



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Energi Matahari (Surya)

Energi Matahari adalah energi yang didapat dengan mengubah energi panas Matahari melalui peralatan tertentu menjadi sumber daya dalam bentuk lain. Energi matahari sangatlah luar biasa karena tidak bersifat polutif, tak dapat habis, dapat dipercaya dan tidak membeli (Gunadarma.ac.id). Energi matahari dapat dikonversikan langsung menjadi bentuk energi lain dengan tiga proses, yaitu : *Proses Helochemical, Proses Helioelectrical, dan proses Heliothermal* (Anynomous,1997).

- Proses Helochemical. Reaksi helochemical yang utama adalah proses foto sintesa. Proses ini adalah sumber dari semua bahan bakar fosil.
- Proses Helioelectrical. Reaksi Helioelectrical yang utama adalah produksi listrik oleh sel – sel surya
- Proses Heliothermal adalah penyerapan radiasi matahari dan pengkonversian energi ini menjadi energi termal.

2.2 Radiasi matahari

Radiasi matahari merupakan proses penyinaran matahari sampai ke permukaan bumi dengan intensitas yang berbeda-beda sesuai dengan keadaan sekitarnya. Radiasi matahari yang diterima dipermukaan bumi lebih rendah dari konstanta matahari. Radiasi matahari yang terjadi di atmosfer mengalami berbagai penyimpangan, sehingga kekuatannya menuju bumi lebih kecil. Bagian dari radiasi matahari yang dihisap (absorpsi) akan berubah sama sekali sifatnya. Perubahan dari sudut jatuhnya sinar dapat menyebabkan perubahan dari panjangnya jalan yang dilalui oleh sinar tersebut (Nasir, A, 1990). Penerimaan radiasi surya di permukaan bumi sangat bervariasi menurut tempat dan waktu.



Menurut tempat khususnya disebabkan oleh perbedaan letak lintang serta keadaan atmosfer terutama awan (Handoko, 1994).

Lama penyinaran akan berpengaruh terhadap aktivitas makhluk hidup misalnya pada manusia dan hewan. Juga akan berpengaruh pada metabolisme yang berlangsung pada tubuh makhluk hidup, misalnya pada tumbuhan. Penyinaran yang lebih lama akan memberi kesempatan yang lebih besar bagi tumbuhan tersebut untuk memanfaatkannya melalui proses fotosintesis (Benyamin Lakitan, 1994). Pergeseran garis edar matahari menyebabkan perubahan panjang hari (lama penyinaran) yang diterima pada lokasi-lokasi di permukaan bumi. Perubahan panjang hari tidak begitu besar pada daerah tropis yang dekat dengan garis ekuator. Semakin jauh letak tempat dari garis ekuator maka fluktuasi lama penyinaran akan semakin besar (Benyamin Lakitan, 1994).

2.3 Teori Dasar Semikonduktor

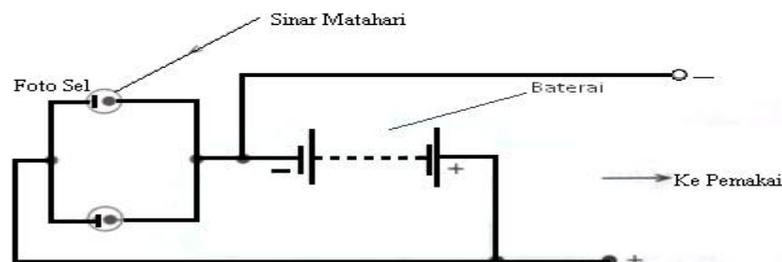
Semikonduktor adalah sebuah bahan dengan konduktivitas listrik yang berada di antara insulator (isolator) dan konduktor. Semikonduktor disebut juga sebagai bahan setengah penghantar listrik. Suatu semikonduktor bersifat sebagai insulator jika tidak diberi arus listrik dengan cara dan besaran arus tertentu, namun pada temperatur, arus tertentu, tatacara tertentu dan persyaratan kerja semikonduktor berfungsi sebagai konduktor, misal sebagai penguat arus, penguat tegangan dan penguat daya.

Dalam semikonduktor ada muatan yang bisa bergerak sehingga bisa didapatkan arus listrik karena gerakan muatan itu. Dalam logam setiap atom kira-kira mempunyai satu elektron yang bisa bergerak. Itu berarti jumlah muatan yang bisa bergerak sama dengan jumlah atom yang ada. Konduktivitas yang dihasilkan oleh kelebihan elektron disebut konduktivitas kelebihan atau disebut semikonduktor n. Sedangkan Konduktivitas yang dihasilkan oleh lowong disebut konduktivitas kekurangan elektron atau konduktivitas p atau semikonduktor p. (Richard Blocher :2014 :87)



2.4 Teori Dasar PLTS (Pembangkit Listrik Tenaga Surya)

Pada prinsipnya, pembangkit listrik tenaga surya terdiri dari sekelompok foto sel yang mengubah sinar matahari menjadi gaya gerak listrik (ggl) untuk mengisi baterai aki (B). Dari baterai aki (B) energi listrik dialirkan ke pemakai. Pada waktu banyak sinar matahari (siang hari), baterai aki (B) diisi oleh foto sel. Tetapi pada saat malam hari, foto sel tidak menghasilkan energi listrik, maka energi listrik diambil dari baterai aki (B) tersebut. (Djiteng Marsudi: 2005; 132)



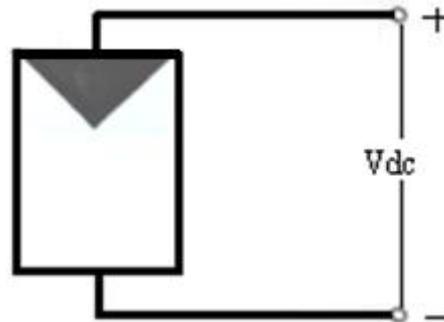
Gambar 2.1 Foto sel dan baterai aki (B) sebagai sumber energi listrik

Sumber :Ir. Djiteng Marsudi

Sel surya atau sel fotovoltaik berasal dari bahasa Inggris “*Photo Voltaic*”. Kata Photovoltaic berasal dari dua kata “*photo*” berasal dari kata Yunani yakni “*phos*” yang berarti cahaya, dan kata “*volt*” adalah nama satuan pengukuran arus listrik yang diambil dari nama penemu Alessandro Volta (1745-1827), sebagai pionir dalam mempelajari teknologi kelistrikan. Jadi secara harfiah “*photovoltaic*” mempunyai arti Cahaya-Listrik, dan itu dilakukan Sel Surya yaitu merubah energi cahaya menjadi listrik, penemunya Edmond Becquerel dan kawan-kawan pada abad 18. (Iman Permana: 2008; 30)

Photovoltaic adalah bahan semikonduktor yang berfungsi untuk membangkitkan tenaga listrik. Jadi pada photovoltaic ini, bahan semikonduktor yang diproses sedemikian rupa sehingga apabila bahan tersebut terkena sinar matahari atau cahaya, maka akan mengeluarkan tegangan listrik arus searah (DC). Photovoltaic ini juga sejenis dengan dioda yang tersusun atas PN junction. (Zuhal: 1998; 194)

Simbol yang diberikan untuk photovoltaic ini dapat dilihat pada gambar dibawah:



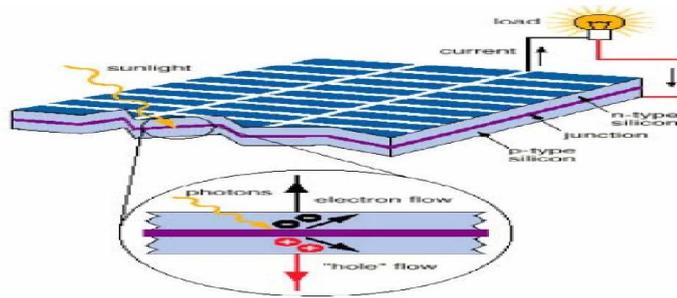
Gambar 2.2 Simbol Yang Diberikan Untuk Photovoltaic.

Sumber: Zuhul

2.4.1 Proses Konversi Energi pada Sel Surya

Apabila suatu bahan semikonduktor seperti misalnya bahan silikon diletakkan dibawah penyinaran matahari, maka bahan silikon tersebut akan melepaskan sejumlah kecil listrik yang biasa disebut *efek fotolistrik*. Yang dimaksud efek fotolistrik adalah pelepasan elektron dari permukaan metal yang disebabkan penumbukan cahaya. Efek ini merupakan proses dasar fisis dari fotovoltaiik merubah energi cahaya menjadi listrik. Cahaya matahari terdiri dari partikel-partikel yang disebut sebagai "*photons*" yang mempunyai sejumlah energi yang besarnya tergantung dari panjang gelombang pada "*solar spectrum*". Pada saat photon menumbuk sel surya maka cahaya tersebut akan dipantulkan atau diserap atau mungkin hanya diteruskan.

Cahaya yang diserap membangkitkan listrik. Pada saat terjadinya tumbukan energi yang dikandung oleh photon ditransfer pada elektron yang terdapat pada atom sel surya yang merupakan bahan semikonduktor. Dengan energi yang didapat dari photon, elektron melepaskan diri dari ikatan normal bahan semikonduktor dan menjadi arus listrik yang mengalir dalam rangkaian listrik yang ada. Dengan melepaskan dari ikatannya, elektron tersebut menyebabkan terbentuknya lubang atau "*hole*". (Iman Permana: 2008 :31).



Gambar 2.3 Konversi cahaya matahari menjadi listrik

Sumber : <http://mayaerna.blogspot.com>

Secara sederhana solar cell terdiri dari persambungan bahan semikonduktor bertipe p dan n (p-n junction semiconductor) yang jika tertimpa sinar matahari maka akan terjadi aliran electron, aliran electron inilah yang disebut sebagai aliran arus listrik. Bagian utama perubah energi sinar matahari menjadi listrik adalah absorber (penyerap), meskipun demikian, masing-masing lapisan juga sangat berpengaruh terhadap efisiensi dari solar cell. Sinar matahari terdiri dari bermacam-macam jenis gelombang elektromagnetik yang secara spectrum. Oleh karena itu absorber disini diharapkan dapat menyerap sebanyak mungkin solar radiation yang berasal dari cahaya matahari. Kerja sel surya sendiri sebenarnya identik dengan piranti semikonduktor dioda. Ketika cahaya bersentuhan dengan sel surya dan diserap oleh bahan semikonduktor, terjadi pelepasan elektron. Apabila elektron tersebut bisa menempuh perjalanan menuju bahan semi- konduktor pada lapisan yang berbeda, terjadi perubahan sigma gaya-gaya pada bahan. Gaya tolakan antar bahan semikonduktor, menyebabkan aliran medan listrik. Dan menyebabkan elektron dapat disalurkan ke saluran awal dan akhir untuk digunakan pada perabot listrik. Sedangkan konversi dari tenaga surya menjadi tenaga listrik melalui sel surya akan melalui tahapan proses sebagai berikut :

1. Absorpsi cahaya dalam semi konduktor.
2. Membangkitkan serta memisahkan muatan positif dan negatif bebas ke daerah-daerah lain dari sel surya, untuk membangkitkan tegangan dalam sel surya.



3. Elektron-elektron bebas terbentuk dari milion photon atau benturan atom pada lapisan penghubung yang menyebabkan terjadinya aliran listrik.
4. Elektron-elektron dilepaskan dan mengalir keseluruh lapisan-lapisan kimia yang ada dipermukaan cell, sehingga menghasilkan arus listrik kecil yang dihimpun dalam konduktor logam. Adapun radiasi cahaya matahari itu sendiri harus diubah menjadi energy listrik. Dibawah ini adalah satuan konversi :

$$1 \text{ Lux} = 1 \text{ Lumen/m}^2$$

$$1 \text{ Lumen} = 0,0015 \text{ Watt}$$

Dari satuan konversi diatas maka dapat dicari berapa energi surya yang diterima oleh panel surya dari sinar matahari. Apabila digunakan banyak sel-sel surya, maka akan dapat dihasilkan arus listrik yang besar. Aliran listrik yang didapat dari panel/deretan PV akan berupa DC (direct current), kemudian disimpan ke accu, dan sebagian listrik DC dirubah ke AC (alternating current) dengan alat inverter untuk dipakai dengan alat-alat di rumah tangga. Kemudian sebagian DC dapat dipakai langsung untuk sebagian alat dengan spesifikasi DC. Bahan fotovoltaiik yang baik harus mempunyai koefisiensi absorpsi tinggi untuk celah energi pada suhu rendah.

2.4.2 Prinsip Kerja Sel Surya

Sel surya terbuat dari rangkaian dua atau lebih lapisan semikonduktor yang didukung oleh piranti lain untuk meningkatkan efisiensinya. Berdasarkan konfigurasi semikonduktor yang menyusunnya, secara umum sel surya digolongkan menjadi dua macam yaitu:

a. Tipe p-n junction

Pada tipe ini sel surya terdiri dari dua lapisan semikonduktor yaitu tipe n (sebagai window) dan tipe p (sebagai adsorber). Tebal lapisan window berkisar antara 0,6-1 μm sedangkan tebal lapisan adsorber berkisar antara 1-2 μm . Semikonduktor sendiri ialah suatu material yang dapat bersifat



sebagai konduktor dan insulator pada kondisi tertentu. Contoh semikonduktor yang paling terkenal ialah silikon. Silikon memiliki empat elektron valensi sehingga agar dapat stabil silikon harus melepas empat elektron terluarnya atau justru menangkap empat elektron. Jadi pada silikon murni, material memiliki kecenderungan yang sama untuk menangkap atau melepas elektron. Semikonduktor semacam ini disebut semikonduktor intrinsik (tipe 1). Jika silikon dicampurkan atau didoping dengan unsur lain maka sifat semikonduktor silikon akan berubah. Semikonduktor yang dibuat dengan menambahkan unsur lain ini disebut semikonduktor ekstrinsik. Jika silikon dicampurkan dengan Boron (golongan III) yang memiliki tiga elektron valensi, elektron valensi dari material menjadi tujuh sehingga agar dapat stabil material cenderung untuk menerima satu elektron alih-alih melepaskan ketujuh elektron valensinya. Karena kekurangan elektron agar dapat stabil inilah (kelebihan hole), semikonduktor jenis ini disebut semikonduktor tipe p. Sebaliknya jika silikon digabungkan dengan fosfor (golongan V) yang memiliki lima elektron valensi, material cenderung untuk melepaskan satu elektron agar dapat stabil. Karena kelebihan elektron semikonduktor semacam ini disebut semikonduktor tipe n. Elektron dalam suatu atom memiliki energi yang berbeda-beda tergantung pada tingkat atau posisi suatu elektron dalam atom. Semakin tinggi energinya, semakin jauh orbitalnya dari inti. Elektron pada tingkat energi yang paling tinggi yang masih terikat oleh inti disebut elektron valensi. Pada jenis material tertentu, sebagian elektronnya tidak terikat pada satu inti atom melainkan bergerak dari satu atom ke atom lain, bergerak dari ujung material ke ujung lainnya.

Jika pita energi yang memuat elektron valensi terisi penuh, maka pita ini disebut pita valensi dan pita tertinggi selanjutnya disebut pita konduksi. Jika pita yang memuat elektron valensi tidak terisi penuh, pita ini disebut pita konduksi. Selisih energi terendah dari pita konduksi dengan energi tertinggi dari pita valensi disebut *band gap* (BG). Pada logam, pita konduksi dan pita valensinya saling tumpang-tindih (*overlapping*, $BG \approx 0$) sehingga elektron valensinya bebas bergerak dari satu inti ke inti lain namun



tetap berada pada material. Elektron yang bebas mengalir inilah yang menyebabkan arus listrik dapat mengalir dan material dengan sifat seperti ini disebut konduktor. Dalam kasus ini, elektron dianggap sebagai “gas elektron” yang disumbangkan oleh atom-atom dalam zat. Sifat konduktifitas zat bergantung dari band gapnya, semakin tinggi band gap-nya semakin sulit suatu elektron bisa mencapai pita konduksi sehingga sulit untuk menghantarkan panas dan listrik. Untuk semikonduktor band gapnya berkisar antara 1-6 eV.

b. Prinsip Kerja Sel Surya p-n junction

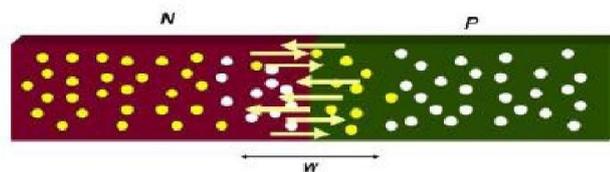
Prinsip kerja sel surya didasarkan pada penggabungan semikonduktor tipe-p yang kelebihan hole dan semikonduktor tipe-n yang kelebihan elektron.

1. Semikonduktor tipe-p dan tipe-n sebelum disambungkan



Gambar 2.4 Semikonduktor Tipe-P dan Tipe-N

2. Ketika kedua jenis semikonduktor ini disambung, terjadi perpindahan elektron dari semikonduktor tipe-n menuju semikonduktor tipe-p dan perpindahan hole dari semikonduktor tipe-p ke semikonduktor tipe-n pada daerah sambungan. Perpindahan elektron maupun hole ini hanya sampai pada jarak tertentu dari batas sambungan awal.

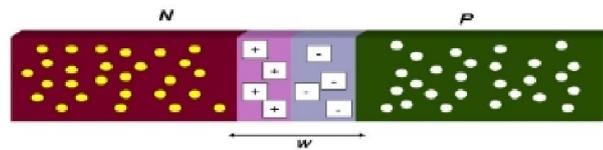


Gambar 2.5 : Semikonduktor Tipe-P dan Tipe-N Disambung

3. Elektron dari semikonduktor n yang bersatu dengan hole pada semikonduktor p yang mengakibatkan jumlah hole pada

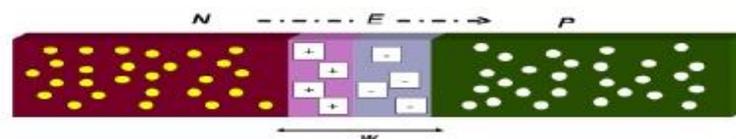


semikonduktor p akan berkurang. Daerah ini akhirnya berubah menjadi lebih bermuatan positif. Pada saat yang sama, Hole dari semikonduktor p bersatu dengan elektron yang ada pada semikonduktor n yang mengakibatkan jumlah elektron di daerah ini berkurang. Daerah ini akhirnya lebih bermuatan positif.



Gambar 2.6 : Semikonduktor Tipe-P dan Tipe-N Bersatu

4. Daerah negatif dan positif ini disebut dengan daerah deplesi (depletion region) ditandai dengan huruf W. Pada daerah deplesi ini terdapat banyak keadaan terisi (hole+elektron). Baik elektron maupun hole yang ada pada daerah deplesi disebut dengan pembawa muatan minoritas (minority charge carriers) karena keberadaannya di jenis semikonduktor yang berbeda.
5. Perbedaan muatan pada daerah deplesi ini menimbulkan medan listrik internal E dari daerah positif ke daerah negatif pada daerah deplesi yang disebut arus drift. Dengan memperhatikan perpindahan elektron pada arus drift dari arah semikonduktor p ke arah semikonduktor n , sebaliknya perpindahan hole dari arah semikonduktor tipe- n ke arah semikonduktor tipe- p yang mana berlawanan dengan arus yang muncul pada point 2.



Gambar 2.7 : Perbedaan Muatan Semikonduktor Tipe-P dan Tipe-N

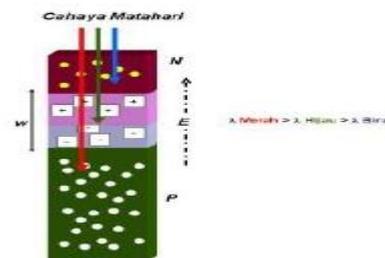
6. Adanya medan listrik mengakibatkan sambungan p-n berada pada titik setimbang, yakni saat di mana jumlah hole yang berpindah dari semikonduktor p ke n dikompensasi dengan jumlah hole yang tertarik kembali ke arah semikonduktor p akibat medan listrik E . Begitu pula



dengan jumlah elektron yang berpindah dari semikonduktor n ke p , dikompensasi dengan mengalirnya kembali elektron ke semikonduktor n akibat tarikan medan listrik E . Dengan kata lain, medan listrik E mencegah seluruh elektron dan hole berpindah dari semikonduktor yang satu ke semikonduktor yang lain. Dengan demikian dalam keadaan ini tidak ada arus dan tegangan yang timbul.

Jadi jika sel surya tidak menerima energi cahaya, tidak ada arus yang dapat dimanfaatkan. Untuk keperluan sel surya, semikonduktor n berada pada lapisan atas sambungan p yang menghadap ke arah datangnya cahaya matahari, dan dibuat jauh lebih tipis dari semikonduktor p , sehingga cahaya matahari yang jatuh ke permukaan sel surya dapat terus terserap dan masuk ke daerah deplesi dan semikonduktor p .

Pada sambungan $p-n$ inilah proses konversi cahaya matahari menjadi listrik terjadi. Untuk keperluan sel surya, semikonduktor n berada pada lapisan atas sambungan p yang menghadap ke arah datangnya cahaya matahari, dan dibuat jauh lebih tipis dari semikonduktor p , sehingga cahaya matahari yang jatuh ke permukaan sel surya dapat terus terserap dan masuk ke daerah deplesi dan semikonduktor p .

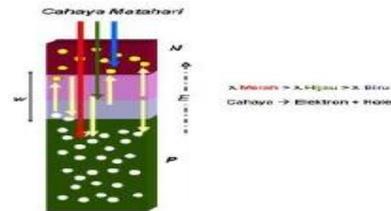


Gambar 2.8 : Konversi Cahaya Pada Semikonduktor P-N

Ketika sambungan semikonduktor ini terkena cahaya matahari, maka elektron mendapat energi dari cahaya matahari untuk melepaskan dirinya dari semikonduktor n , daerah deplesi maupun semikonduktor. Terlepasnya elektron ini meninggalkan hole pada daerah yang ditinggalkan oleh elektron yang disebut dengan fotogenerasi elektron-hole



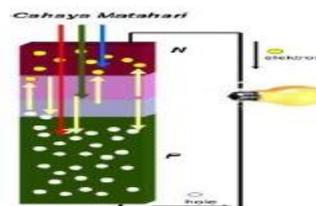
(*electron-hole photogeneration*) yakni, terbentuknya pasangan elektron dan hole akibat cahaya matahari.



Gambar 2.9 Terbentuknya Pasangan Elektron Dan Hole Akibat Cahaya Matahari

Cahaya matahari dengan panjang gelombang yang berbeda, membuat fotogenerasi pada sambungan pn berada pada bagian sambungan pn yang berbeda pula. Spektrum merah dari cahaya matahari yang memiliki panjang gelombang lebih panjang, mampu menembus daerah deplesi hingga terserap di semikonduktor p yang akhirnya menghasilkan proses fotogenerasi di sana. Spektrum biru dengan panjang gelombang yang jauh lebih pendek hanya terserap di daerah semikonduktor n .

Selanjutnya, dikarenakan pada sambungan pn terdapat medan listrik E , elektron hasil fotogenerasi tertarik ke arah semikonduktor n , begitu pula dengan hole yang tertarik ke arah semikonduktor p . Apabila rangkaian kabel dihubungkan ke dua bagian semikonduktor, maka elektron akan mengalir melalui kabel. Jika sebuah lampu kecil dihubungkan ke kabel, lampu tersebut menyala dikarenakan mendapat arus listrik, dimana arus listrik ini timbul akibat pergerakan elektron.



Gambar 2.10 : Arus Listrik Akibat Pergerakan Elektron Yang Ditandai Lampu Menyala

(<http://paradoks77.blogspot.com/2011/11/semikonduktor-sel-surya-terbuat-dari.html>) 06 april 2014



2.4.3. Jenis-jenis Sel Surya

Beragam-macam teknologi telah diteliti oleh para ahli di dunia untuk merancang dan membuat sel fotovoltaik yang lebih baik, murah, dan efisien diantaranya adalah :

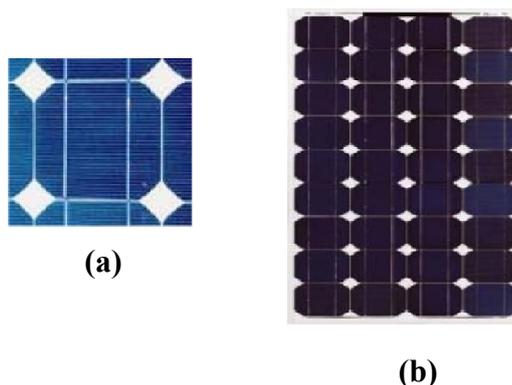
A. Generasi Pertama Kristal (Single Crystal)

Konfigurasi normal untuk Sel Fotovoltaik terdiri *p-n Junction* Mono Kristal Silikon material mempunyai kemurnian yang tinggi yaitu 99,999%. Ditumbuhkan dengan sistem yang paling terkenal Metode Czochralski dapat dilihat di gambar 2.11 hasil berbentuk silinder dengan panjang 12cm, diameter tertentu 2–5 inch, alat pemotong yang terbaru adalah gergaji yang mampu memotong dua sisi sekaligus dengan kapasitas 4000 wafer per-jam. (Iman Permana: 2008 :32)



Gambar 2.11 Metode penumbuhan kristal mono Czochralski

Sumber: <http://Helmiguntoro.blogspot.com>



Gambar 2.12 (a). Sel Surya Single Kristal, (b) Modul Surya Single Kristal

Sumber: <http://energisurya.wordpress.com>

Efisiensi sel surya jenis Single Kristal Silikon mempunyai efisiensi konversi yang cukup tinggi yaitu sekitar 16% sampai dengan 17%.



B. Generasi Kedua Kristal (Polikristal)

Material Mono Kristal harga per kilogram masih mahal, untuk menurunkan harga material, dikembangkan material lain yang disebut Polikristal. Pembuatan wafer dengan material ini menggunakan Metode Casting (gambar 2.13), kemudian dipotong dengan ukuran 40 x 40 cm². Efisiensi modul fotovoltaik polikristal yang komersial mencapai 12% s/d 14%. (Iman Permana: 2008 :33).



Gambar 2.13 Metode Casting Pembuatan Bahan Polikristal

Sumber: <http://Helmiguntoro.blogspot.com>



(a)



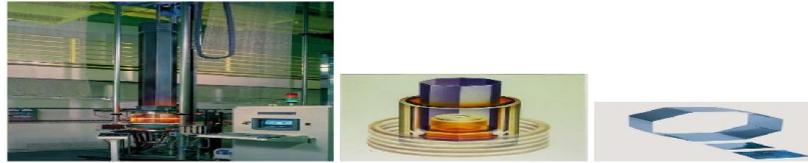
(b)

Gambar 2.14 (a). Sel Surya Polikristal, (b) Modul Surya Polikristal

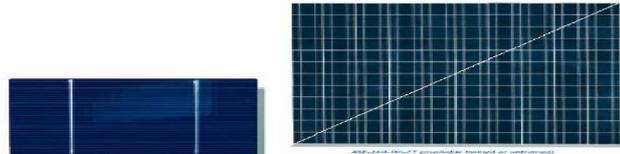
Sumber: <http://energisurya.wordpress.com>

C. Generasi Ketiga, EFG the Edge Defined Film Growth Ribbon

Proses ini menumbuhkan wafer Mono Kristal seperti pita langsung dari cairan silikon dengan menggunakan pita kapiler, dapat menghasilkan dengan lebar 5–10cm. Pada proses ini penumbuhan terjadi 5 m/menit dengan ketebalan 250 – 350 mikrometer, dengan efisiensi 13%. (Iman Permana: 2008 :34)



Gambar 2.15 Proses Pembuatan EFG the Edge Defined Film Growth Ribbon
 Sumber: <http://Helmiguntoro.blogspot.com>



(a)

(b)

Gambar 2.16 (a) Modul Surya
 (b) Sel Surya Jenis Polikristal dengan Metode EFG

Sumber: <http://energisurya.wordpress.com>

D. Generasi Keempat (Thin Film)

Generasi ke-empat Lapisan Tipis atau Thin Film, mempunyai ketebalan sekitar 10mm di atas substrat kaca/steel (baja) atau disebut advanced sel fotovoltaik. Tipe yang paling maju saat ini adalah Amorphous Silicon dengan Heterojunction dengan *stack* atau tandem sel. Efisiensi Sel Amorphous Silicon berkisar 6% sampai dengan 9%. (Iman Permana: 2008 :35)



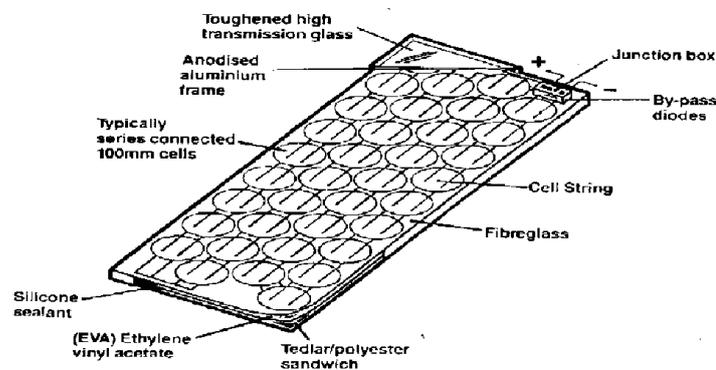
Gambar 2.17 Amorphous Silicon dengan Heterojunction dengan Stack atau Tandem Sel. Sumber: <http://energisurya.wordpress.com>

2.4.4. Hubungan Sel Surya Secara Seri dan Pararel

Pada umumnya modul surya mampu bertahan 20 hingga 25 tahun, khususnya untuk modul mono-crystalline. Modul tipe ini dirancang untuk masa operasi 30 tahun pada saat perancangan dengan acuan kondisi *lab-test*. Sel-sel silikon itu sendiri tidak mengalami kerusakan atau degradasi



bahkan setelah puluhan tahun pemakaian. Namun demikian, output modul akan mengalami penurunan dengan berjalannya waktu. Degradasi ini diakibatkan oleh dua faktor utama: Rusaknya lapisan atas sel (*ethylene vinyl acetate-EVA*) dan lapisan bawah (*polyvinyl fluoride film*) secara perlahan-lahan, serta kerusakan secara alami EVA yang terjadi secara bertahap di antara lapisan gelas dan sel-sel itu sendiri. (Iman Permana: 2008 :37)



Gambar 2.18 Konfigurasi sebuah modul fotovoltaik.

Sel Fotovoltaik yang dihubungkan secara seri dibungkus untuk membentuk sebuah kesatuan mekanik. Kesatuan seperti ini dinamakan sebuah modul fotovoltaik. Modul memberikan perlindungan yang layak terhadap pengaruh-pengaruh pengkaratan, hujan dan lain-lainnya. Modul standar dapat dipergunakan untuk bermacam-macam pemakaian, juga untuk sistem-sistem dengan baterai atau tanpa baterai. Jika suatu aplikasi khusus memerlukan suatu tegangan / arus yang lebih tinggi yang akan dibekali oleh sebuah modul, maka modul dapat digabungkan secara seri, dan membentuk suatu susunan paralel untuk mendapatkan tegangan atau arus yang dibutuhkan. Besar nilai tegangan serta arus pada sistem maksimum power point tracker (MPPT) solar cell tergantung dari karakteristik solar cell tersebut. Besar arus solar cell ditulis dengan persamaan. (Green, A.M.: 1982; 28)

$$I = I_{sc} \left(e^{\frac{k.T}{q}} - 1 \right) \dots\dots\dots(2.1)$$



Dimana : $k.T/q$ = Tegangan thermal = 0.02586 V pada suhu 300 °K

I_{sc} = Arus hubung singkat (A)

I_0 = Arus beban nol (A)

Dan besar tegangan solar cell pada saat hubungan terbuka ditulis dengan persamaan :

$$V_{oc} = \frac{k.T}{q} \cdot \ln \left(\frac{I}{I_0} + 1 \right) \dots\dots\dots(2.2)$$

Total daya yang dibangkitkan dirumuskan :

$$P = V_{oc} \cdot I_{sc} \dots\dots\dots(2.3)$$

Daya maksimum pada solar cell diperoleh ketika :

$$\frac{dP}{dV} = 0$$

Maka dari persamaan (2.3) tersebut diatas diperoleh titik tegangan maksimum (V_m), dan titik arus maksimum (I_m) yang ditulis :

$$\frac{dP}{dV} = 0 = I_{sc} \left(e^{\frac{k.T}{q}} - 1 \right) - I_0 + \left(\frac{I.V}{I_0} \cdot e^{\frac{k.T}{q}} \right) \dots\dots\dots(2.4)$$

Berdasarkan persamaan (4) maka tegangan maksimum ditulis :

$$V_M = V_{oc} - V_t \cdot \ln \left[1 + \frac{V_{oc}}{V_t} \right] \dots\dots\dots(2.5)$$

Dan arus maksimum ditulis :

$$I_M = I - I_0 \left(e^{\frac{V_m}{V_t}} - 1 \right) \dots\dots\dots(2.6)$$

Dan daya maksimum yang di hasilkan dirumuskan :

$$P_m = I_m \times V_M \dots\dots\dots(2.7)$$

Dan efisiensi solar cell dituliskan :

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \dots\dots\dots(2.8)$$

Daya yang dihasilkan modul surya pada titik daya maksimum dinyatakan dalam satuan watt-puncak (Watt Peak (Wp)), dan masih perlu ditambah 20% sehingga diperoleh persamaan :



$$P_T = P_N + (20\% \times P_N) \dots \dots \dots (2.9)$$

Besar daya listrik yang diterima oleh solar cell diperoleh dari perkalian intensitas radiasi yang diterima dengan luas permukaan solar cell tersebut dengan persamaan berikut ini :

$$P_{in} = I_r \times A \dots \dots \dots (2.10)$$

Dimana :

P_{in} = Daya listrik yang diterima (Watt)

I_r = Intensitas cahaya matahari (W/m^2)

A = Luas permukaan solar cell (m^2)

Adapun radiasi cahaya matahari itu sendiri harus diubah menjadi energi listrik. Dibawah ini adalah satuan konversi :

$$1 \text{ Lux} = 1 \text{ Lumen}/m^2$$

$$1 \text{ Lumen} = 0,0015 \text{ Watt}$$

Dari satuan konversi diatas maka dapat dicari berapa energi surya yang diterima oleh panel surya dari sinar matahari. Sedangkan untuk menghitung energi yang dihasilkan atau dibangkitkan oleh panel surya adalah sebagai berikut :

$$E = P \times t \quad \text{Atau} \quad E = (V \cdot I) \times t \dots \dots \dots (2.11)$$

Dimana :

E = Energi listrik yang dihasilkan/dibangkitkan (Joule)

P = Daya yang terpakai oleh solar cell (Watt)

t = Lama pemakaian daya pada solar cell (detik/s)

Cara menentukan jumlah modul dilakukan dengan pendekatan :

$$n = \frac{\sum P}{KPM} \dots \dots \dots (2.12)$$

Dimana :

n = Jumlah modul surya

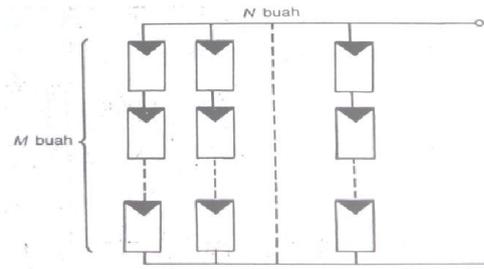
P = Jumlah daya listrik (watt)

KPM = Kapasitas daya modul surya (watt)

Sumber : Zuhail : 19995:195



Pada umumnya, satu unit solar cell hanya mampu menghasilkan daya yang kecil. Daya yang diperbesar dapat dihasilkan dengan menghubungkan-hubungkan beberapa solar cell secara seri dan paralel. Susunan dari beberapa solar cell disebut module dan susunan beberapa module menghasilkan array. Sebagai contoh pada gambar 2.17



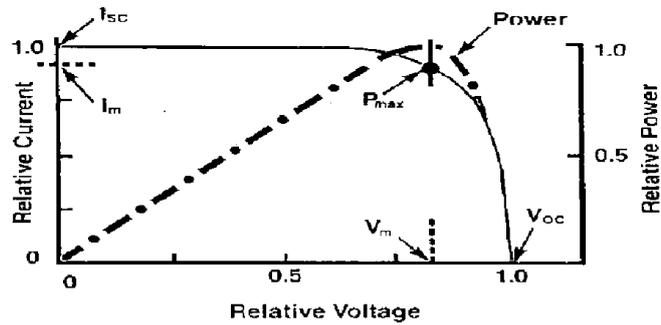
Gambar 2.19 Rangkaian seri-paralel PV

Sumber : Zuhail: 1995; 196

Diperlihatkan hubungan seri-paralel pada photovoltaic N buah photovoltaic dihubungkan paralel dan M buah dihubungkan seri. Anggap tiap cahaya mempunyai $I_{opt} = I_o$ dan $V_{opt} = V_o$ untuk radiasi maksimumnya. Maka dapat dikatakan bahwa module atau array tersebut mempunyai daya puncak. (watt peak) sebesar $M \times N \times I_o \times V_o$ watt. Dengan tegangan output sebesar $M \times V_o$ volt dan arus maksimum sebesar $N \times I_o$ ampere. (Zuhail: 1995; 197).

2.4.5. Karakteristik Modul Fotovoltaik

Sifat-sifat listrik dari modul fotovoltaik biasanya diwakili oleh karakteristik arus tegangannya, yang mana disebut juga kurva I-V (lihat gambar 2.12). Kurva I-V dapat diukur menurut susunan peralatan seperti ditunjukkan dalam gambar Kurva 2.12 menunjukkan arus yang diberikan oleh modul fotovoltaik (I_{mod}), sebagai suatu fungsi dari tegangan modul fotovoltaik (V_{mod}), pada suatu radiasi tertentu. Untuk mendapatkan daya yang maksimum dari suatu photovoltaic, maka beban harus terletak pada titik yang disebut Maximum Power Point(MPP).



Gambar 2.20 Kurva Arus-Tegangan Dari Sebuah Modul Surya

Keterangan :

I_{sc} = arus short circuit

V_{sc} = tegangan short circuit

V_m = Tegangan Maksimum

I_m = Arus Maksimum

P_m = Daya Maksimum

Semakin besar intensitas cahaya matahari secara proposional akan menghasilkan arus yang besar. Seperti gambar berikut, tingkatan cahaya matahari menurun, bentuk dari kurva I-V menunjukkan hal yang sama, tetapi bergerak ke bawah yang mengindikasikan menurunnya arus dan daya.

Jika sebuah modul fotovoltaik dikenai hubung singkat ($V_{mod} = 0$), maka arus hubung singkat (I_{sc}) mengalir. Pada keadaan rangkaian terbuka ($I_{mod} = 0$), maka tegangan modul disebut tegangan terbuka (V_{oc}). Daya yang dihasilkan modul fotovoltaik, adalah sama dengan hasil kali arus dan tegangan yang dihasilkan oleh modul fotovoltaik :

$$P_{max} = V_m \times I_m$$

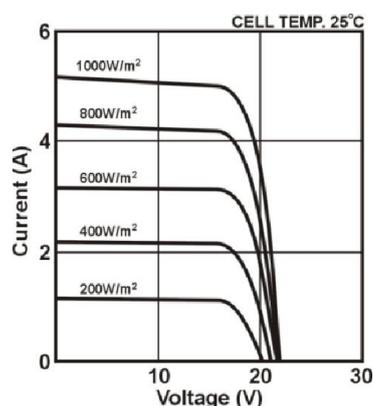
Jika tegangan dari modul ditambah, misalnya dengan menambah tahanan beban dan dimulai dari $V_{mod} = 0$ (pada kondisi hubung singkat), maka daya dari modul bertambah dari nol sampai ke daya maksimum pada suatu tegangan tertentu. Jika tahanannya masih terus ditambah, setelah daya maksimum dicapai, maka daya berkurang menjadi nol pada tegangan terbuka (V_{oc}). Pada nilai dimana modul memberikan daya maksimumnya disebut nilai daya maksimum, dan dikarakteristikan dengan besaran



tegangan nilai daya maksimum (V_{mp}), daya nilai daya maksimum (P_{mp}) dan arus nilai daya maksimum (I_{mp}).

Untuk beban yang konstan, titik MPP tidak dapat dicapai oleh semua radiasi. Hal ini memerlukan suatu rangkaian pengatur yang mampu membawa beban pada titik MPP-nya. Rangkaian ini dikenal sebagai rangkaian pengatur MPP (MPP Regulator Circuit). Tetapi apabila photovoltaic ini digunakan untuk mengisi baterai maka hampir semua titik MPP dapat didekati, yaitu dengan mendesain photovoltaic agar tegangannya sama dengan tegangan baterai. (Zuhal: 1998; 196)

Berikut ini merupakan karakteristik tegangan versus arus yang dipengaruhi oleh radiasi yang berbeda-beda pada photovoltaic.



Gambar 2.21 Karakteristik Photovoltaic

Sumber: Zuhal: 1995; 195

Pada gambar 2.13 diatas dapat dilihat bahwa tegangan open circuit yang terjadi (V_{oc}) konstan, tetapi arusnya berubah-ubah sesuai dengan besarnya radiasi yang mengenainya. (Zuhal: 1995; 195)

2.5. Baterai Charge Regulator (BCR)

Baterai Charge Regulator (BCR) pada dasarnya berfungsi untuk mengatur pengisian (charging) dan pemakaian (discharging) listrik dari dan ke batere, agar tidak overload. Pada saat batere terisi penuh, alat pengatur akan memutus hubungan antara modul photovoltaik dan batere, sedangkan



pada saat batere kosong, alat penagatur akan memutuskan hubungan antara batere dengan beban.

Baterai Charge Regulator (BCR) memiliki karakteristik yaitu :

- a. Penurunan arus pengisian dari modul photovoltaik, yaitu membatasi tegangan agar tidak melampaui tegangan batas atas.
- b. Membatasi DOD (Depth of discharge) dengan pemutus arus otomatis kerangkaian beban, ketika tegangan batere turun dibawah tegangan batas bawah. Kedua pembatasan diatas adalah untuk memperpanjang usia batere.

2.6. Inverter

Inverter yang dimaksud adalah suatu rangkaian yang mampu mengubah tegangan DC menjadi AC. Ada dua jenis inverter yang umum digunakan pada sistem tenaga listrik yaitu:

1. Inverter dengan frekuensi dan tegangan keluar yang konstan CVCF (Constant Voltage Constant frequency).
2. Inverter dengan frekuensi dan tegangan keluaran yang berubah-ubah. Umumnya inverter dengan frekuensi yang berubah-ubah digunakan pada pemakaian khusus seperti pemakaian pada pompa listrik 3 fasa dengan menggunakan sumber tegangan dc. Kerugian cara ini adalah bahwa sistem hanya dapat digunakan pada pemakaian khusus saja, sedangkan keuntungannya adalah kemampuan untuk menggerakkan sistem (beban) dengan sumber yang berubah-ubah seperti misalnya photovoltaic atau solar cell. (Zuhal: 1998; 220)

Sedangkan jenis gelombang yang dihasilkan inverter ada 3 jenis, pemilihan dari ketiga jenis gelombang ini sangat penting dalam menentukan jenis inverter dalam memenuhi kebutuhannya. Ketiga jenis gelombang itu adalah :



a. Square wave (gelombang kotak)

Sesuai dengan namanya gelombang yang dihasilkan berupa kotak-kotak. Saat ini sudah jarang ditemukan karena banyak perlengkapan elektronik tidak dapat bekerja pada jenis gelombang ini.

b. Modified Sine Wave

Modified sine wave inverter merupakan kombinasi antara square wave dan sine wave. Bentuk gelombangnya bila dilihat melalui oscilloscope berbentuk sinus dengan ada garis putus-putus di antara sumbu $y = 0$ dan grafik sinusnya. Perangkat yang menggunakan kumparan masih bias beroperasi dengan modified sine wave inverter, hanya saja kurang maksimal. Modified sine wave aman untuk peralatan listrik, dan dikarenakan gelombang modified sine wave hanya bias untuk peralatan seperti komputer, TV, lampu, blender, tapi tidak bias untuk beban induktif seperti pompa air, air conditioner dan kulkas. Gelombang inverter modified sine wave ini aman untuk peralatan listrik tetapi jika untuk beban induktif seperti pompa air, kulkas dan air conditioner maka membutuhkan tarikan awal sebesar 7 kali walaupun jika pada listrik PLN hanya membutuhkan tarikan awal 2 kali saja.

c. True Sine Wave

Ini adalah jenis gelombang terbaik output power inverter. True Sine Wave setara bahkan lebih baik dari kualitas gelombang listrik rumahan. 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 adalah yang paling mahal diantara yang lainnya karena dialah yang paling mendekati bentuk gelombang asli dari jaringan listrik PLN.

2.7. Akkumulator (Accu)

2.7.1 Pengertian Umum

Istilah akkumulator atau accu (baterai) ini berasal dari istilah asing “Accumulerem” yang mempunyai arti mengumpulkan atau



menyimpan. Dalam garis besarnya akkumulator itu bekerja sebagai berikut :

a. Pengisian

Akkumulator ini diberikan tenaga listrik berasal dari arus searah. Didalam akkumulator, tenaga (energi listrik) ini mengerjakan proses-proses kimia, sehingga dapat dikatakan bahwa :

Tenaga listrik dari luar diubah kembali menjadi tenaga kimia didalam akkumulator dan kemudian disimpan didalamnya.

b. Pengosongan (Pemakaian)

Kalau pada akumulator yang telah terisi dengan tenaga kimia dipasangkan suatu alat yang membutuhkan tenaga listrik maka terjadilah proses kimia didalam akkumulator yang menyebabkan Tenaga kimia didalam akkumulator tadi diubah kembali menjadi enaga listrik yang kemudian mengosongkan akkumulator. Prinsip dasar yang digunakan dalam akkumulator yaitu prinsip polarisasi (mengutup). Polarisasi akan menyebabkan bahan kimia yang berada didalam elektrolit ini akan berubah sifatnya dan susunannya, sehingga bahan-bahan tersebut kemudian dapat membangkitkan potensial galvanis. (F. Suryatmo: 1995; 43)

2.8 Beban Yang Digunakan

a. Lampu LED (*Light Emitting Diode*)

Lampu ini merupakan sirkuit semikonduktor yang memancarkan cahaya ketika dialiri listrik. Sifatnya berbeda dengan filamen yang harus dipijarkan (dibakar) atau lampu TL yang merupakan pijaran partikel. Lampu LED memancarkan cahaya lewat aliran listrik yang relatif tidak menghasilkan banyak panas.

b. Lampu Pijar

Mempunyai nama lain *incandescent*, akan menyala bila arus listrik mengalir melalui kawat yang berada didalamnya. Lampu jenis ini sangat mudah menyalakannya, asal tersambung dengan arus listrik akan langsung



menyala, harganya pun sangat terjangkau. Namun, lampu jenis ini mempunyai kelemahan pada tingginya energi panas yang dikeluarkan sehingga energi cahaya ditampilkkan akan sedikit dan boros. Dan dalam percobaan ini lampu yang akan digunakan sebesar 10 watt.

c. Lampu TL

Lampu TL atau *fluorescent*, biasa dikenal di masyarakat sebagai neon tabung karena memiliki bentuk seperti tabung panjang lurus atau melengkung. Jenis lampu ini dilapisi bahan pada dindingnya, bahan ini akan mengubah sinar ultraviolet yang dihasilkan lampu menjadi cahaya yang bisa dilihat mata. Lampu ini lebih terang dan hemat jika dibandingkan dengan jenis lampu pijar. Dan lampu TL yang akan digunakan sebesar 10 watt.

Dengan jumlah watt (energi listrik) yang lebih kecil, lampu TL atau neon lebih murah digunakan daripada membeli lampu pijar biasa, dan saat ini jenis lampu TL juga bervariasi baik bentuk, fitting pemasangan, serta warna cahayanya ada yang putih, kuning, dan warna lainnya. Dengan keseimbangan antara harga dan lama pemakaian, lampu TL banyak digunakan untuk penerangan toko, mall, serta tempat-tempat lain yang membutuhkan cahaya terang dan lebih hemat energi.

