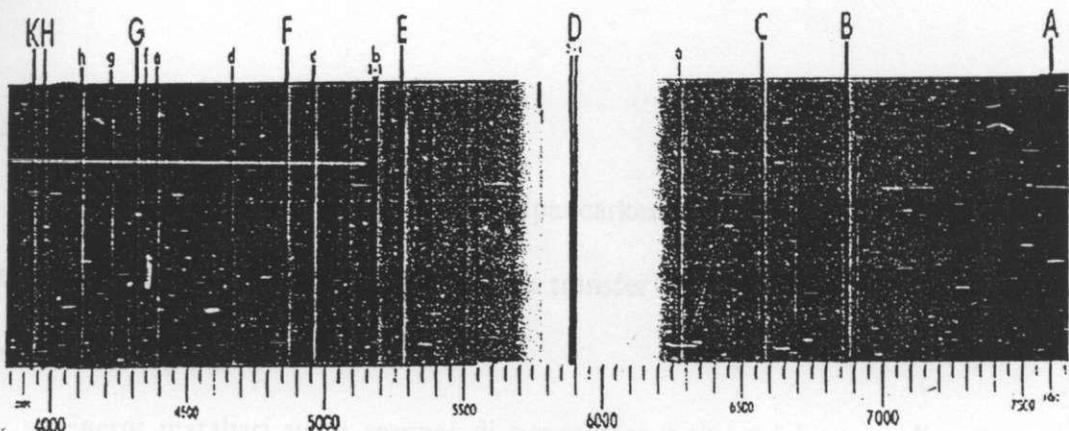


## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Spektrum Energi Matahari

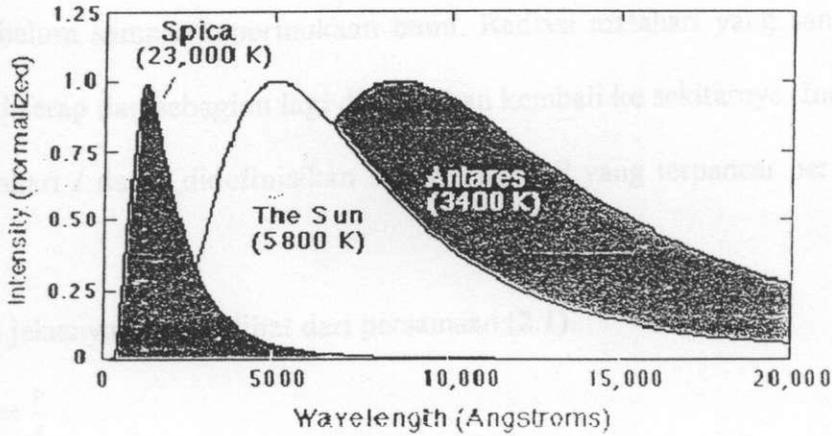
Di dalam fisika dan optika, garis-garis Fraunhofer adalah sekumpulan garis spektrum yang dinamakan berdasarkan fisikawan Jerman Joseph von Fraunhofer (1787-1826). Garis-garis tersebut berasal dari penampakan garis-garis gelap dalam spektrum optik Matahari. Pada 1814, Fraunhofer secara mandiri menemukan kembali garis-garis tersebut, memulai sebuah studi sistematis dan melakukan pengukuran seksama terhadap panjang gelombang garis-garis ini. Secara keseluruhan, dia memetakan lebih dari 570 garis, dan menandai fitur-fitur utama dengan huruf A hingga K, dan garis-garis yang lebih lemah dengan huruf lainnya (No Name, 2007).



Gambar 2.1. Garis-garis Fraunhofer dalam Spektrum Matahari

Lebih jauh, Kirchoff dan Bunsen menemukan bahwa suatu elemen kimia berhubungan dengan seperangkat garis-garis tersebut. Kirchoff dan Bunsen kemudian menyimpulkan bahwa garis-garis gelap dalam spektrum matahari

disebabkan oleh serapan oleh elemen-elemen kimia yang berada di lapisan teratas matahari. Beberapa dari garis yang teramati juga merupakan serapan oleh molekul-molekul oksigen di atmosfer Bumi.



Gambar 2.2. Matahari pada panjang gelombang lain

Matahari memancarkan cahaya terutama di dalam spektrum yang kelihatan, tetapi matahari juga memancarkan cahaya dalam panjang gelombang yang lain. Sebagai ilustrasi terlihat pada gambar 2.2. di atas.

## 2.2. Sumber Energi Matahari

Energi yang dihasilkan matahari dipancarkan ke permukaan bumi dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Selama transfer energi ke permukaan bumi terjadi proses radiasi dan konveksi.

Energi matahari yang sampai di permukaan bumi tidak sama di setiap tempat dan disetiap saat. Hal ini disebabkan oleh perubahan jarak bumi dengan matahari serta adanya penyusutan atmosferik yaitu pengurangan energi matahari yang terjadi dalam perjalanan melalui atmosfer bumi. Energi matahari cukup besar, tetapi energi yang sampai ke permukaan bumi jauh lebih kecil dari energi

sumbernya (Krelth, 1986). Radiasi matahari yang mampu mencapai permukaan bumi adalah radiasi termal dengan panjang gelombang berkisar antara 0,30–2,50 $\mu\text{m}$  (Jansen, 1995).

Radiasi matahari juga mengalami penyerapan atau absorpsi di dalam atmosfer sebelum sampai ke permukaan bumi. Radiasi matahari yang sampai ke bumi akan diserap dan sebagian lagi dipantulkan kembali ke sekitarnya. Intensitas radiasi matahari  $I$  dapat didefinisikan sebagai daya  $P$  yang terpancar per satuan luas  $A$ .

Untuk lebih jelasnya dapat dilihat dari persamaan (2.1).

$$I = \frac{P}{A} \quad (2.1)$$

Intensitas radiasi matahari yang dipancarkan ke permukaan bumi besarnya adalah 1000  $\text{W}/\text{m}^2$  (Shrotriya et al, 2006). Dari energi yang diserap inilah yang disimpan oleh massa bumi, laut dan bentuk mekanik. Intensitas inilah yang digunakan sebagai sumber dari energi sel surya.

### 2.3. Perpindahan Energi Radiasi

Salah satu perpindahan energi adalah secara radiasi. Perpindahan energi radiasi yang dipancarkan oleh permukaan matahari  $E_s$  sama dengan hasil perkalian konstanta Stefan Boltzmann  $\sigma$ , temperatur permukaan absolut pangkat empat  $T_s^4$ , dan luas permukaan  $A$  (Duffie, 1995):

$$E_s = e\sigma AT_s^4 \quad (2.2)$$

Radiasi matahari adalah pancaran energi yang berasal dari proses termonuklir yang terjadi di matahari. Perpindahan energi radiasi matahari berbentuk sinar dan gelombang elektromagnetik.

Radiasi matahari mempunyai spektrum warna yang terdiri dari berbagai panjang gelombang. Pembagian spektrum warna dari radiasi matahari yang sampai permukaan bumi dapat di lihat pada tabel (2.1).

Tabel 2.1. Pembagian spektrum radiasi matahari

Spektrum	Panjang gelombang ( $\mu\text{m}$ )	Konstanta matahari ( $\text{W}/\text{m}^2$ )
Ultra violet	0.0 – 0.38	95
Sinar tampak	0.38 - 0.78	640
Infra merah	> 0.78	818

Dalam rambatannya menuju permukaan bumi, radiasi matahari akan mengalami berbagai peristiwa. Peristiwa tersebut diantaranya adalah hamburan, penyerapan dan pemantulan yang disebabkan oleh partikel-partikel yang berada di atmosfer. Jadi walaupun energi matahari ini cukup besar akan tetapi yang sampai ke permukaan bumi sudah jauh lebih kecil. Cahaya radiasi matahari yang sampai ke permukaan bumi yang paling besar berada dalam orde panjang gelombang 0,38 sampai dengan 0,78  $\mu\text{m}$  yaitu spektrum radiasi cahaya tampak.

#### 2.4. Semikonduktor

Bahan semikonduktor adalah suatu bahan yang konduktivitasnya berada antara isolator dan logam. Semikonduktor pada suhu nol mutlak berfungsi sebagai isolator dan pada suhu tinggi berfungsi sebagai penghantar (logam). Pada suhu kamar beberapa elektron pada bahan semikonduktor yang terletak pada pita valensi akan tereksitasi menuju pita konduksi menjadi elektron bebas. Daerah pada pita valensi yang ditinggalkan oleh elektron yang tereksitasi akan membentuk lubang yang bermuatan positif. Lubang-lubang ini disebut hole. Hole

dapat dianggap sebagai muatan positif yang bergerak lincah mengantarkan arus listrik. Bahan semikonduktor memiliki sifat-sifat berikut (Rio, 1999) :

- a. Hambatan jenis bahan semikonduktor antara  $10^{-6}$ - $10^4 \Omega\text{m}$ . Semikonduktor biasanya bersifat sebagai isolator pada suhu mendekati  $0^\circ\text{C}$  dan sebagai konduktor pada suhu kamar untuk jenis semikonduktor intrinsik. Pada suhu  $0^\circ\text{C}$  semua elektron dalam bahan semikonduktor terikat secara kovalen. Pada suhu kamar, suatu elektron yang tereksitasi secara termal akan menjadi elektron bebas.
- b. Hambatan jenisnya turun dengan cepat bila, terjadi kenaikan suhu.

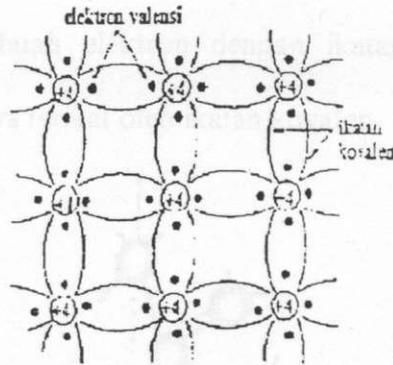
Semikonduktor dapat dibedakan menjadi 2 jenis yaitu semikonduktor intrinsik dan semikonduktor ekstrinsik.

Semikonduktor intrinsik adalah bahan semikonduktor murni yang dicampur atau dikotori dengan atom lain. Pada suhu  $0\text{ K}$ , semikonduktor intrinsik sebagai isolator karena memiliki pita konduksi yang kosong. Sebaliknya, ketika dipanaskan elektron mendapat energi. Energi tersebut terbentuk hole pada pita valensi akibat berpindahannya elektron ke pita konduksi.

Semikonduktor ekstrinsik adalah semikonduktor murni yang diberi tambahan ekstra elektron bebas yang berasal dari atom lain. Proses penambahan atom lain pada semikonduktor murni disebut pengotoran (doping). Pengotoran (doping) adalah proses penyisipan sedikit atom lain ke dalam atom-atom semikonduktor intrinsik misalnya 1 atom lain untuk 1 juta sampai 100 juta atom intrinsik. Adapun tujuan pengotoran adalah untuk meningkatkan konduktivitas bahan semikonduktor.

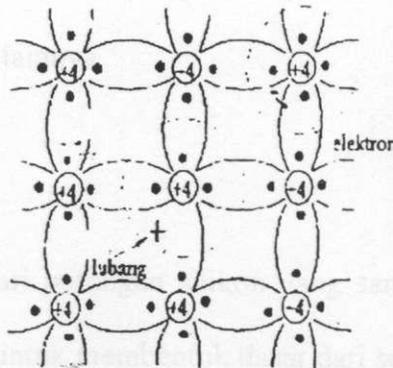
### 2.4.1. Ikatan Atom pada Semikonduktor Silikon

Atom-atom semikonduktor silikon termasuk dalam kelompok IV pada susunan berkala. Tiap-tiap atom silikon mempunyai empat buah elektron valensi seperti tampak pada gambar 2.3. Tiap atom silikon terikat dengan empat buah atom silikon terikat dengan empat buah atom silikon lainnya, membentuk ikatan kovalen.



Gambar 2.3. Ikatan kovalen silikon dalam dua dimensi

Pada suhu amat rendah yaitu mendekati suhu  $0^{\circ}\text{C}$ , semua elektron terikat pada atom. Pada suhu kamar, banyak elektron valensi yang terlepas dari ikatan kovalen oleh karena terjadinya getaran atom. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.4.

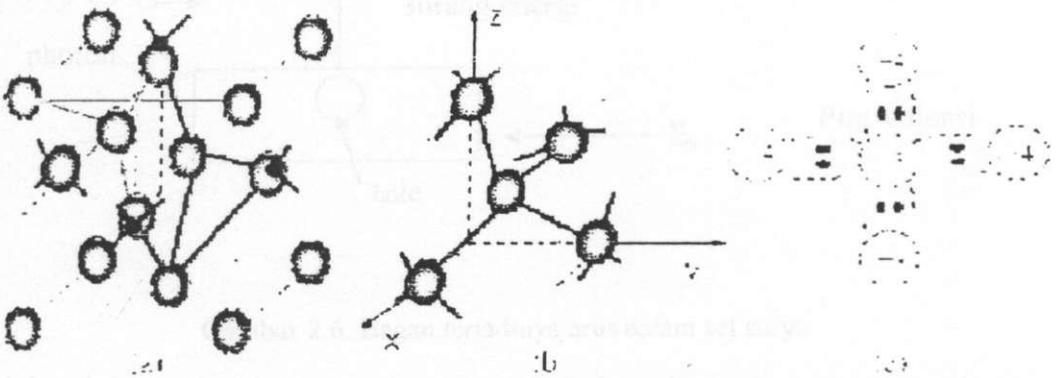


Gambar 2.4. Struktur kristal silikon memperlihatkan adanya sebuah ikatan kovalen yang terputus

Makin tinggi suhu makin banyak pula elektron bebas, elektron bebas akan bergerak menjadi aliran atau listrik (Sear, 1985).

#### 2.4.2. Struktur Kristal

Gaya kohesif dalam kristal kovalen dari kehadiran elektron antara atom-atom yang berdekatan. Masing-masing atom yang berpartisipasi dalam ikatan kovalen berkontribusi sebuah elektron dengan ikatannya. Dioda merupakan contoh kristal yang atomnya terikat oleh ikatan kovalen.



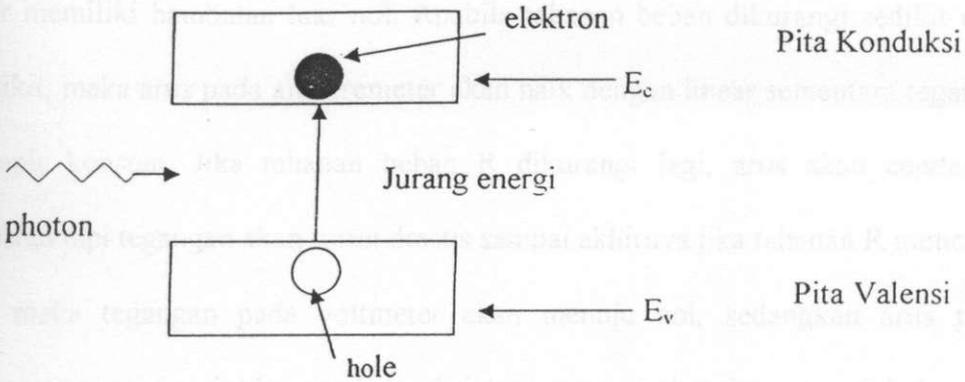
Gambar 2.5. Struktur kristal silikon a). Struktur kristal diamond b). Ikatan tetrahedron c). Ikatan tetrahedron 2 dimensi

Gambar 2.5 menunjukkan struktur kristal dioda susunan limas (tetrahedral) yang merupakan akibat dari kemampuan masing-masing atom untuk membentuk ikatan kovalen dengan empat atom lainnya.

#### 2.5. Sel Surya

Sel surya terbuat dari potongan silikon yang sangat kecil yang dilapisi dengan bahan kimia khusus untuk membentuk dasar dari sel surya. Sel surya pada umumnya memiliki ketebalan minimum 0,3 mm yang terbuat dari irisan bahan semikonduktor dan terdapat kutub positif dan negatif. Tiap sel surya biasanya

menghasilkan tegangan 0,5 Volt (Phelps et al, 2004). Sel surya merupakan elemen aktif yang memanfaatkan efek fotovoltaik untuk merubah energi surya menjadi energi listrik. Secara sederhana sel surya terdiri dari persambungan bahan semikonduktor bertipe p dan n yang jika tertimpa sinar matahari maka akan terjadi aliran elektron. Aliran elektron inilah yang disebut sebagai aliran arus listrik.



Gambar 2.6. Bagan terjadinya arus dalam sel surya

Sel surya dapat menyerap gelombang elektromagnetik dan mengubah energi foton yang diserapnya menjadi energi listrik. Ketika energi foton yang datang lebih besar dari jurang energi ini, foton akan diserap oleh semikonduktor untuk membentuk pasangan elektron-hole. Elektron-hole kemudian ditarik oleh medan listrik sehingga timbullah photocurrent.

Silikon memiliki struktur kristal yang menyerupai intan, dan seperti pada intan, suatu jurang memisahkan puncak pita energy terisi dari pita energi lebih atas yang kosong. Namun pita terlarang dalam silicon hanya 1,1 eV lebarnya (Beiser, 1992). Pada temperatur kamar sebagian kecil dari jumlah elektron memiliki energi kinetik yang berasal dari gerak termal yang cukup untuk melompati pita terlarang dan masuk ke pita energi di atasnya. Elektron-elektron

ini cukup untuk menimbulkan sejumlah arus yang terbatas untuk mengalir jika medan listrik dipasang.

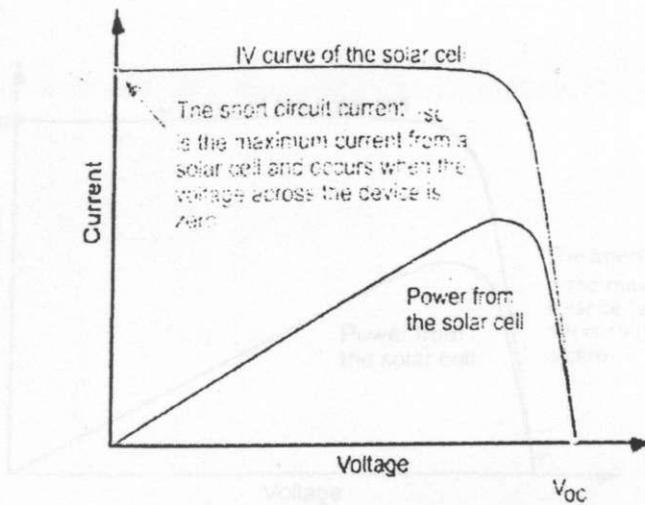
## 2.5.1. Parameter Listrik Sel Surya

### 2.5.1.1. Arus Hubungan Pendek

Arus hubungan pendek adalah arus output dari sel surya ketika rangkaian luar memiliki hambatan luar nol. Apabila tahanan beban dikurangi sedikit demi sedikit, maka arus pada amperemeter akan naik dengan linear sementara tegangan hampir konstan. Jika tahanan beban  $R$  dikurangi lagi, arus akan cenderung konstan tapi tegangan akan turun drastis sampai akhirnya jika tahanan  $R$  mencapai nol maka tegangan pada voltmeter akan menuju nol, sedangkan arus pada amperemeter menunjukkan angka maksimum yang disebut dengan arus hubungan pendek. Persamaannya adalah sebagai berikut (Li, 1993) :

$$I_{sc} = qG(L_n + L_p) \quad (2.3)$$

Dimana  $I_{sc}$  merupakan arus hubungan pendek yang memiliki satuan Ampere (A),  $q$  adalah muatan elektron yang besarnya  $1.6 \times 10^{-19}$  C,  $G$  adalah nilai generasi yang memiliki satuan  $m^{-3}$ ,  $L_n$  panjang difusi elektron dan  $L_p$  adalah panjang difusi proton yang memiliki satuan  $\mu m$ . Sedangkan untuk gambarnya dapat dilihat pada gambar 2.7.



Gambar 2.7. Kurva arus terhadap tegangan sel surya pada arus hubungan pendek

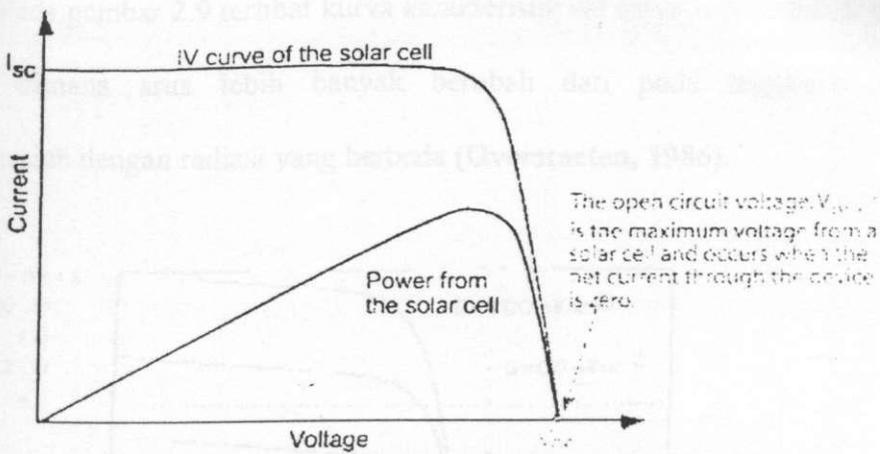
Dari kurva di atas menjelaskan bahwa arus hubungan pendek ( $I_{sc}$ ) merupakan arus maksimum dari sel surya yang terjadi ketika tegangan yang melewati rangkaian bernilai nol.

### 2.5.1.2. Tegangan Rangkaian Terbuka

Tegangan rangkaian terbuka adalah tegangan output sel surya ketika rangkaian luar terbuka yaitu hambatan luarnya tak terhingga. Jika tahanan R maksimum, maka tidak ada arus yang melewati amperemeter atau beban. Tegangan pada beban akan maksimum. Persamaannya adalah sebagai berikut (Sze, 1981) :

$$V_{oc} = \frac{nkT}{q} \ln \left( \frac{I_L}{I_0} + 1 \right) \quad (2.4)$$

Dimana  $V_{oc}$  merupakan tegangan rangkaian terbuka (Volt),  $k$  adalah konstanta Boltzman yang memiliki nilai  $1,380622 \times 10^{-23}$  J/K,  $T$  merupakan suhu dalam K,  $q$  adalah muatan elektron ( $1.601 \times 10^{-19}$  C),  $I_L$  adalah arus yang melewati sambungan p-n (A), dan  $I_0$  arus balik jenuh (A). Sedangkan untuk gambarnya dapat dilihat pada gambar 2.8 di bawah ini.



Gambar 2. 8. Kurva arus terhadap tegangan sel surya pada tegangan rangkaian terbuka

Dari gambar 2.8 di atas menjelaskan bahwa tegangan pada rangkaian terbuka merupakan tegangan maksimum dari sel surya.

### 2.5.2. Daya dan Efisiensi Sel Surya

Sebelum mengetahui daya sesaat yang dihasilkan kita harus mengetahui energi yang diterima oleh sel surya. Energi  $E$  tersebut adalah perkalian antara intensitas radiasi  $I_r$  yang diterima dengan luas permukaan sel surya  $A$  yaitu:

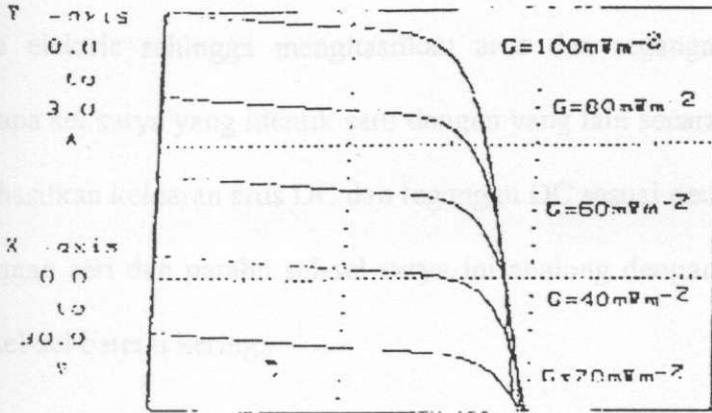
$$E = I_r \cdot A \quad (2.5)$$

Pada persamaan (2.5) satuan energi  $E$  dalam Watt, intensitas radiasi matahari  $I_r$  dalam  $W/m^2$  dan luas permukaan sel surya  $A$  dalam  $m^2$ .

Sedangkan untuk besarnya daya sesaat adalah perkalian antara tegangan dan arus yang dihasilkan oleh sel surya yang dinyatakan dengan rumus sebagai berikut :

$$P = V \cdot I \quad (2.6)$$

Pada gambar 2.9 terlihat kurva karakteristik sel surya untuk radiasi yang berbeda dimana arus lebih banyak berubah dari pada tegangan pada pengoperasian dengan radiasi yang berbeda (Overstaeten, 1986).



Gambar 2.9. Kurva V – I sel surya dari jumlah cahaya matahari yang berbeda

Karakteristik V-I ini berlaku pada intensitas cahaya yang maksimum.

Dari hasil gambar didapat bahwa karakteristik V-I berbeda pada setiap tingkat penyinaran. Karena itu daya akan berubah secara linear terhadap perubahan intensitas cahaya.

Sedangkan untuk menentukan efisiensi sel surya dapat dinyatakan dengan persamaan di bawah ini:

$$\eta = \frac{P}{E.A} \tag{2.7}$$

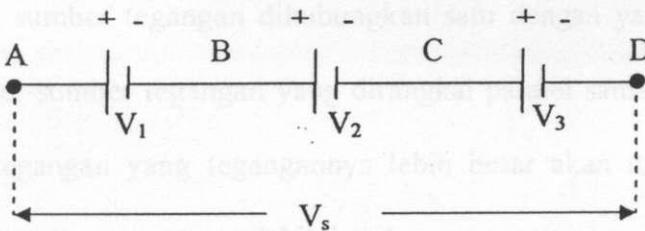
Efisiensi yang terjadi pada sel surya merupakan perbandingan daya yang dapat dibangkitkan oleh sel surya dengan energi input yang diperoleh dari sinar matahari dan dinyatakan dalam persentase (%).

## 2.6. Modul Sel Surya

Modul sel surya tersusun dari beberapa sel surya yang ditempatkan pada suatu blok pendukung dalam jumlah baris dan kolom tertentu dan terhubung secara elektrik sehingga menghasilkan arus dan tegangan tertentu. Pasangan beberapa sel surya yang identik satu dengan yang lain secara seri dan paralel akan menghasilkan keluaran arus DC dan tegangan DC sesuai dengan yang dibutuhkan. Hubungan seri dan paralel sel-sel surya ini analog dengan hubungan-hubungan pada sel-sel baterai kering.

### 2.6.1. Hubungan Seri

Beberapa sumber tegangan dirangkai seri bila kutub positif salah satu sumber dihubungkan dengan kutub negatif sumber lain. Gambar 8 melukiskan rangkaian seri tiga sumber tegangan.



Gambar 2.8. Rangkaian seri sumber tegangan

Pada gambar 2.8 potensial titik A lebih tinggi sebesar  $E_1$  daripada titik B, potensial B lebih tinggi  $E_2$  daripada C, dan potensial C lebih tinggi  $E_3$  daripada D. Dengan demikian potensial A lebih tinggi ( $V_1 + V_2 + V_3$ ) daripada D. Jika beda potensial A dan B disebut  $E_s$ , maka:

$$V_s = V_1 + V_2 + V_3$$

Jika terdapat T sumber tegangan yang dirangkai seri dan tegangan masing-masing sumber  $V_1, V_2, V_3, \dots, V_n$  maka tegangan rangkaian seluruh sumber:

$$V_T = V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n \quad (2.8)$$

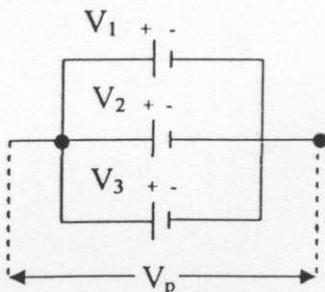
Rangkaian sumber tegangan seri digunakan untuk mendapatkan tegangan yang lebih besar daripada tegangan satu sumber tegangan. Sedangkan untuk nilai arusnya tetap di setiap titik tegangan yang dapat dilihat pada persamaan di bawah ini.

$$I_T = I_1 = I_2 = I_3 = \dots = I_n \quad (2.9)$$

Jadi dengan menghubungkan beberapa modul secara seri akan menghasilkan tegangan yang merupakan penjumlahan tegangan masing-masing modul, sementara arusnya konstan.

### 2.6.2. Hubungan Paralel

Beberapa sumber tegangan dirangkai paralel bila kutub-kutub sejenis dari masing-masing sumber tegangan dihubungkan satu dengan yang lain. Biasanya tegangan sumber-sumber tegangan yang dirangkai paralel sama, sebab jika tidak sama sumber tegangan yang tegangannya lebih besar akan mengalirkan listrik melalui sumber yang tegangannya lebih kecil.



Gambar 2.11. Rangkaian paralel sumber tegangan



Titik A memiliki potensial sama dengan potensial setiap kutub positif sumber tegangan. Sebab masing-masing kutub positif sumber tegangan dihubungkan dengan pengantar yang hambatannya dapat diabaikan. Demikian pula potensial titik B sama dengan potensial setiap kutub negatif masing-masing sumber tegangan.

$$V_T = V_1 = V_2 = V_3 = \dots = V_n \quad (2.10)$$

$$I_T = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (2.11)$$

Jadi dengan menghubungkan beberapa modul secara paralel akan menghasilkan arus yang merupakan penjumlahan dari arus masing-masing modul, sementara tegangannya konstan.

	Baterai sel surya	4 buah
	Lampu untuk indikator sel surya dan lampu indikator	3 buah
	Multimeter analog	Untuk mengukur tegangan dan arus yang dihasilkan sel surya
	Lampiran	Baterai mengaktifkan intensitas lampu-halogen

### 3.1. Konstruksi Peralatan

Untuk melakukan penelitian ini maka dibuat suatu rancangan bangun bagi sel surya. Sebelum memulai penelitian maka terlebih dahulu disiapkan peralatan-peralatan yang diperlukan. Konstruksi peralatan secara lengkap ditunjukkan pada Gambar 3.1 di bawah ini:



Gambar 3.1. Perangki alat penelitian