



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengertian Listrik Tenaga Surya

Pembangkit listrik tenaga surya adalah pembangkit listrik yang mengubah energi surya menjadi energi listrik. Pembangkitan listrik bisa dilakukan dengan dua cara, yaitu secara langsung menggunakan fotovoltaik dan secara tidak langsung dengan pemusatan energi surya. Fotovoltaik mengubah secara langsung energi cahaya menjadi listrik menggunakan efek fotoelektrik.

Pemusatan energi surya menggunakan sistem lensa atau cermin dikombinasikan dengan sistem pelacak untuk memfokuskan energi matahari ke satu titik untuk menggerakkan mesin kalor.

a. Pemusatan Energi Surya

Sistem pemusatan energi surya (*concentrated solar power, CSP*) menggunakan lensa atau cermin dan sistem pelacak untuk memfokuskan energi matahari dari luasan area tertentu ke satu titik. Panas yang terkonsentrasikan lalu digunakan sebagai sumber panas untuk pembangkitan listrik biasa yang memanfaatkan panas untuk menggerakkan generator. Sistem cermin parabola, lensa reflektor Fresnel, dan menara surya adalah teknologi yang paling banyak digunakan. Fluida kerja yang dipanaskan bisa digunakan untuk menggerakkan generator (turbin uap konvensional hingga mesin *stirling*) atau menjadi media penyimpan panas.

b. Fotovoltaik

Sel surya atau sel fotovoltaik adalah alat yang mengubah energi cahaya menjadi energi listrik menggunakan efek fotoelektrik. Dibuat pertama kali pada tahun 1880 oleh Charles Fritts (Perlin, 1999). Pembangkit listrik tenaga surya tipe fotovoltaik adalah pembangkit listrik yang menggunakan perbedaan tegangan akibat efek fotoelektrik untuk menghasilkan listrik. Solar panel terdiri dari 3 lapisan, lapisan panel P di bagian atas, lapisan pembatas di tengah, dan lapisan panel N di bagian bawah. Efek fotoelektrik adalah dimana sinar matahari



menyebabkan elektron di lapisan panel P terlepas, sehingga hal ini menyebabkan proton mengalir ke lapisan panel N di bagian bawah dan perpindahan arus proton ini adalah arus listrik⁸.

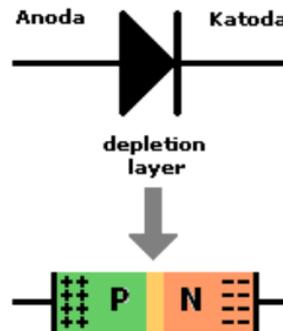
2.2 Panel Surya

Panel surya adalah seperangkat alat dengan bahan semikonduktor yang dapat mengkonversi energi sinar matahari yang diterimanya menjadi energi listrik. Panel surya disebut juga *photovoltaic* dan terbuat dari bahan semikonduktor yang pada umumnya adalah *silicon*. Panel surya dimanfaatkan sebagai alat untuk mengubah cahaya matahari yang mengandung energi foton untuk diubah menjadi energi listrik. Panel surya bekerja berdasarkan prinsip *photovoltaic*, yaitu dengan cara mengubah energi foton dari radiasi cahaya matahari yang diterimanya menjadi energi listrik. Silikon terdiri atas 2 lapisan didalamnya, yaitu lapisan n(-) dan lapisan p(+). Lapisan n adalah lapisan yang berada di atas permukaan panel surya dan berhubungan langsung dengan cahaya matahari, sedangkan lapisan p berada dibawah lapisan n yang dipisahkan oleh sebuah gerbang (*junction*). Gerbang ini akan terbuka saat ada cahaya matahari menyinari permukaan panel surya. Terbukanya gerbang antar lapisan mengakibatkan elektron yang dihasilkan mengalir. Intensitas cahaya matahari sangatlah mempengaruhi terbukanya gerbang antar lapisan, semakin lebar gerbang antar lapisan terbuka karena intensitas cahaya matahari yang besar, maka semakin besar pula arus yang mengalir.

2.2.1 P-N Junction

Junction (persambungan) adalah daerah tempat tipe-P dan tipe-N disambung. Dioda *junction* adalah nama lain untuk kristal P-N. Pada gambar 1 di bawah ini ditunjukkan simbol dioda dan dioda *junction* tanpa bias tegangan. Sisi P mempunyai banyak *hole* dan sisi N banyak elektron pita konduksi.

⁸Wahyono Suwanti, dkk. *Analisis Pengaruh Intensitas Matahari, Suhu Permukaan & Sudut Pengaruh terhadap Kinerja Panel Surya*, (2018), *Jurnal Teknik Energi*, 14(3). hal. 79



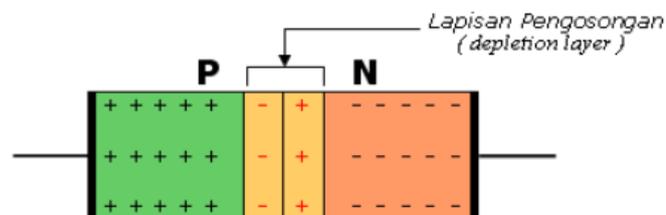
Gambar 2.1 Simbol Dioda dan *Junction* Dioda

(Sumber : <https://m-edukasi.kemdikbud.go.id>)

Gambar di atas menunjukkan sambungan PN dengan sedikit porsi kecil yang disebut lapisan kosong (*depletion layer*). Di daerah tersebut terdapat keseimbangan antara *hole* dan elektron. Pada sisi P banyak terbentuk *hole-hole* yang siap menerima elektron, sedangkan di sisi N banyak terdapat elektron-elektron yang siap untuk bebas.

Elektron pada sisi N cenderung berdifusi ke segala arah, beberapa elektron berdifusi melewati *junction*. Setiap kali elektron berdifusi melalui *junction* akan menciptakan sepasang ion. Tanda positif berwarna merah menandakan ion positif dan tanda negatif berwarna merah menandakan ion negatif.

Tiap pasang ion positif dan ion negatif pada gambar disebut *dipole*. Penciptaan *dipole* berarti satu elektron pita konduksi dan satu *hole* telah dikeluarkan dari sirkulasi. Jika terbentuk sejumlah *dipole*, daerah dekat *junction* dikosongkan dari muatan-muatan, daerah kosong ini disebut dengan daerah /lapisan pengosongan yang lebarnya 0,5 mm.



Gambar 2.2 *Dipole* pada PN *Junction*

(Sumber : <https://m-edukasi.kemdikbud.go.id>)



2.2.2 Tegangan *Barrier* (Rintangan)

Karena jenis-p berdekatan dengan jenis-n di *junction*, beberapa elektron bebas dari sisi-n tertarik melintasi *junction* untuk mengisi *hole* pada sisi-p. Kedua pembawa muatan (elektron dan *hole*) dikatakan *diffuse* (berdifusi) melintasi *junction*, yaitu mengalir dari bagian dengan konsentrasi pembawa muatan yang tinggi ke bagian dengan konsentrasi yang rendah. Elektron-elektron bebas yang melintasi *junction* menimbulkan ion-ion negatif pada sisi-p dengan jalan memberikan pada atom-atom satu elektron lebih banyak dari pada jumlah total protonnya. Elektron-elektron juga meninggalkan ion-ion positif (atom-atom dengan elektron satu lebih sedikit dari pada jumlah proton) pada sisi-n.

Sebelum pembawa muatan itu berdifusi melintasi *junction* baik bahan jenis-n maupun bahan jenis-p keduanya sama-sama netral secara elektrik. Tapi, begitu ion-ion negatif terbentuk pada *junction* sisi-p, sisi-p menjadi berpotensi negatif. Dengan cara yang sama, ion-ion positif terbentuk pada sisi-n yang menjadikan sisi-n berpotensi positif.

Potensial negatif pada sisi-p cenderung menolak elektron-elektron selanjutnya yang berusaha melintasi *junction* dari sisi-n, potensial positif pada sisi-n cenderung menolak setiap *hole* selanjutnya yang mau melintas dari sisi-p. Jadi, difusi pendahuluan pembawa muatan menimbulkan yang dinamakan *barrier* potensial pada *junction*.

Barrier potensial ini negatif pada sisi-p dan positif pada sisi-n, cukup besar untuk menghindari setiap gerakan elektron atau *hole* selanjutnya melintasi *junction*. Pemindahan pembawa-pembawa muatan dan pembentukan resultan *barrier* potensial terbentuk ketika proses manufaktur.

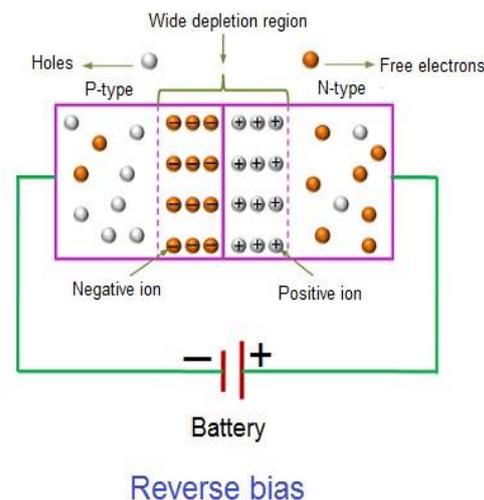
Potensial *barrier* pada *junction* berlawanan dengan arah aliran elektron dari sisi-n dan aliran *hole* dari sisi-p. Karena elektron-elektron itu pembawa muatan mayoritas dalam bahan jenis-n and *hole* adalah pembawa muatan mayoritas bahan jenis-p ternyata potensial *barrier* itu berlawanan dengan dengan arus pembawa muatan mayoritas. Juga, elektron-elektron bebas yang ditimbulkan oleh energi termal pada sisi-p tertarik melintasi potensial *barrier* positif ke sisi-n karena elektron-elektron itu bermuatan negatif. Demikian juga, *hole* yang ditimbulkan



energi termal pada sisi-n tertarik ke sisi-p melintasi potensial *barrier* negatif di *junction*. Elektron-elektron pada sisi-p dan *hole* pada sisi-n itu pembawa muatan minoritas. Karena itu, potensial *barrier* membantu aliran pembawa muatan minoritas melintasi *junction*.

Pembangkitan tegangan *barrier* bergantung pada suhu *junction*, suhu yang lebih tinggi menciptakan banyak pasangan elektron dan *hole*, sehingga aliran pembawa minoritas melewati *junction* bertambah. Pada suhu 25 °C potensial *barrier* pada dioda germanium (Ge) = 0,3 V dan dioda silikon (Si) = 0,7 V. Potensial *barrier* tersebut berkurang 2,5 mV untuk setiap kenaikan 1 °C.

2.2.2.1 Reverse Biased Junction



Gambar 2.3 *Reverse Bias Junction*

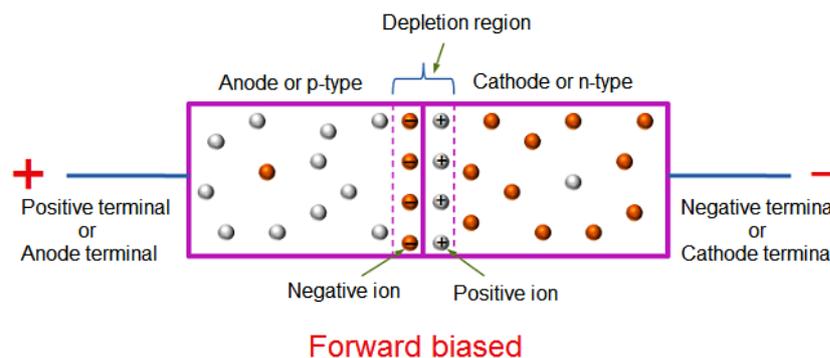
Pada Gambar diatas sambungan *reverse* bias terminal negatif sumber/*battery* dihubungkan dengan bahan tipe-P dan terminal positif dihubungkan dengan bahan tipe-N. Pada kondisi ini hole dan elektron bergerak menuju ke ujung-ujung kristal (menjauhi *junction*), dimana elektron akan meninggalkan ion positif dan *hole* akan meninggalkan ion negatif oleh sebab itu lapisan pengosongan akan bertambah lebar. Makin besar bias makin lebar pula lapisan pengosongan, oleh karena itu arus listrik sulit/tidak bisa mengalir dari sisi P ke N. Bias ini disebut bias balik (*reverse*).



Jika tegangan bias eksternal positif dipasang pada sisi-n dan negatif dipasang pada sisi-p dari *pn-junction*, elektron-elektron dari sisi-n ditarik ke terminal positif tegangan bias dan hole dari sisi-p ditarik ke terminal negatif tegangan bias.

Dengan demikian depletion region menjadi semakin lebar, potensial *barrier* semakin besar mengikuti kenaikan besarnya tegangan terpasang. Dengan potensial *barrier* semakin besar, maka tidak ada kemungkinan arus pembawa muatan mayoritas mengalir melintasi *junction*. Dalam hal ini, *junction* itu dikatakan menjadi *reverse biased*.

2.2.2.2 Forward Biased Junction



Gambar 2.4 *Forward Bias Junction*

Gambar diatas menunjukkan sambungan PN. Terminal negatif sumber/*battery* dihubungkan dengan bahan tipe-N dan terminal positif dihubungkan dengan bahan tipe-P, atau tegangan potensial sisi P lebih besar dari sisi N sehingga elektron dari sisi N akan bergerak untuk mengisi *hole* di sisi P. Kalau elektron mengisi *hole* disisi P, akan terbentuk hole pada sisi N karena ditinggal elektron. Ini disebut aliran hole dari P menuju N. Kalau menggunakan terminologi arus listrik, dikatakan terjadi arus listrik dari sisi P ke sisi N. Bias ini disebut bias maju (*forward*) .

Hole pada sisi-p, sebagai partikel bermuatan positif ditolak oleh terminal positif tegangan bias dan *hole* bergerak menuju *junction*. Demikian pula, elektron-elektron pada sisi-n ditolak oleh terminal negatif tegangan bias dan bergerak

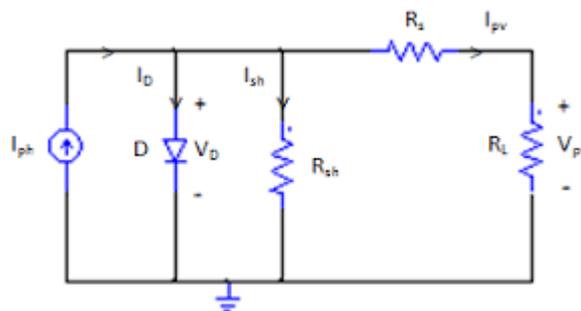


menuju *junction*. Akibatnya, lebar *depletion region* berkurang dan potensial *barrier* juga berkurang.

Jika tegangan bias yang dipasang itu dinaikkan mulai dari nol, potensial *barrier* menjadi semakin kecil secara progresif sampai potensial *barrier* itu lenyap dengan efektif dan pembawa muatan dengan mudah melintasi *junction*. Elektron-elektron dari sisi-n ditarik melintasi ke terminal positif dari tegangan bias dan *hole-hole* bergerak dari sisi-p ditarik melintasi ke terminal negatif dari tegangan bias. Jadi, timbul arus pembawa muatan mayoritas, *junction* disebut menjadi *forward biased*¹⁰.

2.3 Rangkaian Ekuivalen Panel Surya

Pada umumnya panel surya memiliki rangkaian ekuivalen seperti ditunjukkan pada gambar 2.5 dan pemodelan matematis sangat diperlukan untuk mengetahui bagaimana parameter panel surya yang digunakan.



Gambar 2.5 Rangkain Ekuivalen Panel Surya

Light generated current atau *photocurrent* (I_{ph}) bervariasi secara linear terhadap radiasi matahari dan tergantung pada suhu yang diberikan. 7\] Hambatan R_{sh} dan R_s menunjukkan hambatan intrinsik paralel dan seri dari sel. Prinsip sederhana dari rangkaian ekuivalen sel surya di atas, yaitu:

¹⁰<https://medukasi.kemdikbud.go.id/medukasi/produkfiles/kontenonline/online2007/pembiasantransistor/materi01a.html>



$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{Rsh} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dimana :

- I_{pv} = Arus photovoltaic
- I_{ph} = Photocurrent
- I_D = Arus pada dioda
- I_{Rsh} = Arus hambatan shunt

Arus panel surya (I_{ph}) berbanding lurus dengan besarnya radiasi matahari G dan suhu T^7 .

2.4 Faktor yang Mempengaruhi Kinerja Panel Surya

Kinerja dari suatu panel surya dipengaruhi oleh beberapa faktor. Berikut ini adalah beberapa faktor yang mempengaruhi kinerja dari panel surya:

1. Temperature Lingkungan atau *Ambient Air Temperature*

Sel surya dapat beroperasi secara maksimum jika temperatur sel tetap normal (pada 25°C), kenaikan temperatur lebih tinggi dari temperatur normal pada sel akan menurunkan nilai tegangan (V_{oc}). Setiap kenaikan temperatur Sel surya 1°C (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°C . Temperatur lingkungan sangatlah berpengaruh pada tegangan yang dihasilkan oleh panel surya.

2. Intensitas Cahaya Matahari

Arus yang dihasilkan panel surya sangatlah bergantung pada intensitas cahaya matahari yang mengenai permukaannya. Semakin besar intensitas cahaya matahari, maka semakin besar arus yang dihasilkan.

⁷Nanang Hadi, Sodikin. dkk, *Rancang Bangun Prototipe Emulator Sel Surya Menggunakan Buck Converter Berbasis Arduino*, 2018, Jurnal Rekayasa dan Teknik Elektro, 9(3). hal. 172-173



3. Kondisi Angin

Semakin besar angin yang bertiup disekitar panel maka akan membantu menurunkan suhu permukaan panel surya, sehingga tegangan keluaran dapat terjaga.

4. Kondisi Cuaca

Keadaan cuaca seperti berawan, mendung, berkabut, hingga tingkat kelembapan dan kondisi lainnya akan mempengaruhi tegangan keluaran dari panel surya.

5. Posisi Panel Surya terhadap Matahari

Posisi dimana cahaya matahari tegak lurus terhadap permukaan panel menentukan arus yang dihasilkan, semakin tegak permukaan panel surya terhadap matahari maka semakin maksimal intensitas cahaya yang diserap oleh panel surya, sehingga posisi panel surya sangat tergantung terhadap waktu dari pergerakan posisi matahari dari terbit sampai terbenam.

2.5 Jenis Panel Surya

Jenis panel surya digolongkan berdasarkan teknologi pembuatannya. Secara garis besar panel surya dibagi dalam tiga jenis, yaitu :

1. *Monocrystalline*

Panel surya jenis ini terbuat dari batangan kristal silikon murni yang sangat tipis. Dengan cara pembuatan seperti ini, akan dihasilkan lembaran panel surya yang identik satu sama lain dan berkinerja tinggi. Sehingga menjadi panel surya yang paling efisien dibandingkan jenis panel surya lainnya yaitu sekitar 15% - 20%. Mahalnya harga kristal silikon murni dan teknologi yang digunakan dalam pembuatannya, menyebabkan mahalnya harga jenis panel surya ini dibandingkan jenis panel surya yang lain di pasaran. Kelemahan dari panel surya jenis ini jika disusun membentuk modul akan menyisakan banyak ruangan yang kosong karena panel surya seperti ini umumnya berbentuk segi enam.



2. *Polycrystalline*

Panel surya jenis ini terbuat dari beberapa batang kristal silikon yang dilebur dan kemudian dituangkan dalam cetakan yang berbentuk persegi. Dengan kata lain susunan kristal acak karena dipabrikasi dengan proses pengecoran. Tipe ini memerlukan luas permukaan yang lebih besar dibandingkan dengan jenis monokristal untuk menghasilkan daya listrik yang sama. Kristal silikonnya tidak sempurna pada panel surya *monocrystalline*, sehingga panel surya yang dihasilkan tidak identik satu sama lain dan efisiensinya lebih rendah, yaitu 13% - 16% . Panel surya ini berbentuk persegi panjang, jika disusun membentuk panel surya, akan rapat dan tidak akan ada ruangan kosong, tidak seperti susunan pada panel surya *monocrystalline*. Proses pembuatannya lebih mudah dibanding *monocrystalline* sehingga harganya lebih murah. Jenis ini paling banyak dipakai saat ini.

3. *Thin Film Solar Cell (TFSC)*

Merupakan Panel Surya (dua lapisan) dengan struktur lapisan tipis mikrokristal *silicon* dan amorphous dengan efisiensi modul hingga 8.5% sehingga untuk luas permukaan yang diperlukan per watt daya yang dihasilkan lebih besar daripada monokristal & polykristal. Inovasi terbaru adalah *Thin Film Triple Junction Photovoltaic* (dengan tiga lapisan) dapat berfungsi sangat efisien dalam udara yang sangat berawan dan dapat menghasilkan daya listrik sampai 45% lebih tinggi dari panel jenis lain dengan daya yang ditera setara.

Panel surya jenis ini diproduksi dengan cara menambahkan satu atau beberapa lapisan material sel surya yang tipis ke dalam lapisan dasar. Panel surya jenis ini berbentuk sangat tipis. Jenis ini dikenal juga dengan nama *Thin Film Photovoltaic* (TFPV). Berdasarkan materialnya, panel surya ini digolongkan menjadi 3, yaitu:

a. *Amorphous Silicon* (a-Si)

Panel surya dengan bahan *Amorphous Silicon* ini awalnya banyak diterapkan pada perangkat kalkulator dan jam tangan. Namun seiring dengan perkembangan zaman, penerapannya menjadi semakin luas. Dengan teknik



pembuatannya yang disebut "*stacking*(susun lapis)", dimana beberapa lapis Amorphous Silicon ditumpuk membentuk panel surya dan akan memberikan efisiensi yang lebih baik antara 6% - 8%.

b. *Cadmium Telluride* (CdTe)

Panel surya jenis ini mengandung bahan *Cadmium Telluride* yang memiliki efisiensi lebih tinggi dari panel surya *Amorphous Silicon*, yaitu 9% - 11%.

c. *Copper Indium Gallium Selenide* (CIGS)

CIGS memiliki efisiensi tinggi paling dibandingkan dengan kedua jenis panel surya *thin film* yang lain, yaitu 10% - 12%. Selain itu panel surya jenis ini tidak mengandung bahan berbahaya Cadmium seperti pada sel surya CdTe. Teknologi pembuatan panel surya *thin film* ini masih baru, masih banyak kemungkinan peningkatan di masa mendatang. Harga produksi yang murah serta bentuknya yang tipis, ringan dan fleksibel sehingga dapat dilekatkan pada berbagai bentuk permukaan.



Gambar 2.6 Jenis-jenis Panel Surya

2.6 Prinsip Kerja Sel Surya

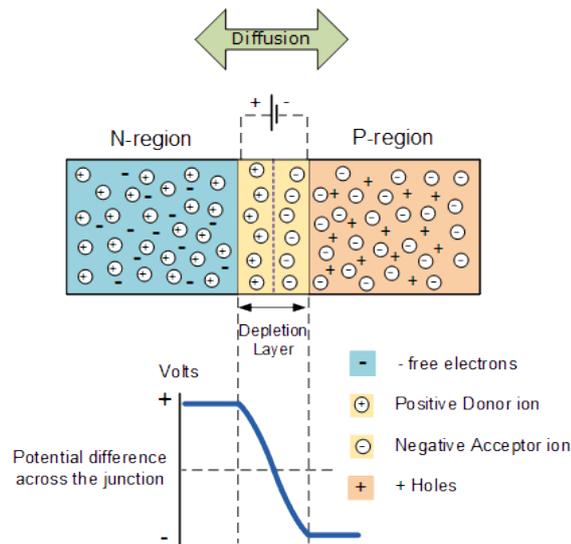
Sel surya bekerja berdasarkan efek fotoelektrik pada material semikonduktor untuk mengubah energi cahaya menjadi energi listrik. Berdasarkan



teori Maxwell tentang radiasi elektromagnetik, cahaya dapat dianggap sebagai spectrum gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang yang berbeda. Pendekatan yang berbeda dijabarkan oleh Einstein bahwa efek fotoelektrik mengindikasikan cahaya merupakan partikel diskrit atau quanta energi. Dimana cahaya pada frekuensi f atau panjang gelombang λ datang dalam bentuk paket-paket foton dengan energi sebesar $E = hf$ adalah konstanta Planck ($6,625 \times 10^{-34}$ Js) dan c adalah kecepatan cahaya (3×10^8 m/s). Sifat cahaya sebagai energi dalam paket-paket foton ini yang diterapkan pada sel surya.

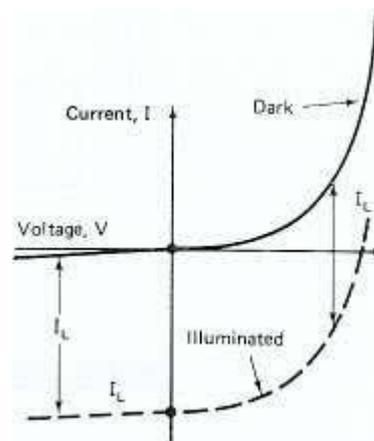
Pada awalnya (1839) sifat fotoelektrik ditemukan pada larutan elektro kimis oleh Alexandre Edmond Becquerel, meskipun tidak ada penjelasan ilmiah untuk peristiwa itu. Tahun 1905, Albert Einstein mengamati efek ini pada lempengan metal. Namun pada perkembangannya, material yang dipakai adalah semikonduktor, terutama silicon. Material ini dapat bersifat insulator pada temperatur rendah, tetapi dapat bersifat sebagai konduktor bila tersedia energi.

Prinsip kerja semikonduktor sebagai sel surya mirip dengan diode sebagai *pn-junction* (Gambar 2.7). *PN-Junction* adalah gabungan/lapisan semikonduktor jenis P dan N yang diperoleh dengan cara doping pada silikon murni. Pada semikonduktor jenis P, terbentuk *hole* (pembawa muatan listrik positif) yang jumlahnya lebih banyak dibandingkan jumlah elektronnya, sehingga *hole* merupakan pembawa muatan mayoritas, sedangkan elektron merupakan pembawa muatan minoritas. Demikian pula sebaliknya dengan semikonduktor jenis N. Bila bagian P dari *pn-junction* dihubungkan dengan kutub positif baterai dan bagian N dihubungkan dengan kutub negatif baterai, maka arus dapat mengalir melewati *pn-junction*. Kondisi ini disebut sebagai panjar maju. Bila hal sebaliknya dilakukan (panjar mundur), yaitu bagian N dari *pn-junction* dihubungkan dengan kutub positif baterai dan bagian P dihubungkan dengan kutub negatif baterai, maka arus tidak dapat mengalir melewati *pn-junction*. Akan tetapi, masih ada arus dalam ukuran sangat kecil yang masih dapat mengalir (dalam ukuran mikroamper) yang disebut dengan arus bocor.



Gambar 2.7 PN-Junction

Ada dua hal yang menarik dalam kondisi panjar mundur tersebut, yaitu efek fotokonduktif dan *photovoltaic*. Fotokonduktif adalah gejala dimana apabila suhu dinaikkan, maka arus bocor pada panjar mundur juga meningkat. Kenaikan suhu yang dapat dianggap sebagai penambahan energi dapat juga diganti dengan cahaya sebagai salah satu bentuk energi. Penyerapan energi cahaya pada kondisi panjar mundur sehingga menghasilkan arus listrik pada *pn-junction* ini disebut dengan efek *photovoltaic*. Penjelasan secara grafik dapat dilihat pada Gambar 2.8. Jadi, sel surya pada dasarnya adalah sebuah fotodiode yang dirancang dengan mengacu pada efek *photovoltaic* sedemikian rupa, sehingga dapat mengubah energi cahaya seefisien mungkin menjadi energy listrik.



Gambar 2.8 Karakteristik Dioda pada Kondisi Gelap dan Teriluminasi

2.7 Karakteristik Panel Surya

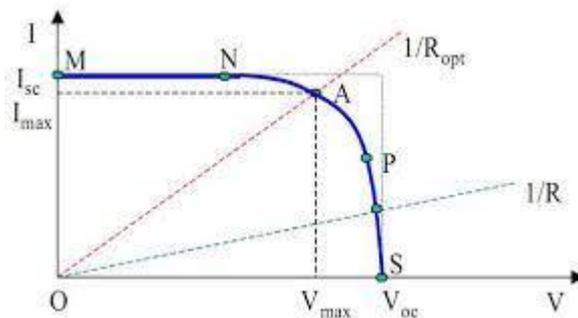
Parameter sel surya yang paling berpengaruh pada kurva daya, yaitu arus hubung singkat dan tegangan hubung terbuka untuk parameter internal, sedangkan parameter eksternalnya meliputi suhu dan *irradiance*. Daya maksimum dan efisiensi turut dimasukkan dalam pembahasan karena merupakan parameter yang umum digunakan untuk membandingkan sel surya.

Sifat-sifat listrik dari modul surya biasanya diwakili oleh karakteristik arus tegangannya, yang mana disebut juga kurva I-V (lihat gambar 2.9). Cahaya mengakibatkan kurva I-V diode turun dari kuadran pertama ke kuadran empat. Jika sebuah modul surya dihubung singkat ($V_{\text{modul}} = 0$), maka arus hubung singkat (I_{sc}) mengalir. Pada keadaan rangkaian terbuka ($I_{\text{modul}} = 0$), maka tegangan modul disebut tegangan terbuka (V_{oc}). Daya yang dihasilkan modul surya, adalah sama dengan hasil kali arus dan tegangan yang dihasilkan oleh modul surya.

$$P = V \times I \dots\dots\dots(2.4)$$

Dimana :

- P = Daya keluaran modul (Watt)
- V = Tegangan kerja modul (Volt)
- I = Arus kerja modul (Ampere)



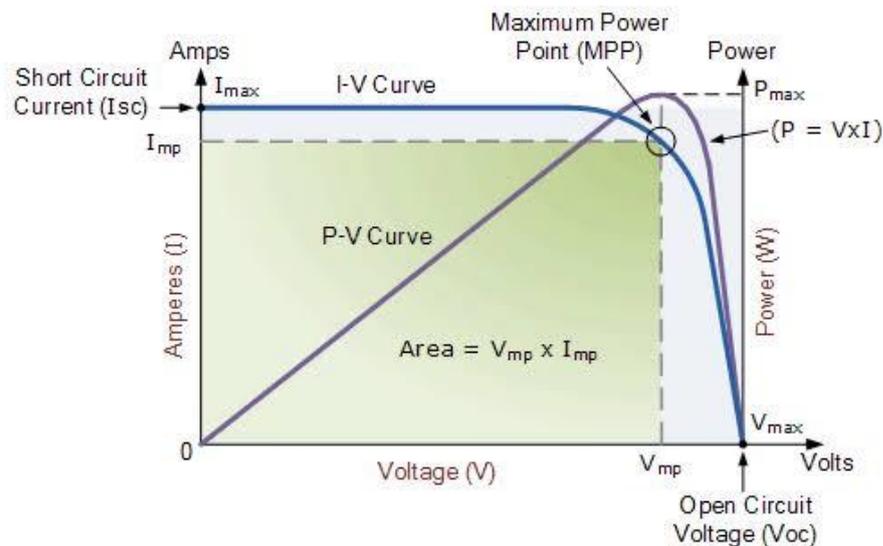
Gambar 2.9 Kurva Karakteristik Arus dan Tegangan I-V



Sumbu horizontal adalah tegangan, sumbu vertikal adalah arus. Kebanyakan kurva I-V diberikan dalam Standar Test Conditions (STC) 1000 W/m² radiasi (atau disebut satu matahari puncak/ one peak sun hour) dan 25° C /77° F panel surya. Sebagai informasi, STC mewakili kondisi optimal dimana dalam keadaan lingkungan laboratorium. Kurva I-V terdiri dari 3 hal yang penting:

1. Maximum Power Point (MPP)

Pada kurva I-V, *Maximum Power Point* adalah titik operasi dimana daya keluaran maksimum yang dihasilkan oleh panel surya saat kondisi maksimal. Dengan kata lain, V_{mp} dan I_{mp} dapat diukur pada saat panel surya diberi beban pada suhu 25° C dan radiasi 1000 W/m². Pada kurva saat tegangan 17.5 volt adalah V_{mp} , dan I_{mp} adalah 2,86 ampere. Jumlah watt pada batas maksimum ditentukan dengan mengalikan V_{mp} dan I_{mp} , maksimum jumlah watt pada STC adalah 50.05 watt. Daya keluaran berkurang sebagaimana tegangan menurun. Daya keluaran dari kebanyakan panel surya menurun sebagaimana tegangan meningkat melebihi titik dari *maximum power point*.



Gambar 2.10 *Maximum Power Point*



2. *Open Circuit Voltage* (V_{oc})

Open Circuit Voltage (V_{oc}), adalah tegangan maksimum dari sel surya dan ini terjadi pada saat arus sel sama dengan nol. Pada saat kondisi rangkaian terbuka, yaitu kapasitas tegangan maksimum yang dapat dicapai pada saat tidak adanya arus, $V_{OC} = 0$.

Dari persamaan tersebut terlihat bahwa nilai V_{oc} bergantung secara logaritmik terhadap rasio I_L / I_0 . Ini berarti pada temperatur konstan, V_{oc} berskala logaritmik terhadap I_L dan karena I_L bergantung linear terhadap *irradiance*, maka V_{oc} berskala logaritmik juga terhadap *irradiance*. Rumusan tersebut menyimpulkan bahwa *irradiance* lebih berpengaruh terhadap I_L daripada V_{oc} .

3. *Short Circuit Current* (I_{sc})

Short Circuit Current (I_{sc}), adalah arus yang mengalir pada saat tegangan sel surya sama dengan nol. Maksimum keluaran arus dari panel surya pada saat kondisi rangkaian terbuka, di peroleh dari sel surya pada kondisi tidak ada resistansi (R), $V = 0$. Daya pada kondisi saat I_{sc} adalah 0 watt. *Short circuit current* dapat diukur saat kondisi rangkaian sedang dihubung singkat.

Pada kondisi ideal tanpa rugi daya, I_{SC} sama dengan I_L . I_{SC} bergantung linear terhadap *irradiance* dan dipengaruhi beberapa hal lain, yaitu luas area sel, spektrum cahaya dan parameter optik lain. Pengujian pada *Standard Test Condition* (STC), sel surya komersial memiliki I_{SC} yang bervariasi antara 28 mA /cm² sampai 35 mA /cm².

4. Faktor Pengisian atau *Fill Factor* (FF)

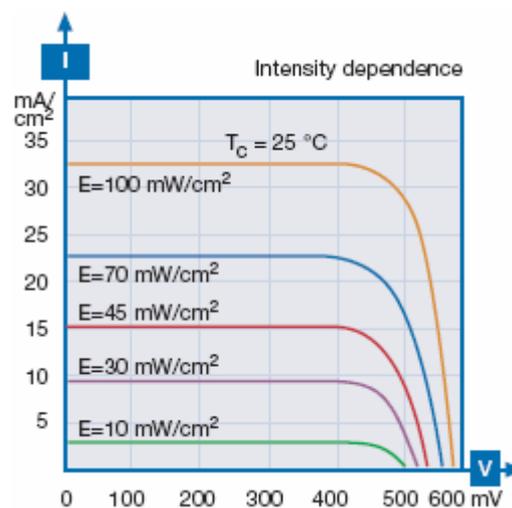
Faktor Pengisian atau *Fill Factor* (FF) merupakan harga yang mendekati konstanta suatu sel surya tertentu. Jika nilai FF lebih tinggi dari 0.7, maka sel surya tersebut lebih baik. Faktor pengisi adalah ukuran kualitas dari sel surya dapat diketahui dengan membandingkan daya maksimum teoritis dan daya output pada tegangan rangkaian terbuka dan hubungan pendek. Faktor pengisi yaitu parameter yang menyatakan seberapa besar $I_{sc} \times V_{oc}$ dari daya maksimum $V_m \times I_m$ yang dihasilkan sel surya.



2.8 Pengaruh *Irradiance* atau Intensitas Cahaya Matahari terhadap Sel Surya

Radiasi matahari yang diterima bumi terdistribusi pada beberapa *range* panjang gelombang, mulai dari 300 nm sampai dengan 4 mikron. Sebagian radiasi mengalami refleksi di atmosfer (*diffuse radiation*) dan sisanya dapat sampai ke permukaan bumi (*direct radiation*). Kedua radiasi ini yang dipakai untuk mengukur besaran radiasi yang diterima sel surya. Besaran – besaran penting untuk mengukurnya adalah :

- *Spectral irradiance* I_λ : Daya yang diterima oleh satu unit area dalam bentuk diferensial panjang gelombang $d\lambda$, satuan : $W/m^2 \mu m$.
- *Irradiance* : Integral dari *spectral irradiance* untuk keseluruhan panjang gelombang, satuan W/m^2 .
- Radiasi : Integral waktu dari *irradiance* untuk jangka waktu tertentu. Oleh sebab itu, satuannya sama dengan satuan energi, yaitu J/m^2 -hari, J/m^2 -bulan atau J / m^2 -tahun.



Gambar 2.11 Karakteristik Kurva I-V terhadap Perubahan *Irradiance*

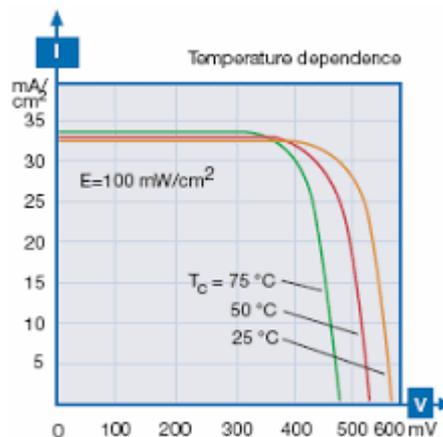
Dilihat dari Gambar 2.11, keluaran daya berbanding lurus dengan *irradiance*. I_{SC} lebih terpengaruh oleh perubahan *irradiance* daripada V_{OC} . Hal ini sesuai dengan penjelasan cahaya sebagai paket-paket foton.



Pada saat *irradiance* tinggi, yaitu pada saat jumlah foton banyak, arus yang dihasilkan juga besar. Demikian pula sebaliknya, sehingga arus yang dihasilkan berbanding lurus terhadap jumlah foton.

2.9 Pengaruh Suhu terhadap Sel Surya

Irradiance bukanlah satu-satunya parameter eksternal yang memiliki pengaruh penting pada kurva I-V, ada juga pengaruh suhu. Suhu memiliki peranan penting untuk memprediksi karakteristik I-V. Komponen semikonduktor seperti diode sensitif terhadap perubahan suhu, begitu pula dengan sel surya. Pada Gambar 2.12 terlihat bahwa suhu berpengaruh banyak pada V_{OC} daripada terhadap I_{SC} , berkebalikan dengan pengaruh *irradiance*. Kenaikan suhu mengurangi V_{OC} sel surya. Hal ini disebabkan peningkatan suhu menurunkan *band gap* semikonduktor³.



Gambar 2.12 Karakteristik Kurva I-V terhadap Perubahan Suhu

Pada saat suhu pada panel surya tinggi terjadi penurunan pada panel surya mencapai 20° C. Efisiensi listrik modul pada panel surya dapat didapatkan dengan rumus :

³Diputra, Wibeng, *Simulator Algoritma*, 2008, Skripsi. Tidak Diterbitkan. Fakultas Teknik. Universitas Indonesia. Depok, hal. 6-11



$$\beta_{ref} = \frac{1}{T_o - T_{ref}} \dots\dots\dots (2.9)$$

Keterangan:

T_o = Suhu Tertinggi pada Panel Surya .

T_{ref} = Suhu Referensi Panel Surya.

β_{ref} = Koefisiensi Suhu.

$$\eta_c = \eta_{Tref} [1 - \beta_{ref} (T_c - T_{ref})] \dots\dots\dots (2.10)$$

Keterangan :

η_c = Efisiensi Listrik Modul Panel Surya.

η_{Tref} = Efisiensi Listrik Modul Suhu referensi.

β_{ref} = Koefisiensi Suhu.

T_{ref} = Suhu Referensi.

T_c = Suhu yang diukur

Jumlah η_{Tref} dan β_{ref} biasanya diberikan oleh pabrikan dari panel surya¹.

¹G.N. Tiwari & Swapnil Dubey. *Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications*, (RSCPublishing, 2010), hal. 81

Tabel 2.1 Nilai untuk $\eta_c = \eta_{Tref} [1 - \beta_{ref} (T_c - T_{ref})]$ ¹

T_{ref} (°C)	η_{Tref}	β_{ref}	Comments	References
25	0.15	0.0041	Mono-Si	Evans and Florschuetz ¹⁰
28	0.117 (average) (0.104-0.124)	0.0038 (average) (0.0032-0.0046)	Average of Sandia and commercial cells	OTA ¹¹⁷
25	0.11	0.003	Mono-Si	Truncellito and Sattolo ¹⁸
25	0.13	0.0041	PV/T system	Merriens ¹⁹
20	0.10	0.004	PV/T system	Barra and Coiante ²⁰
25	0.10	0.0041	PV/T system	Prakash ²¹
20	0.125	0.004	PV/T system	Garg and Agarwal ¹²
25		0.0026	a-Si	Hegey ²²
25	0.13	0.004	Mono-Si	Yamawaki <i>et al.</i> ¹²³
25	0.11	0.004	Poly-Si	RETScreen ¹²⁴
25	0.05	0.0011	a-Si	
25	0.178	0.00375	PV/T system	Nagano <i>et al.</i> ¹²⁵
25	0.12	0.0045	Mono-Si	Chow ⁶⁰
25	0.097	0.0045	PV/T system	Zondag <i>et al.</i> ¹⁰
25	0.09	0.0045	PV/T system	Tiwari and Sodha ⁷⁰
25	0.12	0.0045	PV/T system	Tiwari and Sodha ¹³⁶
25	0.12	0.0045	PV/T system	Assoua <i>et al.</i> ⁹⁵
25	0.127	0.0063	PV/T system	Tonui and Tripanagnostopoulos ¹²⁷
25	0.127 unglazed 0.117 glazed	0.006	PV/T system	Tonui and Tripanagnostopoulos ¹²⁸
25		0.0054	PV/T system	Othman <i>et al.</i> ¹²⁹

2.10 Efisiensi Sel Surya

Perbandingan performansi antara satu modul surya dengan modul surya lainnya umumnya dilihat dari efisiensinya. Banyaknya energi matahari dalam bentuk foton yang diserap sel surya menentukan efisiensinya. Efisiensi modul

¹Ibid, hal. 83



surya didefinisikan sebagai perbandingan daya keluaran dengan daya masukan. Daya masukan dihitung sebagai *irradiance* yang diterima oleh permukaan sel surya. Nilai efisiensi ini selalu dihitung pada kondisi standar (*irradiance* = 1000 W/m², AM 1,5 dan temperatur 25⁰ C). Modul surya berbahan *crystalline* saat ini memiliki efisiensi 14-16 %. Pengaruh bahan adalah dominan dalam hal ini. Contohnya sel surya berbahan *polymer/ organic* ($\eta = 4-5 \%$), *amorphous silicon* ($\eta = 6 \%$), *multijunction* ($\eta = 30 \%$)³.

³Diputra, Wibeng, Op.Cit, hal. 13-14