan barulah ditentukan spesifikasi jenis SCC yang digunakan setidaknya memenuhi standar sebagai berikut (*Morningstar*, 2009):

1. Kapasitas dari SCC sesuai dengan arus short *circuit* dari *array* panel surya.
2. Tegangan masukan sesuai dengan tegangan *array* modul panel surya.
3. Tegangan keluaran dari SCC disesuaikan dengan tegangan baterai.
4. Memiliki efisiensi > 90%.
5. Memiliki sistem proteksi seperti : *High Voltage Disconnect* (HVD), *Low Voltage Disconnect* (LVD), dan *short circuit protection*.
6. Dilengkapi dengan *display* dan sensor temperatur baterai.
7. SCC menggunakan sistem MPPT.

2.2.5 Jaringan Distribusi

a. Jaringan Sistem Distribusi

Sistem distribusi sekunder digunakan untuk menyalurkan tenaga listrik dari gardu distribusi ke beban-beban yang ada di konsumen. Pada sistem distribusi sekunder bentuk saluran yang paling banyak digunakan ialah sistem radial.

Bentuk Jaringan ini merupakan bentuk dasar, paling sederhana dan paling banyak digunakan. Dinamakan radial karena saluran ini ditarik secara radial dari suatu titik yang merupakan sumber dari jaringan itu, dan dicabang-cabang ke titik-titik beban yang dilayani.

Catu daya berasal dari satu titik sumber dan karena adanya pencabangan-pencabangan tersebut, maka arus beban yang mengalir sepanjang saluran menjadi tidak sama besar. Oleh karena kerapatan arus (beban) pada setiap titik sepanjang saluran tidak sama besar, maka luas penampang konduktor pada jaringan bentuk radial ini ukurannya tidak harus sama.

Untuk melokalisir gangguan, pada bentuk radial ini biasanya diperlengkapi dengan peralatan pengaman berupa: *fuse*, *sectionalizer*, *recloser*, atau alat pemutus beban lainnya, tetapi fungsinya hanya membatasi daerah yang mengalami pemadaman total, yaitu daerah saluran sesudah/ dibelakang titik gangguan, selama gangguan belum teratasi.

Sistem ini dapat menggunakan kabel yang berisolasi maupun konduktor tanpa isolasi. Sistem ini biasanya disebut sistem tegangan rendah yang langsung akan dihubungkan kepada konsumen/ pemakai tenaga listrik.

b. Konfigurasi Saluran

Pada konfigurasi jaringan untuk jaringan distribusi sekunder menggunakan:

- a) Saluran udara 4 kawat/ 3 fasa atau saluran udara 2 kawat/ 1 fasa
- b) Tipe radial
- c) Pengaman dengan *fuse* atau saklar pemutus.

c. Konduktor yang akan digunakan

Pemilihan konduktor merupakan suatu bagian penting dalam sistem distribusi untuk mengalirkan arus dari sumber PLTS menuju ke beban. Pemilihan konduktor harus ideal dan sesuai standar untuk mencegah timbulnya panas dan terjadinya *Losses* yang besar. Tujuan umum pemilihan konduktor untuk mendapatkan fleksibilitas pelayanan yang optimum yang mampu dengan cepat mengantisipasi pertumbuhan kebutuhan energi listrik yang dikarakteristikan oleh makin tingginya konsumsi energi dan kerapatan beban yang harus dilayani.

1) Arus nominal (I_{nominal})

Arus listrik adalah mengalirnya elektron secara terus menerus dan berkesinambungan pada konduktor akibat perbedaan jumlah elektron pada beberapa lokasi yang jumlah elektronnya tidak sama dengan satuan dari arus listrik adalah *ampere*. Untuk menghitung besar arus nominal yang mengalir pada suatu konduktor menggunakan persamaan sebagai berikut :

$$I_{\text{nom}} = \frac{P}{\sqrt{3} \times V \times \cos \phi} \quad (2.12)$$

Dimana :

P = Pemakaian daya (*Watt*)

V = Tegangan (*Volt*)

Cos ϕ = Faktor daya

2) Kuat Hantar Arus (KHA)

Dalam pemilihan konduktor KHA sangat berpengaruh dalam menentukan ukuran kabel yang akan digunakan. KHA (menurut SNI 04-0225-2000) atau KHA

(SPLN 70-4 : 1992) suatu penghantar dibatasi dan ditentukan berdasarkan batasan-batasan dari aspek lingkungan, teknis material serta batasan pada konstruksi penghantar tersebut. Besar KHA pada suatu penghantar dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$KHA = 125\% \times I_{\text{nominal}} \quad (2.13)$$

Dimana :

$$I_{\text{nominal}} = \text{Arus nominal (A)}$$

Jenis penghantar yang digunakan adalah jenis kabel NFA2X atau yang sering disebut sebagai kabel *Twist/* pilin, ketentuan teknis KHA penghantar pada *ambient* temperatur 30° dalam keadaan tanpa angin dapat dilihat pada tabel 2.2:

Tabel 2.2 KHA kabel pilin tegangan rendah berinti alumunium berisolasi XLPE atau PVC pada suhu keliling 30°c.

Jenis Kabel	Penampang Nominal	KHA terus menerus	Penggunaan
NFA2X	3 x 25 + 25	103	Saluran Tegangan Rendah
	3 x 35 + 25	125	
	3 x 50 + 35	154	
	3 x 70 + 50	196	
	3 x 95 + 70	242	
	2 x 10 re	54	
	2 x 10 rm	54	
	2 x 16 rm	72	
	4 x 10 re	54	
	4 x 10 rm	54	
	4 x 16 rm	72	
	4 x 25 rm	102	
	NFAY	2 x 10 re	
2 x 10 rm		42	
2 x 16 rm		58	
4 x 10 re		42	
4 x 10 rm		42	
4 x 16 rm		58	
4 x 25 rm		75	

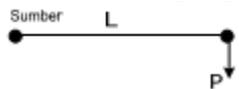
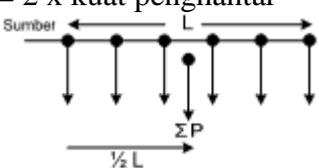
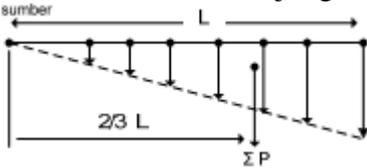
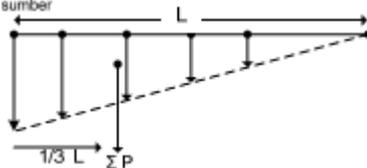
(SPLN BUKU 1: 2010)

1) Faktor distribusi beban

Distribusi beban pada jaringan dapat dinyatakan dalam bentuk matematis untuk beban di ujung penghantar, beban terbagi merata, beban terbagi berat diawal jaringan,

beban terbagi berat di ujung. Dengan pengertian sederhana didapatkan angka faktor distribusi beban pada jarak antara titik berat beban dengan sumber/ gardu.

Tabel 2.3 Diagram distribusi beban

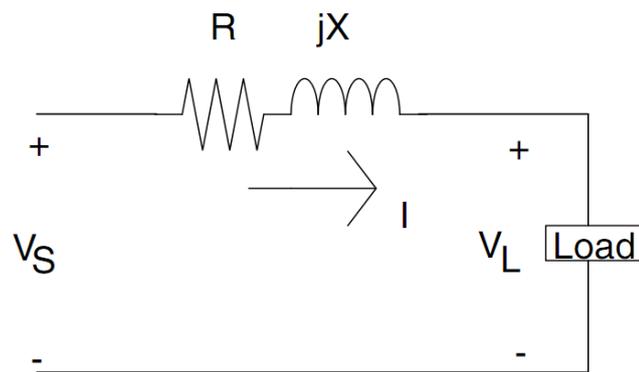
Diagram distribusi beban	Faktor distribusi
<p>1. Beban di ujung penghantar besar beban = kuat penghantar</p> 	$F_d = 1$
<p>2. Beban merata sepanjang saluran besar = 2 x kuat penghantar</p> 	$F_d = 0,5$
<p>3. Beban memberat ke ujung</p> 	$F_d = \frac{2}{3}$
<p>4. Beban memberat ke muka</p> 	$F_d = \frac{1}{3}$

(SPLN BUKU 1: 2010)

d. Susut tegangan/ *drop* tegangan (V_{drop}) pada jaringan distribusi tenaga listrik

Persoalan tegangan sangatlah penting dalam jaringan distribusi, baik dalam keadaan operasi maupun dalam perancangan haruslah selalu diperhatikan tegangan pada setiap titik dalam jaringan. Besarnya jatuh tegangan dapat dinyatakan dalam % atau dalam besaran *volt*, batas tegangan pelayanan yang diperbolehkan adalah antara - 10 % sampai + 5 % (SPLN No. 1, 1995).

Saluran dengan panjang kurang dari 50 km nilai kapasitasnya dapat diabaikan, sehingga dapat dibuat sebuah diagram pengganti seperti yang diperlihatkan pada gambar 2.11 dengan beberapa parameter sebagai berikut:



Gambar 2.11 Diagram pengganti saluran *line* ke *netral*
(William: 2001)

Dimana :

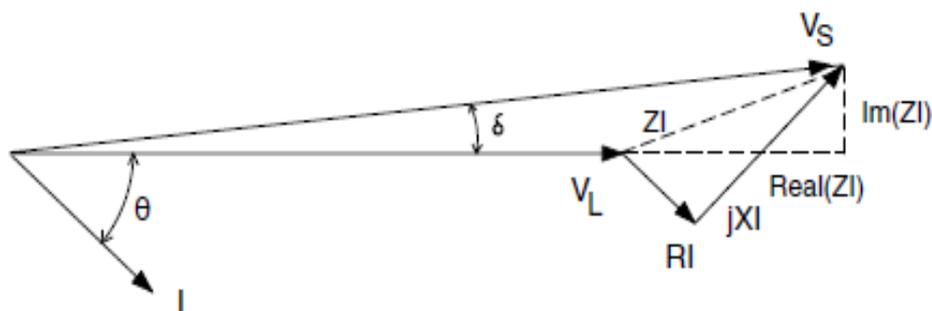
V_S = Tegangan pada ujung kirim (kV)

V_L = Tegangan pada ujung terima (kV)

I = Arus (A)

Load (Z) = $R + jX$ = Impedansi saluran (Ohm)

Bentuk fasor tegangan dari gambar 2.11 dapat dilihat pada gambar 2.12:



Gambar 2.12 Diagram fasor tegangan jaringan distribusi
(Materi distribusi: 2013)

Persamaan jatuh tegangan V_{drop} dengan memperhatikan diagram phasor gambar 2.12 rangkaian listriknya adalah:

$$V_{drop} = IV_S I - IV_L I$$

Sudut antara tegangan sumber V_S dan tegangan beban V_L adalah δ sangat kecil, dengan demikian jatuh tegangan antara tegangan sumber dan beban didekati dengan persamaan bagian real dari jatuh impedansi Z .

$$R_{total} = R_{kabel} \times l_{saluran} \tag{2.14}$$

Dimana :

R_{kabel} = Tahanan pada kabel (Ohm/ km)

ℓ_{saluran} = Panjang saluran kabel (km)

$$V_{\text{drop}} = R_{\text{total}} \times I_{\text{nominal}} \times \text{faktor distribusi} \quad (2.15)$$

Dimana :

R_{total} = Tahanan total (Ohm/ km)

I_{nominal} = Arus nominal (A)

e. Rugi daya (P_{Loss})

Rugi daya adalah rugi yang terjadi pada saluran berupa daya yang diserap oleh tahanan (R) yang menahan aliran arus pada saluran tersebut, besarnya $I^2 \times R$ dalam satuan *Watt*. Menghitung Rugi daya menggunakan rumus (Hutahuruk, 1985):

$$P_L = 3 \times I^2 \times R \quad (2.16)$$

Dimana :

P_L = Rugi daya (*Watt*)

I = Arus saluran (A)

R = Tahanan total saluran (ohm/ km)

f. Tiang penyangga jaringan

Konstruksi jaringan SUTR yang berdiri sendiri dipakai tiang beton atau tiang besi dengan panjang 9 meter. Jarak antar tiang pada SUTR tidak melebihi dari 50 meter, tiang yang dipakai adalah tiang dengan kekuatan/ beban kerja (*working load*) sebesar 200 daN, 350 daN dan 500 daN dengan angka faktor keamanan tiang = 2 (*breaking load* = 2 x *working load*). Pada dasarnya pemilihan kemampuan mekanis tiang SUTR berlandaskan pada 4 hal, yaitu:

1. Posisi fungsi tiang (tiang awal, tiang tengah, tiang sudut)
2. Ukuran penghantar
3. Jarak andongan (*sag*)
4. Tiupan angin

Beban mekanis akibat berat penghantar, pengaruh tiupan angin dan beban-beban mekanis lainnya perlu diperhitungkan khususnya pada tiang awal, tiang sudut dan tiang akhir. Jumlah total beban gaya mekanis pada tiang tidak boleh melebihi beban

kerja tiang. Jika melebihi, maka perlu dipasang konstruksi topang (*guy wire, strut pole*). Tabel 2.3 dan 2.4 adalah tabel untuk pemilihan kekuatan mekanis tiang awal/ ujung dan tiang sudut untuk berbagai macam ukuran kabel pilin saluran udara.

Tabel 2.4 Kekuatan mekanis tiang awal/ ujung untuk saluran tunggal

No	Ukuran penghantar	Kekuatan tiang (daN)
1	$(3 \times 35 + N) \text{ mm}^2$	350 daN
2	$(3 \times 50 + N) \text{ mm}^2$	350 daN
3	$(3 \times 70 + N) \text{ mm}^2$	500 daN

(SPLN BUKU 1: 2010)

Tabel 2.5 Kekuatan mekanis tiang sudut untuk saluran tunggal

No	Ukuran penghantar	30°	45°	60°	90°
1	$(3 \times 35 + N) \text{ mm}^2$	200 daN	200daN	350 daN	500 daN
2	$(3 \times 50 + N) \text{ mm}^2$	200 daN	350 daN	350 daN	500 daN
3	$(3 \times 70 + N) \text{ mm}^2$	350 daN	350 daN	500 daN	500 daN

(SPLN BUKU 1: 2010)