

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Energi

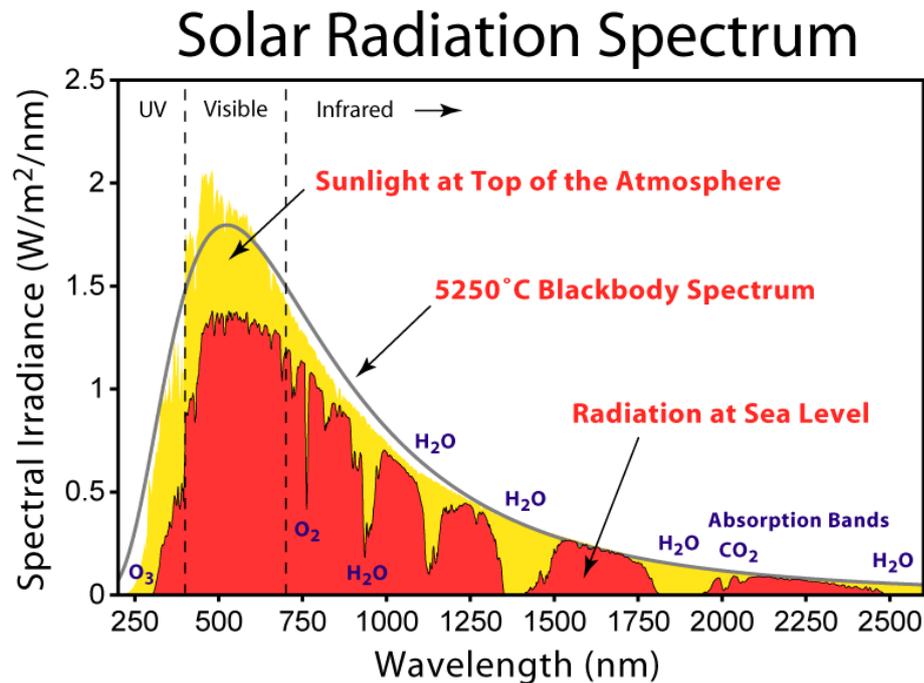
Energi merupakan kemampuan objek untuk melakukan suatu perpindahan atau usaha. Ada berbagai macam energi yang dapat dimanfaatkan dalam kehidupan manusia. Energi memiliki makna lain yaitu daya (kekuatan) yang digunakan dalam melakukan berbagai proses kegiatan. Energi memiliki berbagai macam bentuk yang dapat diubah menjadi energi lainnya. Hukum kekekalan energi ini ditemukan oleh seorang ahli fisika berkebangsaan Inggris, *James Prescott Joule*. Bunyi hukum kekekalan energi, yaitu: “Energi tidak dapat diciptakan maupun dimusnahkan, namun dapat berpindah dari satu bentuk ke bentuk lainnya” Artinya, suatu energi yang terlibat dalam proses kimia dan fisika dapat mengalami perpindahan atau perubahan bentuk. Misalnya Contoh: energi radiasi dapat diubah menjadi energi panas, energi potensial dapat diubah menjadi energi listrik, energi kimia dapat diubah menjadi energi listrik.

### 2.2 Energi Surya

Energi Surya merupakan radiasi elektromagnetik yang di produksi oleh reaksi fusi nuklir pada inti matahari yang cahaya matahari dapat dikonversi menjadi energi listrik. Terdapat dua parameter dalam energi surya yang paling penting : pertama intensitas radiasi, yaitu jumlah daya matahari yang datang kepada permukaan perluas area, dan karakteristik spektrum cahaya matahari.

Intensitas radiasi matahari diluar atmosfer bumi disebut konstanta surya, yaitu sebesar  $1365 \text{ W/m}^2$ .<sup>[2]</sup> Setelah disaring oleh atmosfer bumi, beberapa spektrum cahaya hilang, dan intensitas puncak radiasi menjadi sekitar  $1000 \text{ W/m}^2$ . Nilai ini adalah tipikal intensitas radiasi pada keadaan permukaan tegak lurus sinar matahari dan pada keadaan cerah. Radiasi surya dipancarkan dari *fotosphere* matahari pada temperatur  $6000 \text{ K}$ , yang memberikan distribusi spektrumnya mirip dengan distribusi spektrum *black body*.

Dengan melalui atmosfer bumi, radiasi surya diatenuasikan oleh berbagai partikel diantaranya molekul udara, aerosol, partikel debu, dll sehingga menghasilkan spectrum seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut:



**Gambar 2.1.** Standar Spektrum Radiasi Surya<sup>[4]</sup>

Gambar diatas menunjukkan besar energi radiasi yang diterima dari matahari per satuan area per satuan waktu sebagai fungsi dari panjang gelombang. Pada permukaan matahari energi radiasi yang dipancarkan yaitu sebesar 62 MW/m<sup>2</sup>, dan diatas atmosfer bumi radiasinya berkurang menjadi total sebesar 1353 W/m<sup>2</sup>. Untuk radiasi *blackbody*, semakin tinggi temperatur objek *blackbody* tersebut maka semakin besar juga energi radiasinya. *Blackbody* pada temperatur rata-rata bumi yaitu 300 K, paling kuat memancarkan pada gelombang infrared dan radiasinya tidak dapat terlihat oleh mata. Untuk matahari, dengan temperatur skitar 5800 K, radiasinya paling kuat berada pada gelombang cahaya tampak (*visible*) dengan panjang gelombang sekitar 300 – 800 nanometer (nm)

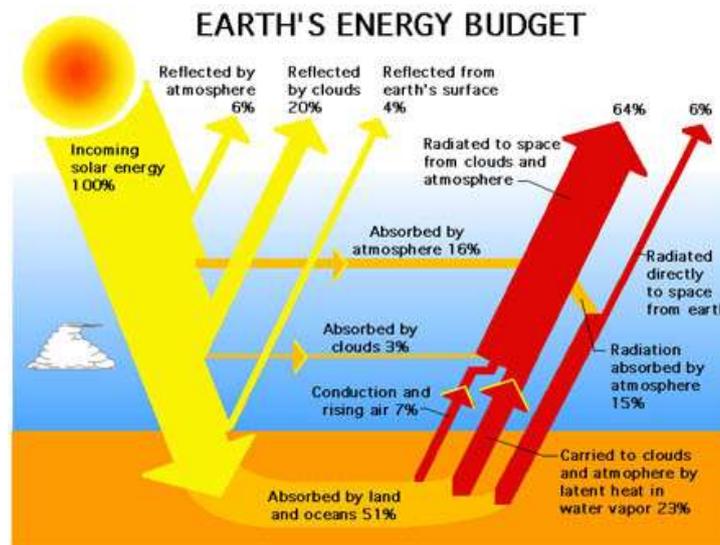
Energi surya tidak bersifat polutif, tak dapat habis dan didapatkan secara gratis. Namun, kekurangan dari energi surya sendiri adalah sangat halus dan tidak konstan. Arus energi surya yang rendah mengakibatkan dipakainya sistem dan kolektor yang luas permukaannya besar untuk mengkonsentrasikan energi itu. Sistem kolektor ini berharga cukup mahal dan ada masalah lagi bahwa sistem

– sistem di bumi tidak dapat diharapkan akan menerima persediaan yang terus menerus dari energi surya ini. Hal ini berarti diperlukan semacam sistem penyimpanan energi atau konversi lain untuk menyimpan energi pada malam hari serta pada saat cuaca mendung.

Energi surya dapat dikonversi secara langsung menjadi bentuk lain dengan tiga proses, yaitu : proses *helochemical*, proses *helioelectrical*, dan proses *heliothermal*. Reaksi *helochemical* yang utama adalah proses fotosintesa. Proses ini adalah sumber dari semua bahan bakar fosil. Proses *helioelectrical* yang utama adalah produksi listrik oleh sel – sel surya dapat dikatakan energi radiasi matahari dikonversi menjadi energi listrik. Proses *heliothermal* adalah penyerapan radiasi matahari dan pengkonversian energi ini menjadi energi termal.<sup>[2]</sup>

### 2.3 Radiasi

Radiasi dapat dibagi menjadi dua dari tipe yaitu *Direct Radiation* dan *Diffuse Radiation*.<sup>2</sup> *Direct Radiation* radiasi yang datang dalam balok lurus dan dapat difokuskan oleh lensa atau cermin. *Diffuse Radiation* adalah radiasi yang dicerminkan oleh atmosfer dan dapat dipantulkan oleh awan. Awan dan debu di atmosfer dapat menyerap atau memantulkan radiasi sehingga mengurangi radiasi yang sampai di permukaan bumi.



**Gambar 2.2.** budget energi bumi <sup>[4]</sup>

Efek Awan dan Atmosfer bumi terhadap energi radiasi yang sampai ke permukaan bumi. Sekitar 50% dari energi radiasi matahari yang tiba di atmosfer bumi, sampai ke permukaan bumi. (Gambar : Wikipedia dan NASA)

Pada keadaan cerah biasanya radiasi akan langsung sampai ke permukaan bumi, sedangkan pada saat keadaan berawan radiasi tersebut akan terserap lalu di sebarakan secara global. Radiasi yang sampai di permukaan bumi pada cuaca mendung biasanya hanya satu per sepuluh dari yang menerima di bawah sinar matahari penuh. Oleh karena itu, sistem surya harus dirancang untuk menjamin daya yang cukup pada periode berawan dengan tingkat radiasi yang lebih rendah. Pada saat yang sama, pengguna sistem harus menghemat energi penggunaan ketika itu cuaca sedang mendung mendung. Radiasi adalah satuan daya per luas  $W/m^2$  dimana daya dari matahari per satuan unit area. Jika modul menghadap ke matahari secara langsung maka radiasi yang sampai ke permukaan modul akan bernilai besar.<sup>[2]</sup>

#### 2.4 Fotovoltaik atau Panel Surya

Fotovoltaik atau sel surya adalah teknologi yang dapat menghasilkan arus searah (*Direct Current*) dengan satuan daya Watt (W) atau kilo Watt (kW) dari bahan semikonduktor ketika bahan ini tersinari oleh foton.<sup>2</sup>



**Gambar 2.3.** Fotovoltaik<sup>[5]</sup>

Prinsip dasar sel surya merupakan kebalikan dari LED (*Light Emitting Diode*) yang mengubah energi listrik menjadi cahaya atau boleh dikatakan identik dengan sebuah dioda cahaya p-n junction. Sel surya terdiri dari lapisan semikonduktor doping – n dan doping – p yang membentuk p – n junction, lapisan antirefleksi, dan substrat logam sebagai tempat mengalirnya arus dari lapisan tipe – n (elektron) dan tipe – p (hole). Semikonduktor tipe – n didapat dengan mendoping silikon dengan unsur dari golongan V sehingga terdapat kelebihan elektron valensi dibanding atom

sekitar. Pada sisi lain semikonduktor tipe – p didapat dengan doping oleh golongan III sehingga elektron valensinya defisit satu dibanding atom sekitar. Ketika dua tipe material tersebut mengalami kontak maka kelebihan elektron dari tipe-n berdifusi pada tipe-p. Sehingga area doping-n akan bermuatan positif sedangkan area doping-p akan bermuatan negatif. Medan elektrik yang terjadi antara keduanya mendorong elektron kembali ke daerah-n dan hole ke daerah-p. Pada proses ini telah terbentuk p-n junction. Dengan menambahkan kontak logam pada area p dan n maka telah terbentuk dioda. Sel surya (*Photovoltaic*) menghisap radiasi dari matahari sebesar 80% namun hanya 5 - 20% energi yang dapat dikonversikan menjadi energi listrik tergantung dari teknologi panel surya yang digunakan sendiri. Panel surya dibuat dengan bahan semi konduktor murni (Ge & Si) yang bersifat setengah penghantar dan mampu menghantarkan arus listrik ke suatu arah saja. Bahan semi konduktor ini sebenarnya adalah isolator yang tidak dapat menghantarkan arus listrik. Namun dengan mencampurkan bahan tersebut dengan bahan lain maka semi konduktor dapat bersifat sebagai setengah penghantar. (Drs. Maridjo: Hal 17)

Pada dasarnya terjadinya arus listrik pada panel surya adalah karena pergerakan elektron (Ge & Si). Teori lubang elektron mengatakan bahwa elektron dapat terlepas dari orbitnya. Elektron yang terlepas dari lingkaran orbit terluar akan meninggalkan *hole*, dan menyebabkan atom bermuatan positif. Atom bermuatan positif tersebut akan menarik elektron dari atom lainnya dan menjadi netral kembali. Atom yang ditarik elektronnya akan menjadi positif, dan akan menarik elektron dari atom yang lainnya lagi. Demikian seterusnya sampai terjadi pergerakan elektron dari satu atom ke atom lainnya. Ketika energi foton yang datang lebih besar dari celah energi ini maka foton akan diserap oleh semikonduktor dan akan membuat elektron bebas bergerak untuk membentuk pasangan *electron-hole* sebagai pembawa muatan. Selanjutnya elektron dan *hole* bergerak berturut – turut ke arah lapisan *n* dan *p* sehingga timbul beda potensial dan *photocurrent* (arus yang dihasilkan cahaya) ketika dua muatan melintasi daerah sambung *p – n*. Jika energi foton yang datang lebih kecil dari celah energi akan tidak akan dapat menggerakkan elektron bebas. Hal ini akan menyebabkan energi foton berjalan – jalan melalui *solar cell* dan diserap pada bagian belakang *solar cell* sebagai panas.

Beberapa parameter dan persamaan yang digunakan untuk mengetahui spesifikasi

atau kemampuan panel surya serta penentuan jumlah modul surya adalah sebagai berikut :

1. Fill Factor (Faktor isi) <sup>[8]</sup>

$$FF = V_{mp} \times I_{mp} / V_{oc} \times I_{sc} \dots\dots\dots(2.1)^{[2]}$$

Keterangan :

FF = Faktor Isi

$I_{mp}$  = Arus Maksimum (Ampere)

$V_{mp}$  = Tegangan Maksimum (Volt)

$I_{sc}$  = Arus Hubung Singkat (Ampere)

$V_{oc}$  = Tegangan Hubung Terbuka (Volt)

Dengan menggunakan faktor isi maka maksimum daya dari sel surya dapat dihitung, dengan persamaan 2.2 berikut :

2. Daya Maksimum <sup>[8]</sup>

$$P_{max} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \dots\dots\dots(2.2)$$

Sehingga efisiensi sel surya yang didefinisikan sebagai daya yang dihasilkan dari sel ( $P_{max}$ ) dibagi dengan daya dari cahaya yang datang (cahaya).

4. Efisiensi <sup>[8]</sup>

$$\eta = P_{max} / P_{cahaya} \dots\dots\dots(2.3)$$

Keterangan :

$\eta$  = Efisiensi panel surya (solar cell)

$P_{max}$  = Daya maksimum panel surya (Solar cell) (Watt)

$P_{cahaya}$  = Irradiasi matahari ( $W/m^2/hari$ )

Selanjutnya, untuk menghitung daya keluaran (Output) panel surya (solar cell) dapat digunakan persamaan 2.4 berikut :

5. Daya Keluaran <sup>[8]</sup>

$$P_{out} = V_{out} \times I_{out} \dots\dots\dots(2.4)$$

Keterangan :

$P_{out}$  = Daya keluaran panel surya (Solar cell)

(Watt)  $V_{out}$  = Tegangan output panel surya (Solar cell) (Volt)

$I_{out}$  = Arus output panel surya (Solar cell) (Volt)

#### 6. Menentukan Jumlah Modul Surya<sup>[8]</sup>

$$\text{Jumlah Panel} = \frac{P_{\text{wattpeak}}}{P_{\text{mpp}}} \dots\dots\dots(2.5)$$

Keterangan :

$P_{\text{mpp}}$  = Daya maksimum panel surya yang digunakan

(W)  $P_{\text{wattpeak}}$  = Daya yang dibangkitkan

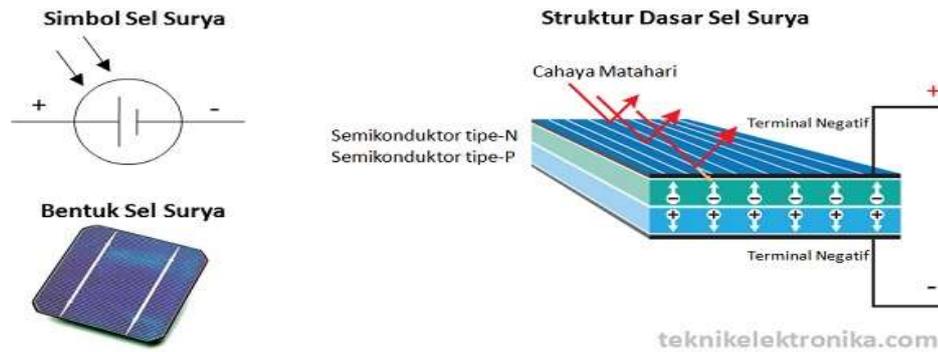
### 2.4.1 Jenis Fotovoltaik atau Panel Surya

Secara komersil jenis fotovoltaik dapat dibedakan menjadi tiga berdasarkan jenis dari bahan *solar cell* yang digunakan.<sup>[2]</sup>

- a. Modul sel *mono-crystalline* yang mempunyai efisiensi sel tertinggi sekitar 17%.
- b. Modul sel *multi-crystalline* yang mempunyai efisiensi sel tertinggi sekitar 15%.sel *multi-crystalline* diperoleh dari batang multi-crystalline silicon dan biasanya dalam keadaan bujur sangkar. Modul *amorphous silicon* dibuat dari film tipis dimana effisiensinya sangat rendah yaitu sekitar 5 – 7% tetapi proses pembuatannya membutuhkan sedikit material. Potensi untuk pengurangan biaya adalah hal utama untuk jenis ini dan banyak penelitian telah dilakukan tahun terakhir ini untuk mengembangkan teknologi amorphous silicon. Tidak seperti mono dan multi- crystalline, dengan amorphous silicon terbentuk tingkatan sepanjang waktu. [1]

### 2.4.2 Struktur Panel Surya

Sinar Matahari terdiri dari partikel sangat kecil yang disebut dengan Foton. Ketika terkena sinar Matahari, Foton yang merupakan partikel sinar Matahari tersebut menghantam atom semikonduktor silikon Sel Surya sehingga menimbulkan energi yang cukup besar untuk memisahkan elektron dari struktur atomnya. Elektron yang terpisah dan bermuatan Negatif (-) tersebut akan bebas bergerak pada daerah pita konduksi dari material semikonduktor. Atom yang kehilangan Elektron tersebut akan terjadi kekosongan pada strukturnya, kekosongan tersebut dinamakan dengan “hole” dengan muatan Positif (+).



**Gambar 2.4** Struktur Panel Surya<sup>[9]</sup>

Gambar diatas menunjukkan ilustrasi panel surya dan juga bagian bagiannya. Secara umum terdiri dari :

1. Substrat/Metal backing

Substrat berjasa dalam menopang hampir seluruh bagian dari panel surya. Dikarenakan substrat berfungsi sebagai kontak terminal positif panel surya, substrat harus memiliki tingkat konduktifitas listrik yang baik. Oleh karena itu beberapa logam biasanya digunakan sebagai bahan dasar substrat seperti aluminium atau molybdenum. Berbeda pada panel surya dye-sensitized (DSSC) dan panel surya organic, substrat selain dibuat dari bahan yang konduktif akan tetapi juga akan dibuat transparan karena berfungsi sebagai tempat masuknya cahaya matahari.

2. Material semikonduktor

Material semi konduktor merupakan bagian inti dari panel surya dikarenakan berfungsi untuk menyerap panas cahaya matahari. Bagian semikonduktor memiliki ketebalan beberapa ratus mikrometer tergantung dengan jenis panel surya yang digunakan. Pada gambar diatas merupakan panel surya yang menggunakan silicon sebagai bahan semikonduktor utama. Sedangkan untuk sel surya lapisan tipis, material semikonduktor yang umum digunakan dan telah masuk pasaran yaitu contohnya material  $\text{Cu(In,Ga)(S,Se)}_2$  (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  $\text{Cu}_2\text{O}$  (copper oxide).

3. Kontak metal / contact grid

Selain substrat yang berfungsi sebagai kontak positif, material semikonduktor pada panel surya juga dilapisi dengan material konduktif transparan yang berfungsi sebagai kontak negatif.

4. Lapisan antireflektif

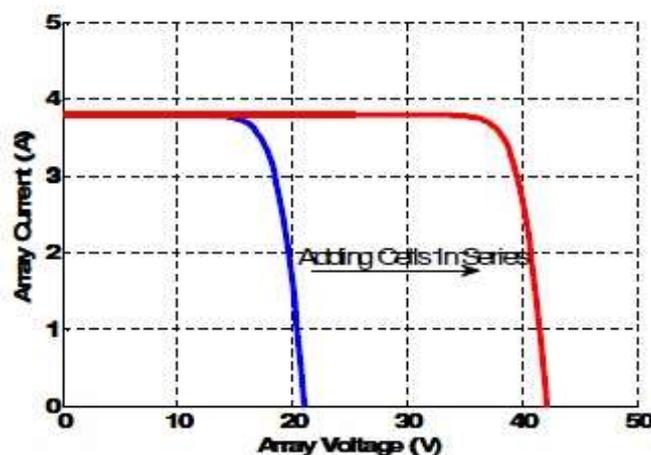
Agar cahaya matahari dapat terserap secara maksimal oleh lapisan semi konduktor harus ditambahkan lapisan antireflektif. Lapisan ini bertugas untuk membelokkan cahaya matahari agar mengarah ke lapisan semi konduktor. Material anti-reflektif ini adalah lapisan tipis material dengan besar indeks refraktif optik antara semikonduktor dan udara.

5. Enkapsulasi / cover glass

Enkapsulasi merupakan bagian pelindung yang berfungsi untuk enkapsulasi yaitu melindungi panel surya dari hujan atau kotoran. [2]

### 2.4.3 Susunan Seri Sel Surya dalam Modul

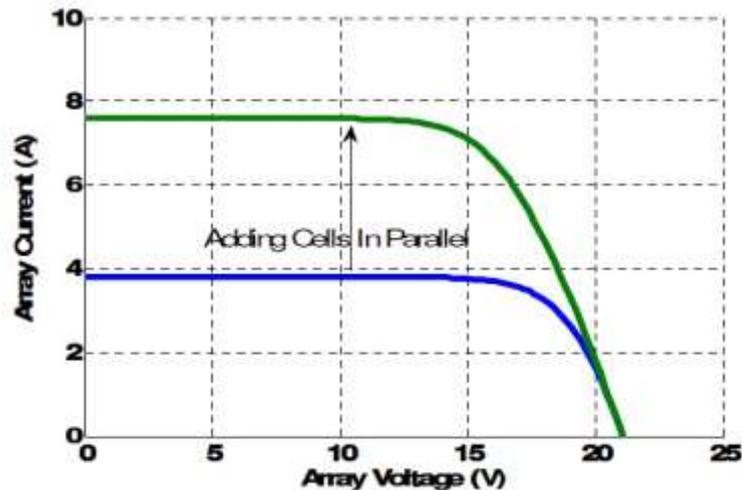
Penyusunan seri akan meningkatkan tegangan tetapi arus konstan. Tegangan total yang dihasilkan adalah penjumlahan dari tegangan yang dihasilkan oleh modul ( $V_{oc1}+V_{oc2}$ ), hal ini sesuai dengan hukum Kirchoff. Gambar 2.6 berikut menunjukkan kurva karakteristik akibat pemasangan modul secara seri.



**Gambar 2.5** Kurva Karakteristik Akibat Pemasangan Modul Secara Seri [2]

#### 2.4.4 Susunan Paralel Sel Surya dalam Modul

Susunan paralel sel surya dalam modul menunjukkan bahwa akan meningkatkan arus tetapi tegangan konstan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. Arus total yang dihasilkan adalah penjumlahan dari arus yang dihasilkan modul ( $I_1+I_2$ ), hal ini sesuai dengan hukum Kirchoff.

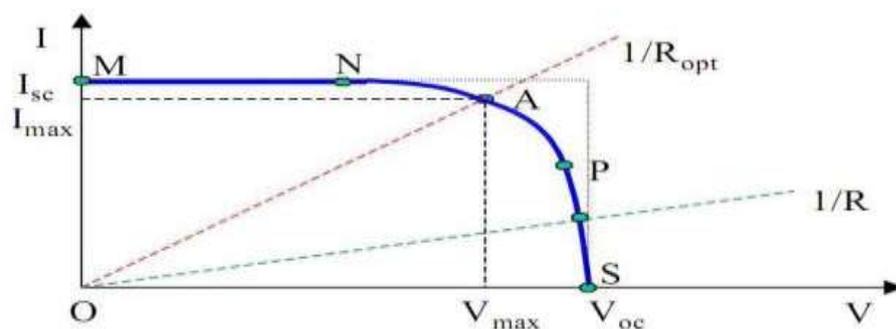


**Gambar 2.6** Kurva Karakteristik Akibat Pemasangan Modul Secara Paralel [2]

Kombinasi Susunan Seri dan Paralel Sel Surya dalam Modul Kombinasi susunan seri dan paralel menghasilkan daya yang besar dengan meningkatkan arus dan tegangan.

#### 2.4.5 Karakteristik Pembebanan pada Sel Surya

Sel surya memiliki karakteristik pada saat pembebanan yang dipengaruhi oleh besarnya resistansi. Karakteristik tersebut ditunjukkan pada Gambar 2.8 berikut :

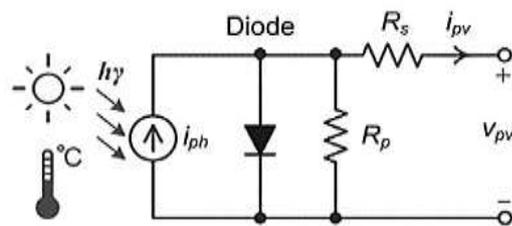


**Gambar 2.7** Kurva Karakteristik Pembebanan Sel Surya [2]

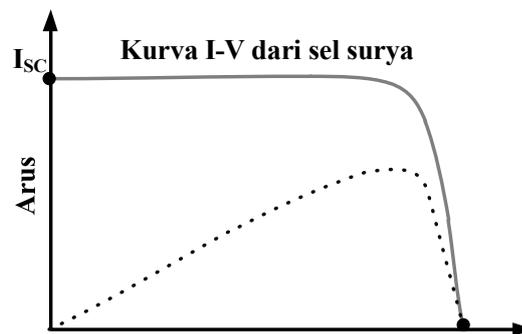
Gambar 2.7 di atas menunjukkan bahwa untuk pembebanan dengan nilai resistansi kecil maka sel surya akan beroperasi pada daerah kurva MN, dimana sel beroperasi sebagai sumber arus yang konstan atau arus *short circuit*. Pada sisi lain, jika nilai resistansi besar maka sel surya beroperasi pada daerah kurva PS, dimana sel beroperasi sebagai sumber tegangan yang konstan atau tegangan *open circuit*. Jika diberikan dengan hambatan optimal  $R_{opt}$ , maka sel surya menghasilkan daya maksimal dengan tegangan dan arus maksimal yaitu pada titik A. <sup>[11]</sup> yaitu pada titik A. <sup>[11]</sup>

#### 2.4.6 Karakteristik Fotovoltaik

Gambar dibawah ini menunjukkan kurva karakteristk dari sel surya. Kurva ini menunjukkan tegangan dan arus keluaran yang didapat dari fotovoltaik ketika tidak dibebani secara langsung.



Gambar 2.8 Rangkaian ekivalen sel tunggal <sup>[6]</sup>



Gambar 2.9. Kurva Karakteristik I-V Sel Surya <sup>[6]</sup>

Ketika sel dalam kondisi short circuit, arus maksimum atau arus short circuit ( $I_{sc}$ ) dihasilkan, sedangkan pada kondisi open circuit tidak ada arus yang dapat mengalir sehingga tegangannya maksimum, disebut tanganan open circuit ( $V_{oc}$ ). Titik pada kurva I-V yang menghasilkan arus dan tegangan maksimum disebut *Maximum Power Point* (MPP). Karakteristik penting lainnya dari sel surya yaitu *fill*

factor (FF), dengan persamaan sebagai berikut:

$$FF = \frac{V_{MPP} \cdot I_{MPP}}{V_{OC} \cdot I_{SC}} \dots \dots \dots (2.1.)$$

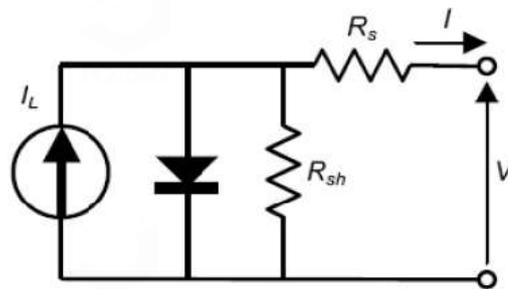
Dengan menggunakan *fill factor* maka maksimum daya dari sel surya didapat dari persamaan:

$$P_{MAX} = V_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF \dots \dots \dots (2.2.)$$

Sehingga efisiensi sel surya yang didefinisikan sebagai daya yang dihasilkan dari sel ( $P_{elektrik}$ ) dibagi dengan daya dari cahaya yang datang ( $P_{cahaya}$ ):

$$\eta = \frac{P_{elektrik}}{P_{cahaya}} \dots \dots \dots (2.3.)$$

Nilai efisiensi ini menjadi ukuran global dalam menentukan performansi suatu sel surya. Fotovoltaik pada umumnya mempunyai hambatan parasitik seri dan hambatan *shunt* yang berpengaruh pada penurunan efisiensi, seperti ditunjukkan pada gambar berikut:



**Gambar 2.10.** Rangkaian Ekuivalen Fotovoltaik<sup>[6]</sup>

Berdasarkan persamaan 2.1. efisiensi dari fotovoltaik sendiri dinyatakan sebagai rasio antara daya keluaran yang dihasilkan (daya listrik) terhadap energi cahaya yang sampai dipermukaan fotovoltaik, atau dinyatakan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{P_{elektrik}}{P_{cahaya}} = \frac{V \cdot I}{A \cdot S_T} \dots \dots \dots (2.4.)$$

- dimana :
- V = Tegangan yang dibangkitkan fotovoltaik (Volt)
  - I = Arus yang dibangkitkan fotovoltaik (Ampere)
  - A = Luas penampang fotovoltaik (m<sup>2</sup>)
  - S<sub>T</sub> = Radiasi matahari (W/m<sup>2</sup>)

Energi keluaran yang dihasilkan fotovoltaiik adalah dengan mengalikan arus modul berbeban dikalikan dengan *peak sun hour* dan dikalikan dengan tegangan maka akan didapatkan energi yang dibangkitkan oleh fotovoltaiik (Hankins, Mark, 2010).

$$E_{out} : V \times I \times PSH$$

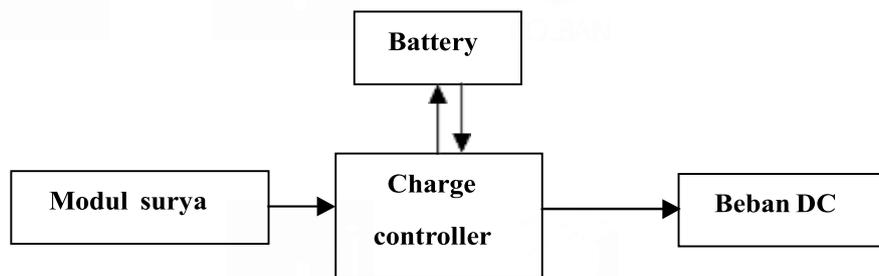
Dimana :

$E_{out}$  = Energi yang dihasilkan fotovoltaiik (Wh)

V = Tegangan yang dibangkitkan fotovoltaiik (Volt)

I = Arus yang dibangkitkan fotovoltaiik (Ampere)

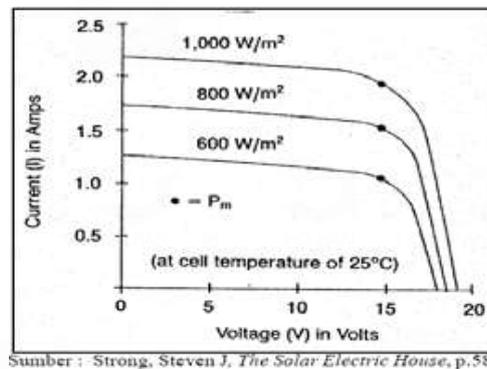
PSH = Nilai efektif dalam satuan waktu (h)



**Gambar 2.11.** Diagram blok sistem<sup>[2]</sup>

Dari gambar 2.11 energi dari matahari dikonversi menjadi energi listrik oleh fotovoltaiik lalu akan disalurkan ke *charge controller* untuk mengatur pengisian *battery*. Dari *charge controller* juga bisa langsung digunakan untuk beban dc. Kondisi meteorologi yang dominan dalam mendesain sistem *solar home system* adalah besarnya radiasi matahari harian ( $W/m^2/hari$ ), serta temperatur lingkungan sekitar sedangkan kelembaban dan kecepatan angin tidak terlalu berpengaruh. (abu bakar dkk, 2006)

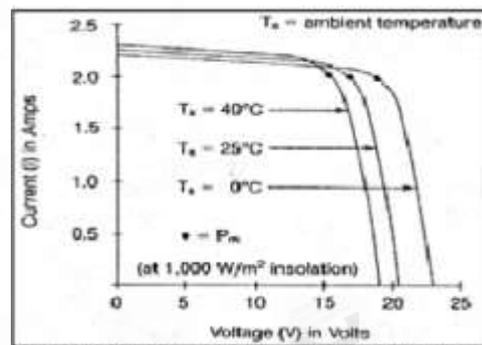
Daya keluaran fotovoltaiik berbanding lurus dengan intensitas cahaya matahari ( $W/m^2$ ). Gambar berikut adalah pengaruh dari intensitas cahaya matahari yang berbeda – beda terhadap keluaran tegangan dan arus.



Sumber : Strong, Steven J, *The Solar Electric House*, p.58

**Gambar 2.12.** Efek dari Intensitas Cahaya Matahari<sup>[2]</sup>

Perubahan temperatur yang terjadi pada fotovoltaik tidak semuanya dikonversi menjadi listrik, hal ini dikarenakan pada fotovoltaik akan menimbulkan panas, maka tegangan keluaran mengecil seperti pada gambar berikut:



Sumber: Strong, Steven J, *The Solar Electric House*, p.58

**Gambar 2.13.** Efek dari Temperatur Terhadap Kurva I-V <sup>[2]</sup>

Daya keluaran pada fotovoltaik sangat bergantung pada intensitas cahaya matahari. Gambar diatas memperjelas hubungan antara temperatur lingkungan dengan daya keluaran. Oleh karena itu karakteristik arus dan tegangan fotovoltaik tidak linier, sehingga daya keluaran maksimumnya bergantung pada tegangan dan arus yang didapat dari fotovoltaik.

Daerah kerja fotovoltaik terbagi menjadi dua daerah wilayah kerja yaitu daerah tegangan dan arus. Pada daerah kerja arus impedansi dalamnya tinggi sedangkan pada daerah sumber tegangan, nilai impedansi dalamnya rendah. Pada daerah arus, arus keluaran mendekati konstan pada perubahan nilai tegangan. Sedangkan pada daerah tegangan, nilai tegangan akan berubah pada range perubahan arus yang besar. Daerah arus dan tegangan pada fotovoltaik dengan luas tertentu nilainya dapat bermacam – macam terhadap besar intensitas matahari dan temperatur.

Berdasarkan teori transfer daya maksimum, daya yang disalurkan ke beban akan maksimum bila impedansi dalam fotovoltaik sama besar dengan impedansi beban (*matching*). Untuk dapat selalu beroperasi pada titik daya maksimum, suatu

kontroler digunakan untuk mengatur tegangan keluaran converter sehingga titik kerja fotovoltaik dapat dijaga pada titik daya maksimumnya.

Nilai efisiensi sebuah modul surya juga sangat tergantung kepada nilai *Peak Sun Hour* (PSH). PSH sangat subyektif tergantung pada karakteristik lingkungan termasuk lamanya penyinaran matahari dan indeks kecerahan disuatu tempat.

Besarnya nilai PSH bisa diperoleh dengan menggunakan rumus berikut:

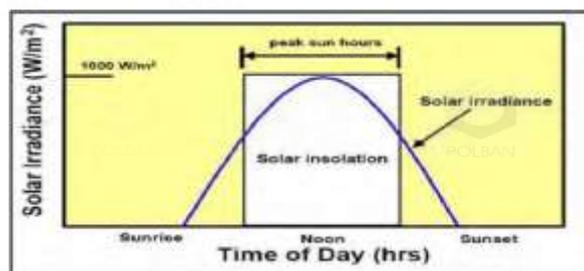
$$PSH = \frac{\sum I \Delta t}{IR} \quad (2.5.)$$

Dimana :

$\bar{I}$  = intensitas matahari pada jam tertentu pada bulan tertentu

$\Delta t$  = rentan waktu dimana matahari memiliki intensitas rata – rata harian  $\bar{I}$

IR = intensitas matahari untuk pengujian standar PV (1000 W/m<sup>2</sup>)



**Gambar 2.14.** Radiasi matahari dan *peak sun hour*<sup>[2]</sup>

#### 2.4.7 Faktor Pengoperasian Sel Surya

Pengoperasian sel surya agar didapatkan nilai yang maksimum sangat tergantung pada faktor berikut:

1. *Ambient Air Temperature*. Sebuah sel surya dapat beroperasi secara maksimum jika temperatur sel tetap normal (pada 25 °C). Kenaikan temperatur lebih tinggi dari temperatur normal pada sel surya akan melemahkan tegangan (Voc). Seperti pada gambar 2.4.2. (c) setiap kenaikan temperatur sel surya 10 Celsius (dari 25 °C) akan berkurang sekitar 0.4 % pada total tenaga yang dihasilkan atau akan melemah dua

kali(2x) lipat untuk kenaikan temperatur sel per  $10^0$  C.

2. Radiasi matahari. Radiasi matahari di bumi dan berbagai lokasi bervariasi, sangat tergantung keadaan radiasi solar ke bumi. Intensitas cahaya matahari akan banyak berpengaruh pada arus (I) dan berpengaruh sedikit pada tegangan.
3. Kecepatan Angin. Kecepatan tiup angin disekitar lokasi sel surya dapat membantu mendinginkan permukaan temperatur kaca-kaca sel surya.
4. Keadaan Atmosfir Bumi. Keadaan atmosfir bumi berawan, mendung, jenis partikel debu udara, asap, uap air, kabut dan polusi sangat menentukan hasil maximum arus listrik dari deretan sel surya Indonesia yang memiliki potensi energi surya yang cukup besar, terutama Indonesia adalah Negara tropis dan hampir sepanjang tahunnya seluruh wilayah Indonesia terkena radiasi matahari[1]

**Tabel 2.1.** Potensi Sumber Daya Energi Surya di Beberapa Kota di Indonesia

N O	KOTA	PROVINSI	TAHUN PENGUKUR AN	RADIASI RATA – RATA (kWh/m <sup>2</sup> )
1	Banda Aceh	Aceh	1980	4.1
2	Palemban g	Sumatera Selatan	1979 – 1981	4.95
3	Jakarta	Jakarta	1965 – 1981	4.19
4	Bandung	Jawa Barat	1980	4.15
5	Semarang	Jawa Tengah	1979 – 1981	5.49
6	Surabaya	Jawa Timur	1980	4.30
7	Denpasar	Bali	1977 – 1979	5.26

(Sumber: Rencana Induk Pengembangan Energi Baru dan Terbarukan, 1997.

Direktorat Jenderal Listrik dan Pengembangan Energi, DESDM).[2]

#### 2.4.8 Prinsip Kerja Panel Surya

Panel 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.

#### 2.5 *Solar charge controller*

*Solar charge controller* adalah komponen elektronik yang digunakan sebagai pengatur arus DC atau yang disebut arus searah yang masuk ke baterai, SCC juga mengatur tegangan yang masuk menuju ke baterai agar tegangan pada baterai tetap stabil agar tidak terjadi *over charging* atau *over voltage*. Hal ini mengingat karena energi yang dihasilkan oleh panel surya tidak stabil atau naik turun bergantung pada sinar matahari yang diterima oleh panel. Solar Charge Controller dikategorikan baik apabila mampu mendeteksi kapasitas pada baterai, dimana pada saat kapasitas baterai terisi penuh maka pengisian baterai pada panel surya akan otomatis diputus oleh SCC. SCC sendiri akan mengisi baterai pada level tegangan tertentu, ketika level tegangan jatuh maka baterai akan terisi otomatis kembali. Komponen SCC sendiri terdiri dari dua jenis yaitu sebagai berikut.<sup>3</sup>

Beberapa fungsi detail dari solar charge controller adalah sebagai berikut:

1. Mengatur arus untuk pengisian ke baterai, menghindari overcharging, dan overvoltage.
2. Mengatur arus yang dibebaskan/ diambil dari baterai agar baterai tidak 'full discharge', dan overloading.
3. Monitoring temperatur baterai

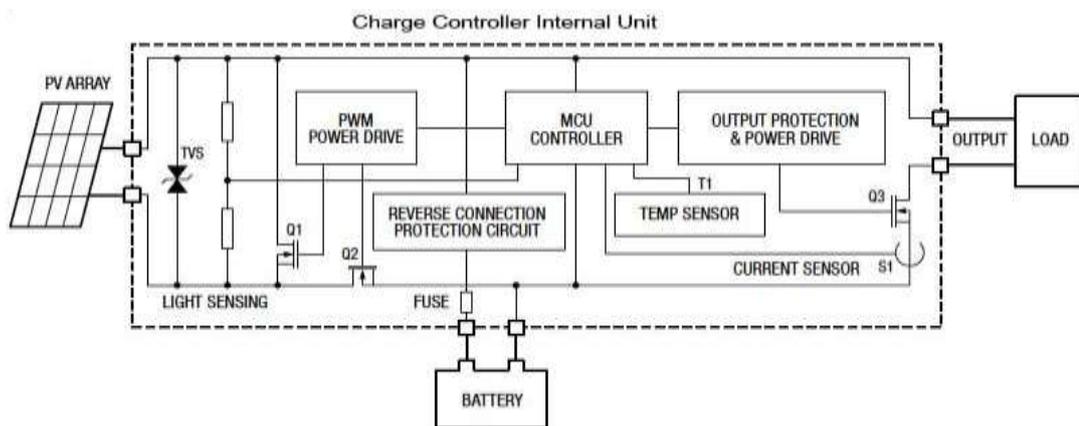
Untuk membeli solar charge controller yang harus diperhatikan adalah:

1. Voltage 12 Volt DC / 24 Volt DC
2. Kemampuan (dalam arus searah) dari controller. Misalnya 5Ampere, 10

Ampere, dsb.

### 3. Full charge dan low voltage cut.

Seperti yang telah disebutkan di atas solar charge controller yang baik biasanya mempunyai kemampuan mendeteksi kapasitas baterai. Bila baterai sudah penuh terisi maka secara otomatis pengisian arus dari panel surya / solar cell berhenti. Cara deteksi adalah melalui monitor level tegangan baterai. Solar charge controller akan mengisi baterai sampai level tegangan tertentu, kemudian apabila level tegangan drop, maka baterai akan diisi kembali. Solar Charge Controller biasanya terdiri dari : 1 input yang terhubung dengan output panel surya / solar cell, 1 output yang terhubung dengan baterai dan 1 output yang terhubung dengan beban ( load). Arus listrik DC yang berasal dari baterai tidak mungkin masuk ke panel sel surya karena biasanya ada 'diode protection' yang hanya melewatkan arus listrik DC dari panel surya ke baterai, bukan sebaliknya. Charge Controller bahkan ada yang mempunyai lebih dari 1 sumber daya, yaitu bukan hanya berasal dari matahari, tapi juga bisa berasal dari tenaga angin ataupun mikro hidro. Di pasaran sudah banyak ditemui charge controller 'tandem' yaitu mempunyai 2 input yang berasal dari matahari dan angin. Untuk ini energi yang dihasilkan menjadi berlipat ganda karena angin bisa bertiup kapan saja, sehingga keterbatasan waktu yang tidak bisa disuplai energi matahari secara full, dapat disupport oleh tenaga angin. Bila kecepatan rata-rata angin terpenuhi maka daya listrik per bulannya bisa jauh lebih besar dari energi matahari.



**Gambar 2. 15** Blok Diagram *Solar Charge Controller* [10]

Penjelasan singkat mengenai blok diagram *Solar Charge Controller*:

a. *MCU Controller*

*MCU Controller* berfungsi sebagai otak dari *Solar Charge Controller*. Mikrokontroler adalah sebuah chip yang berfungsi sebagai pengontrol rangkaian elektronik dan umumnya dapat menyimpan program didalamnya.

b. *PWM Power Drive*

*Solar Charge Controller* menggunakan lebar *pulse* dari *on* dan *off* elektrik sehingga menciptakan seakan-akan *sine wave electrical form*. Lamanya arus *pulse* yang sedang diisi ulang secara perlahan-lahan berkurang sebagaimana tegangan baterai meningkat mengurangi rata-rata arus yang masuk ke dalam baterai.

c. *Reverse Connection Protection Circuit*

Fungsi dari *Reverse Connection Protection Circuit* yaitu untuk memproteksi arus yang masuk ke baterai. Apabila baterai telah terisi penuh maka secara otomatis pengisian daya dari panel sel surya berhenti.

d. *Output Protection & Power Driver*

Sama seperti *Reverse Connection Protection Circuit* bagian ini berfungsi untuk memproteksi output yang menuju beban. Apabila arus masuk ke beban maka fungsi pengisian pada baterai akan terhenti dan sebaliknya apabila baterai mulai mengisi, output tidak dapat mengalir ke beban. Bagian ini juga berfungsi sebagai pemutus apabila daya yang digunakan ke beban melewati batas minimal dari baterai sehingga baterai akan lebih tahan lama.

e. *Sensor Temperatur*

*Sensor Temperatur* berfungsi untuk mendeteksi temperatur pada *solar charge control*. Kelebihan daya yang masuk akan diubah menjadi panas oleh karena itu dibutuhkan monitoring suhu pada *controller*.

f. *Sensor Arus*

*Sensor arus* berfungsi untuk memonitoring arus yang mengalir pada beban. *Solar charge controller* memiliki dua mode kerja, yaitu *charging mode* atau mode pada saat panel surya melakukan pengisian arus dan tegangan pada baterai dan *operation mode* atau mode pada saat penggunaan baterai oleh beban.

### 2.5.1 Cara Kerja Charge Controller

Charge controller, adalah komponen penting dalam pembangkit listrik tenaga surya. Charge controller berfungsi untuk :

1. Charging mode : Mengisi bareai (kapan baterai diisi, menjadi pengisiankalau baterai penuh), dalam charging mode, umumnya baterai diisidengan metode three stage charging:

a) Fase bulk : baterai akan di-charge sesuai dengan tengeran setup (bulk - antara 14.4 - 14.6 Volt) dan arus diambil secara maksimum 21 dari panel surya. Pada saat baterai sudah pada tengeran setup (bulk) dimulailah fase absorption.

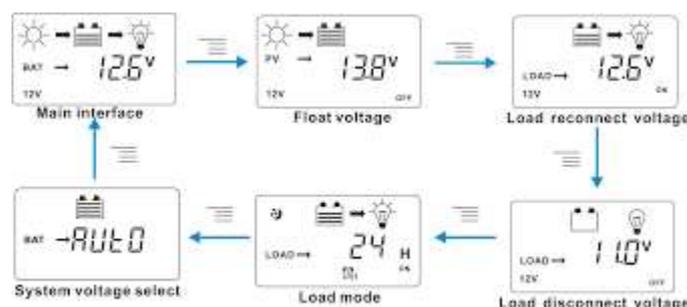
b) Fase absorption : pada fase ini, tengeran baterai akan dijagasesuaidengan tengeran bulk, sampai solar charge controller timer(umumnya satu jam) tercapai, arus yang dialirkan menurun sampai tercapai kapasitas dari baterai.

c) Fase float : baterai akan dijaga pada tengeran float setting(umumnya 13.4 – 13.7 Volt). Beban yang terhubungkebateraidapat menggunakan arus maksimum dari panel surya padastageini.

2. Operation mode : Penggunaan baterai ke beban (pelayananbaterai kebeban diputuskan kalau baterai sudah mulai kosong “kosong”). Padametode ini, baterai akan melayani beban. Apabila ada over-dischargeataupun over-load, maka baterai akan dilepaskan dari beban. Kedua komponen hal ini berguna untuk mencegah kerusakan dari sebuah baterai.

*Solar Charge Control* dibagi menjadi dua, ya

#### 1. *Pulse Wide Modulation (PWM)*



**Gambar 2.16** SCC *Pulse Wide Modulation*<sup>[7]</sup>

*Pulse Wide Modulation* SCC model ini menggunakan lebar pulse dari on dan

off elektrik, sehingga tercipta sinewave electrical form. PWM ini mampu melakukan penyesuaian dengan tegangan pada baterai sehingga jika tegangan dari panel surya dengan tegangan pada baterai akan secara otomatis tidak akan mengisi pada baterai. *solar charge controller* PWM pada umumnya memiliki tiga tahap pengisian berbeda pada baterai (*Accu*), yaitu : tahap Massal (*Bulk Stage*), tahap Penyerapan (*Absorption*), dan tahap *Float* [3].

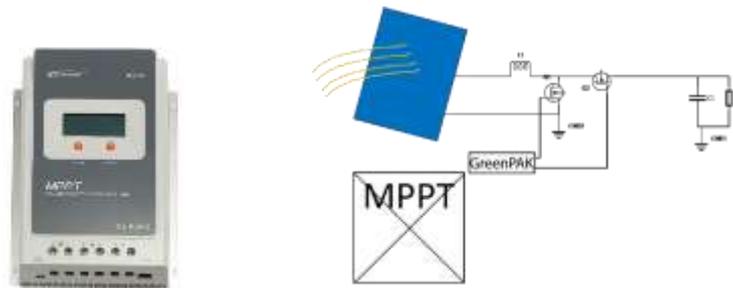


**Gambar 2.17** Tahapan Pengisian Daya Baterai Pada Solar Charge Controller PWM (*Pulse Width Modulation*) [7]

Pada tahap pengisian daya Massal (*Bulk Stage*), pengontrol pengisian daya secara langsung menghubungkan panel surya ke baterai. Tegangan panel surya ditarik turun agar sesuai dengan tegangan baterai dan output arus penuh dari panel surya dibuang ke baterai. Tahap ini memiliki peran besar dalam pengisian baterai atau biasa disebut juga tahap arus konstan. Saat baterai dalam proses pengisian daya, tegangan akan perlahan-lahan dinaikkan hingga mencapai 14,4V. Pada kondisi ini, baterai telah terisi sekitar 80%, pengisian pada tegangan tersebut dengan arus maksimal dapat merusak baterai maka dari itu perlu tahap selanjutnya, sehingga pengendali muatan bergerak ke tahap berikutnya

## 2. *Maximum Power Poin Tracker (MPPT)*

Solar Charge Controller tipe ini memiliki kemampuan dengan pengisian yang lebih besar, dikarenakan MPPT ini mempunyai kemampuan mendeteksi sekecil apapun daya yang dihasilkan oleh panel surya.

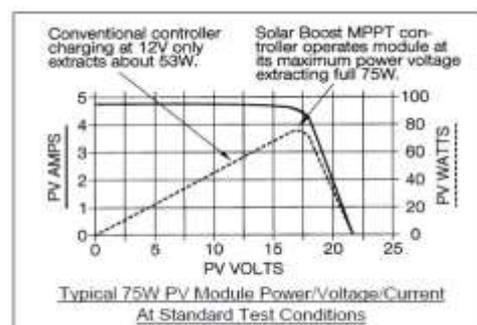


**Gambar 2.18** SCC Maximum Power Point Tracker<sup>[7]</sup>

Tegangan di mana modul PV dapat menghasilkan daya maksimum disebut titik daya maksimum (atau tegangan daya puncak). Daya maksimum bervariasi dengan radiasi matahari, suhu lingkungan, dan suhu sel surya. Modul PV menghasilkan daya dengan tegangan daya maksimum sekitar 17 V bila diukur pada suhu sel 25°C, dapat turun hingga sekitar 15 V pada hari yang diukur pada suhu sel 25°C, dapat turun hingga sekitar 15 V pada cuaca terik dan juga dapat naik hingga 18 V pada hari yang sangat dingin.

- Perbandingan SCC PWM dan MPPT

Kedua jenis SCC ini yang lebih sering digunakan pada sistem pembangkit listrik tenaga surya adalah jenis MPPT. Hal tersebut dikarenakan kualitas pada pengisian beban jenis MPPT memiliki keunggulan dari jenis SCC PWM, karena MPPT mampu mendeteksi daya yang dihasilkan oleh panel surya sekecil apapun, dan MPPT lebih efisien dibandingkan SCC jenis PWM. Maximum Power Point Tracking atau biasa dikenal dengan MPPT merupakan suatu sistem elektronik pada surya panel yang digunakan untuk menghasilkan efisiensi daya maksimum panel surya. MPPT tidak bekerja secara mekanik atau seperti metode tracking sinar matahari pada panel surya. Akan tetapi MPPT bekerja secara elektronik yang memanfaatkan algoritma dan converter di dalam sistem nya

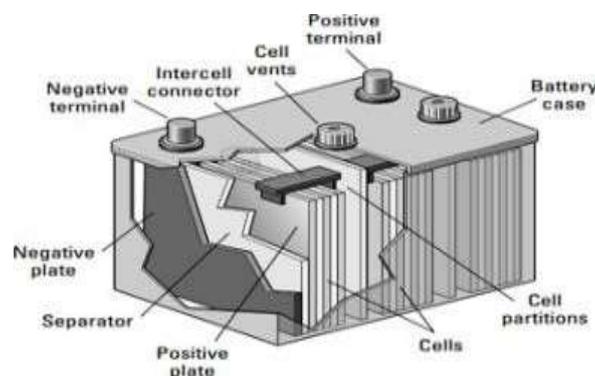


**Gambar 2.19** Grafik Daya MPPT <sup>[2]</sup>

Jika kita amati grafik dibawah ini. Ketika surya panel tidak diberi MPPT atau secara langsung dihubungkan dengan beban baterai maka panel surya tersebut memiliki karakteristik seperti yang telah ditunjukkan oleh grafik. Panel surya akan menghasilkan daya sebesar 53 Watt pada tegangan 12 Volt pada temperatur 25 derajat Celcius dan insolasi  $1000\text{W}/\text{m}^2$  dengan kata lain panel surya hanya menghasilkan 70.67% dari daya maximum sebenarnya. Akan tetapi jika kita memanfaatkan system MPPT maka daya maksimum panel surya akan dapat dicapai. Seperti yang penulis sebutkan diatas MPPT memiliki sebuah DC/DC converter dengan sebuah controller.

## 2.6 Baterai / AKI

Aki adalah media penyimpanan muatan listrik. Secara garis besar aki dibedakan berdasarkan aplikasi dan konstruksi. Berdasarkan aplikasi maka aki dibedakan untuk *engine starter* (otomotif) dan *deep cycle*. Aki otomotif umumnya dibuat dengan pelat timbal yang tipis namun banyak sehingga luas permukaannya lebih besar seperti pada gambar 2.10 dibawah. Dengan demikian aki ini bisa menyuplai arus listrik yang besar pada saat awal untuk menghidupkan mesin. Aki *deep cycle* biasanya digunakan untuk sistem fotovoltaiik (solar sell) dan *back up power*, dimana aki mampu mengalami *discharge* hingga muatan listriknya tinggal sedikit. [6]



**Gambar 2. 20** baterai<sup>[2]</sup>

Jenis aki *starter* atau otomotif sebaiknya tidak mengalami *discharge* hingga melampaui 50% kapasitas muatan listriknya untuk menjaga keawetan aki. Apabila muatan aki basah sampai di bawah 50% dan dibiarkan dalam waktu lama (berharihari tidak di-charge kembali), maka kapasitas muat aki tersebut akan

semakin berkurang sehingga menjadi tidak awet. Berkurangnya kapasitas muat aki tersebut karena proses pembentukan kristal sulfat yang menempel pada pelat ketika muatan aki tidak penuh (di bawah 50%). Keawetan aki berkaitan dengan banyaknya *discharging* pada kedua jenis aki tersebut ditunjukkan pada tabel dibawah ini.

Tabel 2. 2. Siklus Pengisian Pada Jenis *Aki Starter* dan *Deep Cycle* [2]

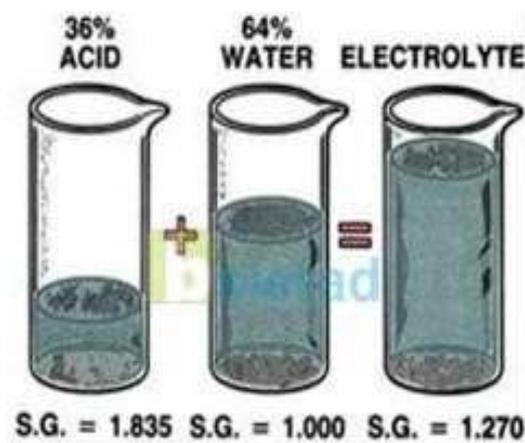
Depth of Discharge	Starter Battery	Deep-cycle Battery
100%	12–15 cycles	150–200 cycles
50%	100–120 cycles	400–500 cycles
30%	130–150 cycles	1,000 and more cycles

Secara konstruksi aki dibedakan menjadi tipe basah konvensional, *flooded lead acid*, *sealed lead acid* (SLA), *valve regulated lead acid* (VRLA), gel, dan *absorbed glass mat* (AGM) dimana semuanya merupakan aki yang berbasis asam timbal (*lead acid*). Berikut adalah kontruksi dari aki:

1. Kotak Baterai

Wadah yang menampung elektrolit dan elemen baterai disebut kotak baterai. Ruangan didalamnya dibagi menjadi ruangan sesuai dengan jumlah selnya.

2. Elektrolit Baterai



**Gambar 2. 21** Elektrolit Baterai [3]

Elektrolit baterai merupakan campuran antara air suling ( $H_2O$ ) dengan asam sulfat ( $SO_4$ ), komposisi campuran adalah 64 %  $H_2O$  dan 36 %  $SO_4$ . Dari

campuran tersebut diperoleh elektrolit baterai dengan berat jenis 1,270.

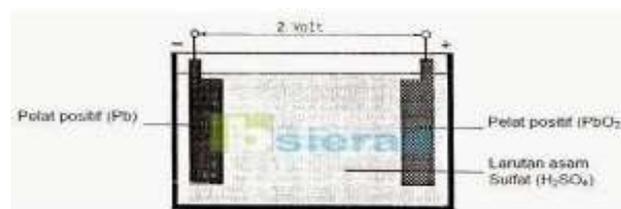
### 3. Sumbu Ventilasi



**Gambar 2. 22** Sumbu Ventilasi <sup>[2]</sup>

Sumbat ventilasi ialah tutup untuk lubang pengisian elektrolit. Sumbat ini juga berfungsi untuk memisahkan gas hidrogen yang terbentuk saat pengisian dan uap asam sulfat di dalam baterai dengan cara membiarkan gas hidrogen keluar lewat lubang ventilasi, sedangkan uap asam sulfat mengembun pada tepian ventilasi dan menetes kembali ke bawah.

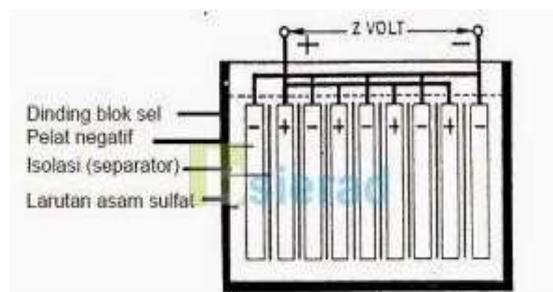
### 4. Kontruksi Sel



**Gambar 2. 23** Kontruksi Sel <sup>[2]</sup>

Baterai terdiri dari beberapa sel dan setiap sel terdiri dari pelat positif dan pelat negatif dan sel ini dibuat dari pelat logam timbel berpori, dengan maksud dan tujuan untuk mempermudah reaksi kimia pada permukaan berpori tersebut sedangkan bahan aktif dari pelat positif adalah timbel dioksida ( $PbO_2$ ) berwarna coklat dan untuk pelat negatif adalah timbel ( $Pb$ ) berwarna abu – abu.

### 5. Kontruksi Blok Sel

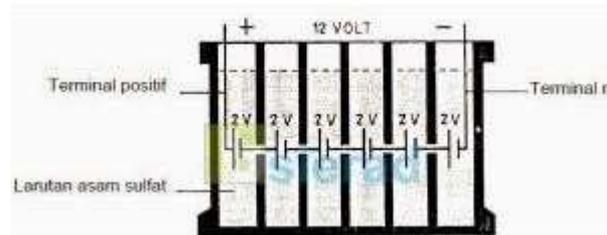


**Gambar 2. 24** Kontruksi Blok Sel <sup>[2]</sup>

Batang penghubung sel-sel adalah pelat – pelat yang tergabung di dalam

blok – blok sel dan pelat positif dibatasi oleh isolasi (separator) yang terbuat dari ebonit atau pelastik kemudian blok – blok sel ini dimasukkan dalam blok baterai yang diisi larutan asam sulfat ( $H_2SO_4$ ) serta setiap blok sel menghasilkan tegangan sebesar 2 Volt.

#### 6. Hubungan Blok Sel



**Gambar 2. 25** Hubungan Blok Sel <sup>[2]</sup>

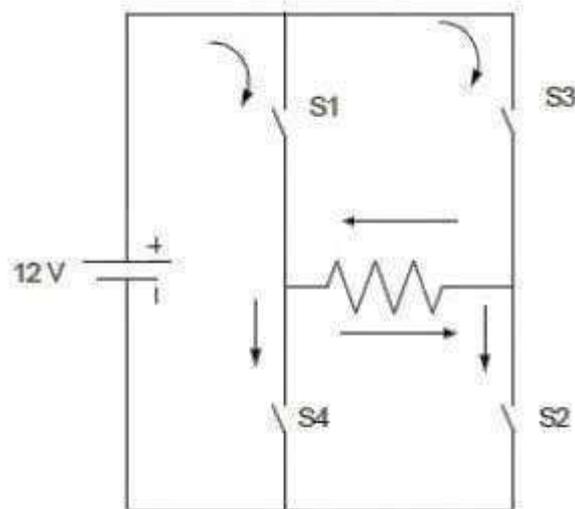
Tujuan dari menghubungkan blok – blok sel secara seri adalah untuk memperoleh tegangan yang lebih tinggi misalnya untuk memperoleh tegangan 12 Volt, baterai membutuhkan 6 blok sel yang masing – masing bertegangan 2 Volt.

### 2.7 Inverter

Inverter adalah perangkat elektronika yang dipergunakan untuk mengubah tegangan *DC* (*Direct Current*) menjadi tegangan *AC* (*Alternating Current*). Output suatu inverter dapat berupa tegangan *AC* dengan bentuk gelombang sinus (*sine wave*), gelombang kotak (*square wave*) dan sinus modifikasi (*sine wave modified*). Inverter tidak bisa memproduksi listrik *AC* hanya berfungsi mengubah dari tegangan sumber arus *DC* yang sering kali berupa baterai/aki, *solar cell*/panel dan lain-lain.

#### 2.7.1 Prinsip Kerja Inverter

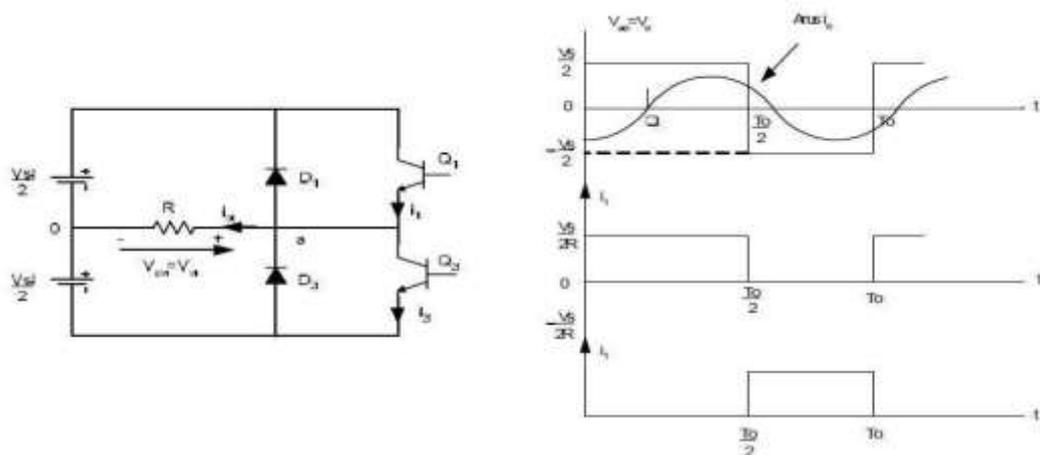
Prinsip kerja inverter dapat dijelaskan dengan menggunakan 4 sakelar seperti ditunjukkan pada dibawah. Bila sakelar S1 dan S2 dalam kondisi on maka akan mengalir aliran arus *DC* ke beban R dari arah kiri ke kanan, jika yang hidup adalah sakelar S3 dan S4 maka akan mengalir aliran arus *DC* ke beban R dari arah kanan ke kiri. Gambar 2.6 merupakan skema rangkaian Inverter yang biasanya menggunakan rangkaian modulasi lebar pulsa (*pulse width modulation – PWM*) dalam proses conversi tegangan *DC* menjadi tegangan *AC*. <sup>[6]</sup>



**Gambar 2.26** Konsep Kerja Inverter

### 2.7.2 Inverter Gelombang penuh

yaitu inverter yang memiliki tegangan output dengan bentuk gelombang sinus murni. Inverter jenis ini dapat memberikan supply tegangan ke beban (Induktor) atau motor listrik dengan efisiensi daya yang baik. Gambar 2.7 menunjukkan gelombang penuh inverter.



**Gambar 2.27** Gelombang Penuh Inverter

Rangkaian dasar inverter gelombang penuh dan bentuk gelombang output dengan beban resistif ditunjukkan pada gambar di atas. Ketika transistor Q1 dan Q2 bekerja (ON), tegangan  $V_s$  akan mengalir ke beban tetapi Q3 dan Q4 tidak bekerja (OFF). Selanjutnya, transistor Q3 dan Q4 bekerja (ON) sedangkan Q1 dan Q2 tidak bekerja

(OFF), maka pada beban akan timbul tegangan  $-V_s$ .

Hal-hal yang harus diperhatikan dalam memilih inverter DC ke AC diantaranya adalah.

- **Kapasitas beban** yang akan disupply oleh inverter **dalam Watt**, usahakan memilih inverter yang beban kerjanya mendekati dengan beban yang hendak kita gunakan agar efisiensi kerjanya maksimal.
- **Sumber tegangan input inverter** yang akan digunakan, input DC 12 Volt atau 24 Volt.
- **Bentuk gelombang output inverter**, Sinewave ataupun square wave untuk tegangan output AC inverter. Hal ini berkaitan dengan kesesuaian dan efisiensi inverter DC ke AC tersebut. [7]

### 2.7.3 Jenis Inverter

Berikut merupakan jenis-jenis Inverter yaitu:

1. Inverter *True-sinewave* (gelombang arus murni), menghasilkan gelombang listrik yang sama dengan listrik PLN bahkan lebih baik dalam segi kestabilan dibanding daya yang dihasilkan PLN.

Gelombang daya listrik bila dilihat melalui *oskiloskop* menampakkan gelombang sinus yang sempurna. *True sine wave* inverter diperlukan terutama untuk beban-beban yang masih menggunakan motor agar bekerja lebih mudah, lancar dan tidak cepat panas. Oleh karena itu dari sisi harga maka *True sine wave inverter* yang paling mahal diantara inverter jenis lainnya karena inverter jenis ini yang paling mendekati bentuk gelombang asli dari jaringan listrik PLN.

2. Inverter *Modified-sinewave* (gelombang sinus modifikasi), merupakan kombinasi antara *square wave* dan *sine wave*. Menghasilkan daya listrik yang cukup memadai untuk sebagian peralatan elektronik tetapi memiliki kelemahan karena kekuatan daya listrik yang dihasilkan tidak sama persis dengan daya listrik dari PLN. Bentuk gelombang yang muncul berbentuk kotak yang kaku. Perangkat yang menggunakan kumparan masih bisa beroperasi dengan *modified sine wave inverter*, hanya saja kurang maksimal. Jenis inverter ini lebih murah dibandingkan inverter *True-sinewave* dan paling umum dipasarkan karena murah diproduksi sedangkan pada square wave inverter beban-beban listrik yang menggunakan kumparan/motor tidak bekerja sama sekali.

3. *Grid Tie Inverter* yang merupakan special inverter yang biasanya digunakan dalam sistem energi listrik terbarukan, yang mengubah arus listrik DC menjadi AC yang kemudian diumpankan ke jaringan listrik yang sudah ada. Grid Tie Inverter juga dikenal sebagai *synchronous inverter* dan perangkat ini tidak dapat berdiri sendiri, apalagi bila jaringan tenaga listrik tidak tersedia.

Dibandingkan dengan jenis lain, *inverter true-sinewave* lebih banyak digunakan karena memiliki beberapa kelebihan antara lain:

- a. *True-sinewave* memiliki keluaran gelombang dengan distorsi harmonik yang rendah, daya listrik hampir tanpa gangguan serta kestabilan yang lebih baik.
- b. Beban induktif berjalan lebih cepat, tidak bising dan tidak cepat panas (beban induktif yaitu beban daya ketika perangkat elektronik pertama kali dihidupkan).
- c. Mengurangi gangguan pada speaker seperti suara distorsi, kebisingan pada kipas angin, mencegah kedip (*flicker*) pada monitor, lampu neon, TV dan mencegah kerusakan pada piranti seperti hardware komputer (*harddisk, motherboard, processor*), dll, disebabkan oleh tidak stabilnya tegangan listrik.

#### 2.7.4 Parameter Inverter

Ada beberapa hal yang perlu dipertimbangkan dalam pemilihan inverter.

1. Kapasitas beban dalam Watt, usahakan memiliki inverter yang beban kerjanya mendekati dengan beban yang hendak kita gunakan agar efisiensi kerjanya maksimal.
2. Input DC 12 Volt atau 24 Volt.
3. Sinwave ataupun square wave output AC.
4. Keandalan saat adanya sertakan. Inverter mempunyai dua penilaian daya: satu untuk daya yang terus-menerus, dan yang lebih tinggi untuk daya tertinggi. Mereka dapat menyediakan daya tertinggi untuk waktu yang sangat singkat, seperti ketika menghidupkan mesin.

Inverter juga sebaiknya dapat secara aman menginterupsi dirinya sendiri (dengan sakelar pemutus (*circuit breaker*) atau sekering) seandainya terjadi terjadi arus sirkuit pendek, atau jika daya yang diminta terlalu tinggi.

5. Efisiensi konversi. Inverter paling efisiensi ketika memberikan 50% sampai 90% dari rating daya terus-menerus mereka. Anda sebaiknya memilih inverter yang hampir sesuai dengan syarat beban Anda. Pabrik biasanya menyediakan kinerja inverter di 70% dari daya nominalnya.

6. Pengisian daya baterai. Banyak inverter juga memasukkan fungsi terbaik: kemungkinan mengisi daya baterai dari sebuah sumber arus AC (jaringan listrik, genset dll). Inverter tipe ini dikenal sebagai charger/inverter.

7. *Automatic fail-over.*

Beberapa inverter dapat berpindah secara otomatis di antara sumber daya yang berbeda (jaringan listrik PLN, pembangkit daya listrik, surya) tergantung pada apa yang terjadi. Ketika menggunakan peralatan

telekomunikasi, sebaiknya menghindari pengguna konverter DC/AC dan memberi daya kepada mereka secara langsung dari sebuah sumber DC. Kebanyakan peralatan komunikasi dapat menerima tingkatan input tegangan yang cukup besar.

### **2.7.5 Beban**

Beban merupakan suatu peralatan yang mengkonsumsi daya yang dihasilkan oleh sumber daya. Beban ini misalnya seperti lampu, kipas, alat elektronik dll. Pada keseluruhan sistem, total daya adalah jumlah semua daya aktif dan reaktif yang dipakai oleh peralatan yang menggunakan energi listrik.

Jadi dalam penggunaan rumah tangga, total beban listrik adalah total semua daya yang dikonsumsi oleh peralatan listrik tersebut yang aktif, karena dalam kondisi mati peralatan tentu tersebut tidak menggunakan daya listrik.

### **2.8 Switch Breaker**

*Switch breaker* adalah saklar pemutus atau *electrical switch* yang secara otomatis beroperasi walaupun beban yang lebih banyak dan pada keadaan error atau hubung singkat. Sistem tidak sama seperti sekering yang hanya bekerja sekali. Circuit Breaker memiliki tombol reset (secara otomatis atau manual). Adapun jenis-jenis pemutus tenaga sebagai berikut:

### 2.8.1 Moulded Case Circuit Breaker (MCCB)

MCCB adalah suatu alat yang berfungsi untuk mengamankan jaringan yang memiliki hubung singkat dan beban yang melebihi kapasitas secara otomatis. Salah satu kelebihan dari sistem ini yaitu dapat diatur sesuai dengan keinginan user atau pengguna. Akan tetapi pada MCCB arus yang dibutuhkan haruslah lebih kecil dari arus MCCB itu sendiri. Mari kita amati gambar 2.1 dibawah ini:



**Gambar 2.28** Moulded Case Circuit Breaker (MCCB)

Keterangan:

1. Bahan BMC untuk bodi dan penutup
2. Peredam busur api.
3. Blok sambungan untuk pemasangan ST dan UVT.
4. Penggerak lepas – sambung.
5. Kontak gerak.
6. Data pabrikan.
7. Unit pemutus magnetic.
8. Unit pemutus thermal.
9. Compact Size.

### 2.8.2 Mini Circuit Breaker (MCB)

MCB yaitu sebuah sistem digunakan untuk mengamankan suatu jaringan listrik yang memanfaatkan thermis (bimetal) dengan pengamanan untuk load yang melebihi batas dengan relay electromagnetik sebagai

penggunaan hubung singkat. Lebih jelasnya bisa kita amati pada gambar 2.2 dibawah ini :



**Gambar 2.29** Mini Circuit Breaker (MCB)

Berdasarkan simbol pada gambar II.1, MCB mempunyai tiga macam fungsi yaitu:

1) Pemutus Arus

MCB mempunyai fungsi sebagai pemutus arus listrik ke arah beban. Dan fasilitas pemutus arus ini bisa dilakukan secara manual dengan merubah toggle switch yang ada didepan MCB (biasanya berwarna biru atau hitam) dari posisi “ON” ke posisi “OFF” kemudian bagian mekanis dalam MCB akan memutus arus listrik. Hal ini biasanya dilakukan bila kita ingin mematikan sumber listrik di rumah karena adanya keperluan perbaikan instalasi listrik rumah. Istilah yang biasa dipakai adalah MCB Switch Off. Sedangkan MCB akan otomatis “OFF” bila terjadi arus lebih, yang disebabkan karena beban pemakaian listrik yang lebih atau terjadi gangguan hubung singkat, sehingga bagian dalam MCB akan memerintahkan untuk “OFF” agar aliran listrik terputus. Istilah yang biasa dipakai adalah MCB Trip. (Anggita, 2016)

2) Proteksi Beban Lebih (Overload)

Fungsi ini akan bekerja bila MCB mendeteksi arus listrik yang melebihi rating-nya. Misalnya, MCB mempunyai rating arus listrik 6A tetapi arus listrik aktual yang mengalir melalui MCB tersebut ternyata 7A, maka MCB akan trip dengan delay waktu yang cukup lama sejak MCB ini mendeteksi arus lebih tersebut. Bagian di dalam MCB yang menjalankan tugas ini

adalah sebuah strip bimetal. Arus listrik yang melewati bimetal akan membuatnya menjadi panas dan memuai atau mungkin melengkung. Semakin besar arus listrik maka bimetal akan semakin cepat panas dan memuai dimana pada akhirnya akan memerintahkan switch mekanis MCB untuk memutus arus listrik dan toggle switch akan pindah ke posisi “OFF”. Lamanya waktu pemutusan arus ini tergantung dari besarnya arus beban lebih. Fungsi strip bimetal ini disebut dengan thermal trip. Saat arus listriknya sudah putus, maka bimetal akan mendingin dan kembali normal dan MCB sudah bisa kembali mengalirkan arus listrik dengan mengembalikan ke posisi “ON”. (Anggita, 2016) 3) Proteksi Hubung Singkat (Short Circuit) Fungsi proteksi ini akan bekerja bila terjadi short circuit atau hubung singkat arus listrik. Terjadinya hubung singkat akan menimbulkan arus listrik yang sangat besar dan mengalir dalam sistem instalasi listrik rumah. (Anggita, 2016)

### 2.8.3 Kode dan Simbol MCB

Ada beberapa perbedaan antara MCB milik PLN yang terpasang di kWh meter dengan milik pelanggan yang dijual secara umum. Yang pertama adalah warna toggle switch yang berbeda (dalam produk dari produsen MCB yang sama, milik PLN memiliki warna toggle switch biru dan yang dijual untuk umum berwarna hitam) dan yang kedua adalah tulisan “Milik PLN” pada MCB yang dipasang di kWh meter. Walaupun memang ada juga produsen MCB lainnya yang menggunakan warna toggle switch biru untuk produk yang dijual di pasaran. (Hadianto, 2013)

#### 1) Simbol dengan angka 1 dan 2

Simbol ini adalah fungsi dari MCB sebagai proteksi beban penuh dan hubung singkat. Hal ini juga menjelaskan bahwa MCB ini adalah 1 pole (karena hanya ada 1 simbol saja). Bila ada dua simbol berdampingan, maka MCB-nya adalah 2 poles. Yang umum dipakai di perumahan adalah tipe MCB 1 pole, dimana hanya kabel fasa saja yang diproteksi.

#### 2) C60a Merupakan nomor model MCB yang ditentukan dari produsen MCB. Lain produsen berarti lain nomor model yang tercantum. Untuk

nomor model C60A ini adalah MCB yang diproduksi untuk keperluan perumahan secara umum.

- 3) C10 Kode ini menjelaskan kurva trip (tripping curve) MCB yaitu tipe “C”, dengan proteksi magnetic trip sebesar 5-10In (In: arus nominal atau rating arus dari MCB) dan angka “10” adalah rating arus dari MCB tersebut yaitu sebesar 10A. Rating arus ini adalah kode paling penting dalam MCB dan berguna saat pembelian MCB.

- 1) 230/400V

Menjelaskan rating tegangan dalam pengoperasian MCB yaitu 230V atau 400V sesuai dengan tegangan listrik PLN 220V.

- 2) 23850

Catalog Number dari produsen MCB yang tujuannya sebagai nomor kode saat pembelian.

- 3) I-ON pada toggle switch

Menandakan bahwa MCB pada posisi “ON”. Untuk posisi “OFF” maka simbolnya adalah “O-OFF”.

#### 2.8.4 Air Circuit Breaker (ACB)

ACB adalah pemutus tegangan biasanya digunakan pada pemadaman busur api berupa udara dan dimanfaatkan untuk tegangan rendah atau menengah. Tekanan atmosfer pada udara dapat digunakan untuk pemadaman busur api sehingga menimbulkan proses *switching* ataupun gangguan. Pengoperasian ACB hanya dijumpai dipasaran dengan bantuan solenoid, motor maupun pneumatik [5]. Gambar *Air circuit Breaker* (ACB) dapat dilihat pada gambar 2.3 dibawah ini:

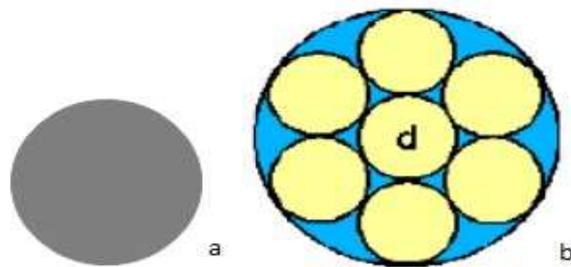


**Gambar 2.30** Air Circuit Breaker (ACB)

## 2.9 Kabel

Kabel terbuat dari bahan konduktor agar mudah menghantarkan listrik karena fungsi kabel adalah untuk mengalirkan listrik dari satu piranti ke piranti. Semakin besar ukuran diameter kabel, semakin mudah elektron mengalir. Dengan demikian, penggunaan kabel tidak lepas dengan perhitungan ukuran diameter kabel yang akan digunakan.

Pada umumnya, kabel berbentuk lingkaran di penampang melintangnya. Kabel dapat dibagi menjadi dua jenis, yaitu kabel *solid* dan kabel *stranded*. Kabel *solid* adalah kabel yang terbuat dari konduktor *solid* sepanjang kabel tersebut, sementara kabel *stranded* adalah kabel yang terbuat dari kabel-kabel *solid* yang lebih kecil (*strand*) dan digulung hingga membentuk satu kabel yang lebih besar. Kabel *stranded* memiliki keunggulan dalam hal fleksibilitas, karena kabel jenis ini lebih mudah untuk ditekuk dan digulung daripada kabel *solid*.



**Gambar 2.31** (a) Kabel *Solid* dan (b) Kabel *Stranded* dengan 7 *Strand*  
(Sumber Saputra 2015)

Ukuran diameter pada sebuah kabel dapat dikur dengan satuan panjang pada umumnya (misalnya pada Gambar 2.15 (a) menggunakan satuan inch) atau menggunakan satuan mils. Satuan mils menunjukkan 1.000 kali 1 inch, sehingga diameter kabel *solid* pada Gambar 2.15 (b) menjadi 101,9 mils. Diameter penampang melintang kabel *stranded* adalah diameter masing-masing *strand* dikali dengan banyaknya *strand* sepanjang diameter kabel. Pada Gambar 2.15 banyaknya *strand* sepanjang diameter kabel adalah 3. Selain ukuran diameter, ukuran luas penampang melintang kabel juga dapat dihitung dengan satuan mils. Bentuk ukuran luas penampang kabel adalah lingkaran, sehingga satuannya disebut *circular mils*. Satu *circular mils* adalah luas penampang lingkaran yang diameternya 1/1.000 inch. [17]

Dalam penentuan perhitungan panjang kabel pada buku GSES dalam satu lokasi semua peralatan telah diperhitungkan untuk menentukan rute kabel. Rute kabel mencakup :

1. Dari *PV array* ke *junction box* dan *junction box ke inverter*, atau
2. Dari *PV array* langsung ke inverter, dan
3. Inverter untuk *switch board* atau *distribution board*

Jarak kabel ini perlu diukur karena jarak akan digunakan untuk memilih ukuran kabel dan untuk menentukan perhitungan kerugian system. Untuk menentukan ukuran kabel, menggunakan rumus:

$$q = \frac{L \cdot N}{y \cdot ev \cdot E} \dots\dots\dots(2.5)$$

q = Ukuran kabel (mm) L = Panjang Kabel (m)

y = Masa jenis penghantar tembaga ev = Drop  
tegangan (Perkiraan Losses kabel & terminal)

E = Tegangan yang melewati penghantar (V)

## 2.10 Acuan Standar Pemilihan Komponen

Pemilihan jenis-jenis komponen yang akan digunakan dalam perancangan dan pembuatan suatu perangkat adalah hal yang sangat mutlak untuk dilakukan, karena hal tersebut akan berdampak terhadap kualitas perangkat, efisiensi, dan efektifitas perangkat yang akan dibuatnya. Beberapa hal yang perlu diperhatikan dalam pemilihan komponen adalah kualitas masing-masing komponen, kehandalan komponen, bentuk serta dimensi komponen, dan juga dana yang sedapat mungkin ditekan agar lebih efisien dalam hal ekonomisnya.

Pemilihan komponen yang akan dirancang pada PLTS Gedung Terpadu pada ini mengacu pada standar buku *Global Sustainable Energy Solution (GSES)* dengan judulnya “*Grid-Connected PV Systems Design and*

*Installations*”. Edisi Pertama yang telah memiliki standar yang tersertifikasi dari pemerintah (*Ministry of New and Renewable Energy*) yang bertempat di negara India. Berdasarkan panduan ini informasi yang diperlukan untuk sebuah instalasi sistem terhubung pembangkit listrik sel surya antara lain :

## 2.11 Modul

Menurut standar dari *Ministry of New and Renewable Energy*, modul harus sesuai dengan standar internasional. Modul yang berkualitas dipasang dan yang memiliki standar international yang paling umum diterapkan untuk PV *modules* adalah

1. *IEC61215 – Crystalline Silicon Terrestrial photovoltaic (PV) modules. Design qualification and type approval*
2. *IEC61646 – Crystalline Thin-Film Terrestrial photovoltaic (PV) modules, Design qualification and type approval*
3. *IEC61730 – Photovoltaic (PV) module safety qualification. Requirements for construction & Requirements for testing.*

Menurut dari acuan pemerintah India yang berujuk ke buku GSES, minimal persyaratan teknis standar untuk PV sistem atau penggunaan, produksi harus menyediakan minimal informasi berikut pada lembar spesifikasi mereka:

1. Nama produksi *PV Module*
2. Nama produksi Sel Surya
3. Bulan dan tahun produksi (secara terpisah untuk *PV Module* dan Sel Surya)
4. Negara asal (secara terpisah untuk *PV Module* dan Sel Surya)
5. Kurva I-V modul
6. Watt tertinggi,  $I_m$ ,  $V_m$ , dan FF modul
7. No seri *PV Module* dan Sel Surya (secara terpisah untuk *PV Module* dan Sel Surya)

8. Bulan dan tahun diperolehnya sertifikasi IEC pada kualifikasi *PV Module*
9. Nama penerbitan tes lab dari sertifikasi IEC
10. Informasi yang berhubungan antara *Module* dan Sel Surya berdasar seri ISO 9000.

Jika tidak tersedia pada standar brosur atau spesifikasi lembar, pembuatan berkualitas harus mampu menyediakan informasi berikut :

1. Temperature co-efficient of  $P_{max}$  - NOCT
2. Temperature co-efficient of  $V_{max}$  - Temperature co-efficient of  $I_{sc}$

Kementerian energi baru dan terbarukan ini menyediakan pembaruan ke daftar tanggal produsen modul terakreditasi di India.