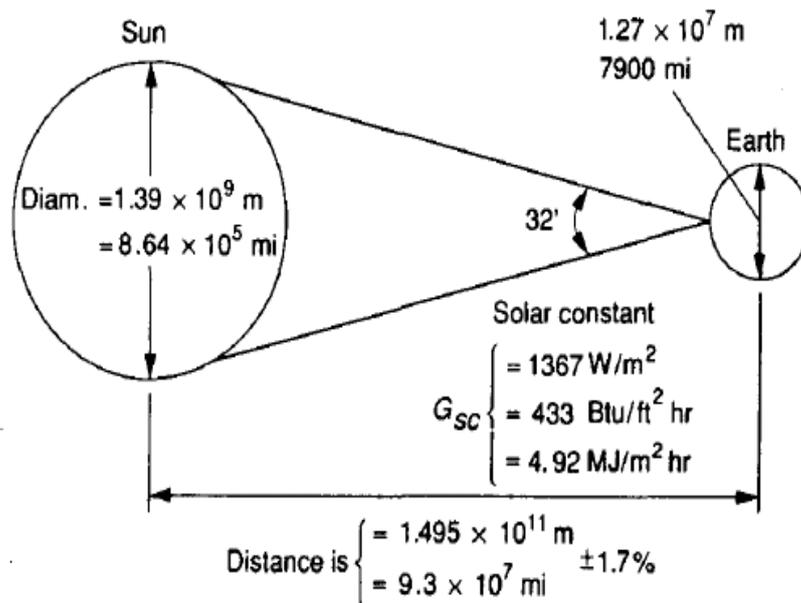


BAB II DASAR TEORI

2.1. Radiasi Matahari

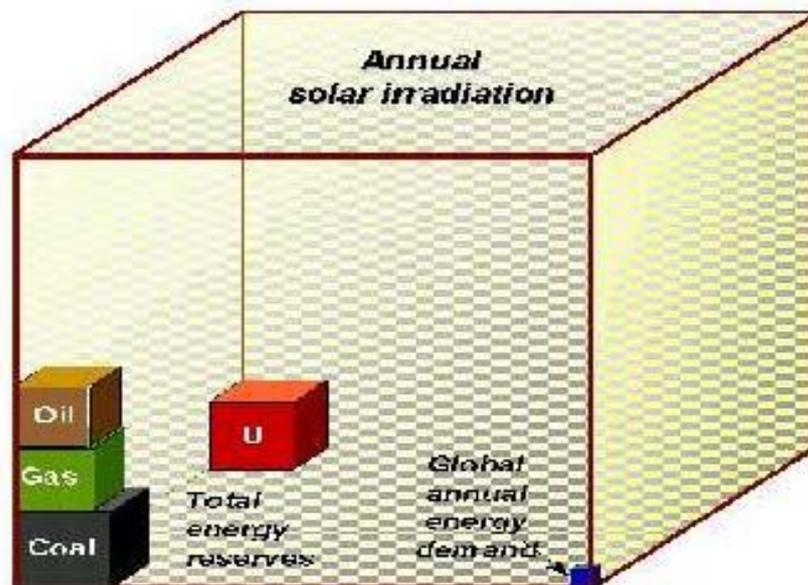
Jarak eksentrisnya dari lintasan bumi adalah jarak antara matahari dan bumi dengan variasi 1,7%. Dari hasil pengukuran astronomi didapat jarak rata-rata bumi-matahari adalah $1,495 \times 10^{11}$ m dengan sudut kecenderungan matahari 32° . Radiasi yang diemisikan oleh matahari dan ruang angkasa yang berhubungan dengannya ke bumi menghasilkan intensitas radiasi matahari yang hampir konstan di luar atmosfer bumi. Konstanta matahari (G_{sc}) adalah energi dari matahari per unit waktu yang diterima pada satu unit luasan permukaan yang tegak lurus arah radiasi matahari pada jarak rata-rata matahari-bumi di luar atmosfer. *World Radiation Center (WRC)* mengambil nilai konstanta matahari (G_{sc}) sebesar 1367 W/m^2 dengan ketidakpastian sebesar 1% [1].



Gambar 2.1. Hubungan Antara Matahari dan Bumi[1]

Selain itu, ada juga yang disebut dengan konstanta radiasi ekstraterrestrial (G_{on}) yaitu radiasi di luar atmosfer bumi yang diukur pada bidang normal terhadap radiasi pada hari ke-n pada satu tahun, hal ini dikarenakan orbit bumi sebenarnya berbentuk elips sehingga perlu sedikit koreksi terhadap konstanta matahari di atas. Jadi sebenarnya ada dua penyebab adanya variasi radiasi ekstraterrestrial yaitu variasi radiasi yang diemisikan matahari dan variasi jarak matahari-bumi[1].

Setiap tahunnya ada sekitar $3,9 \times 10^{24}$ Joule = $1,08 \times 10^{18}$ kWh dari energi matahari yang mencapai permukaan bumi, hal ini kira-kira 10000 kali lebih banyak dari permintaan energi primer secara global tiap tahunnya dan lebih banyak dari cadangan ketersediaan keseluruhan energi yang ada di bumi. Dengan kata lain, menggunakan 10000 kali energi yang dihasilkan dari cahaya matahari yang datang secara optimal, dapat mencukupi seluruh kebutuhan energi di masa yang akan datang. Gambar 2.1 di bawah ini mengilustrasikan hal ini dalam bentuk kubus energi (*energy cubes*)[4].



Gambar 2.2 *Energy Cubes* [4]

2.2 Distribusi Radiasi Matahari

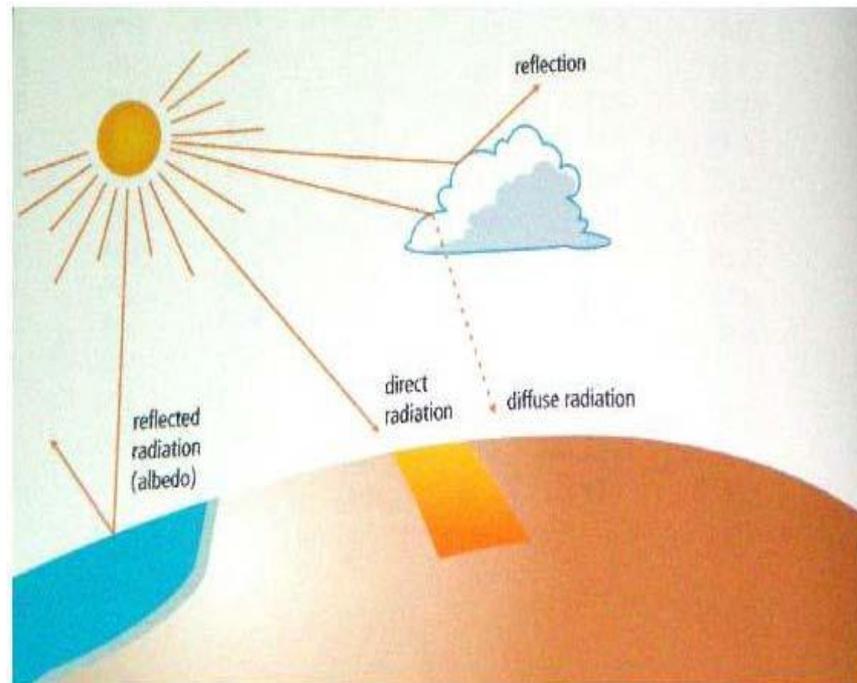
Intensitas radiasi matahari di luar atmosfer bumi bergantung pada jarak antara matahari dengan bumi. Tiap tahun, jarak ini bervariasi antara $1,47 \times 10^8$ km dan $1,52 \times 10^8$ km dan hasilnya besar pancaran E_0 naik turun antara 1325 W/m^2 sampai 1412 W/m^2 . Nilai rata-ratanya disebut sebagai konstanta matahari dengan nilai $E_0 = 1367 \text{ W/m}^2$ [3].

Pancaran ini tidak dapat mencapai ke permukaan bumi. Atmosfer bumi mengurangi *insolation* yang melewati pemantulan, penyerapan (oleh ozon, uap air, oksigen, dan karbon dioksida), serta penyebaran (disebabkan oleh molekul udara, partikel debu atau polusi). Di cuaca yang bagus pada siang hari, pancaran bisa mencapai 1000 W/m^2 di permukaan bumi. *Insolation* terbesar terjadi pada sebagian hari-hari yang berawan dan cerah. Sebagai hasil dari pancaran matahari yang memantul melewati awan, maka *insolation* dapat mencapai hingga 1400 W/m^2 untuk jangka pendek[3].

2.3 Radiasi Matahari Pada Permukaan Bumi

Ada tiga macam cara radiasi matahari sampai ke permukaan bumi, yaitu [4]:

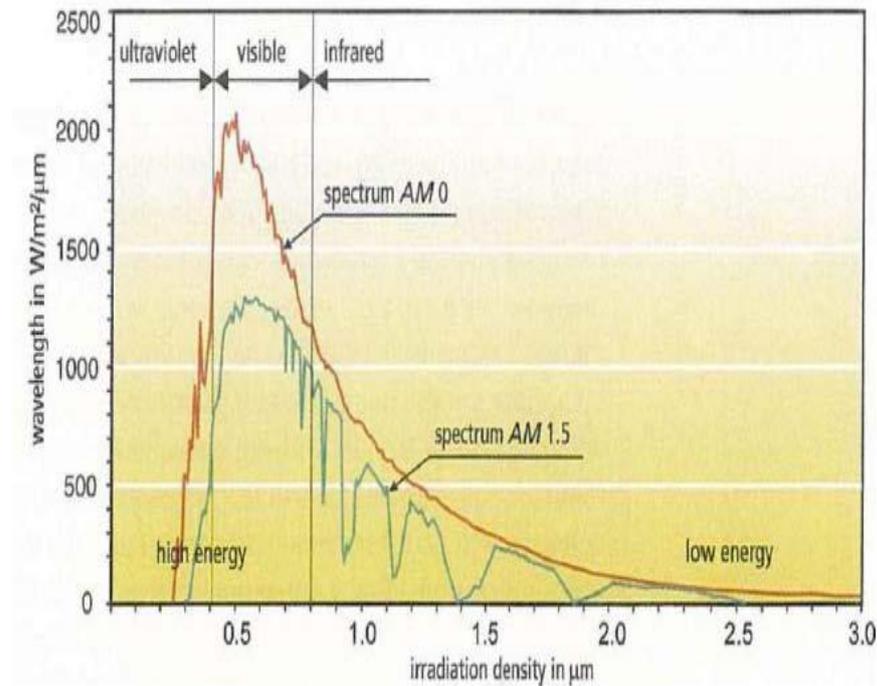
- a. Radiasi langsung (*Beam/Direct Radiation*)
Adalah radiasi yang mencapai bumi tanpa perubahan arah atau radiasi yang diterima oleh bumi dalam arah sejajar sinar datang.
- b. Radiasi hambur (*Diffuse Radiation*)
Adalah radiasi yang mengalami perubahan akibat pemantulan dan penghamburan.
- c. Radiasi total (*Global Radiation*)
Adalah penjumlahan radiasi langsung (*direct radiation*) dan radiasi hambur (*diffuse radiation*).



Gambar 2.3 Distribusi Radiasi Matahari Sampai ke Permukaan Bumi [3]

Cahaya matahari pada permukaan bumi terdiri dari bagian yang langsung dan bagian yang baur. Radiasi langsung datang dari arah matahari dan memberikan bayangan yang kuat pada benda. Sebaliknya radiasi baur yang tersebar dari atas awan tidak memiliki arah yang jelas tergantung pada keadan awan dan hari tersebut (ketinggian matahari), baik daya pancar maupun perbandingan antara radiasi langsung dan baur[3].

Energi matahari yang ditransmisikan mempunyai panjang gelombang dengan *range* 0,25 mikrometer sampai 3 mikrometer (untuk di luar atmosfer bumi atau *extraterrestrial*), sedangkan untuk di atmosfer bumi berkisar antara 0,32 mikrometer sampai 2,53 mikrometer. Hanya 7% energi tersebut terdiri dari ultraviolet (AM 0), 47% adalah cahaya tampak (cahaya tampak memiliki panjang gelombang 0,4 mikrometer sampai 0,75 mikrometer), 46% merupakan cahaya inframerah[4].



Gambar 2.4 Spektrum Cahaya Matahari [3]

Beberapa hal dapat mempengaruhi pengurangan intensitas *irradiance* pada atmosfer bumi [2]. Pengaruh tersebut dapat berupa:

- Pengurangan intensitas karena refleksi (pemantulan) oleh atmosfer bumi
- Pengurangan intensitas oleh karena penyerapan zat-zat di dalam atmosfer (terutama oleh O₃, H₂O, O₂, dan CO₂)
- Pengurangan intensitas oleh karena *Rayleigh scattering*
- Pengurangan intensitas oleh karena *Mie scattering*

Sedangkan radiasi yang jatuh pada permukaan material pada umumnya akan mengalami refleksi, absorbs, dan transmisi. Dari tiga proses ini maka material akan memiliki reflektivitas (ρ), adsorbsivitas (α), dan transmisivitas (τ)[2].

Refleksi adalah pemantulan dari sebagian radiasi tergantung pada harga indeks bias dan sudut datang radiasi. Refleksi spektakuler terjadi pantulan sinar pada sebuah cermin datar dimana sudut datang sama dengan sudut pantul. sedangkan refleksi difusi terjadi berupa pantulan kesegala arah[2].

Transmisi memberikan nilai besar radiasi yang dapat diteruskan oleh suatu lapisan permukaan. Kemampuan penyerapan (absorbsivitas) dari suatu permukaan merupakan hal yang penting dalam pemanfaatan radiasi seperti pada pemanfaatan radiasi surya. Harga absorbsivitas berlainan untuk sudut datang radiasi yang berlainan. Menurut *British Building Research* untuk sudut datang dibawah 75° , harga absorbsivitas terletak antara 0,8 sampai 0,9 dari absorbsivitas yang dimiliki oleh suatu benda[2].

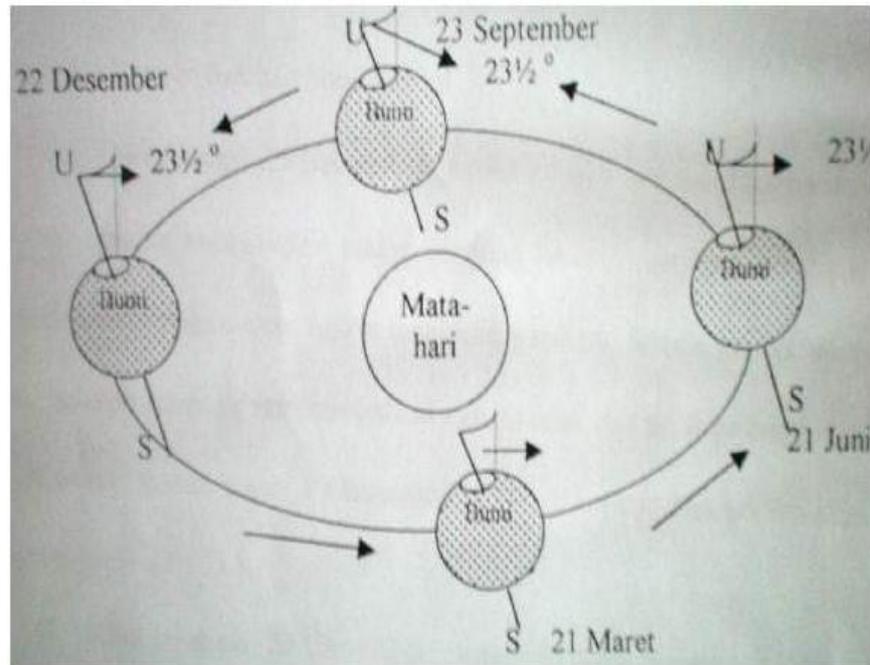
Absorbsivitas memberikan nilai besarnya radiasi yang dapat diserap. Misalnya pada bagian *absorber* pada sebuah pengumpul radiasi surya. Ketiga proses tersebut diatas yaitu, absorpsi, refleksi, dan transmisi adalah hal yang penting dalam proses pemanfaatan radiasi surya, karena ini menyangkut efektifitas pemanfaatan pada sebuah pengumpul radiasi surya[2].

2.4. Bumi

Bukti yang paling mutakhir ialah bentuk bumi sebagaimana yang dilihat dari satelit dan kapal ruang angkasa pada abad ke-20 ini, pengukuran yang lebih teliti menunjukkan bahwa bumi tidak bulat seperti bola. Bentuk sebenarnya ialah pepat pada kedua kutub dan agak gembung di sekitar khatulistiwa. Dengan bentuk demikian, panjang diameter khatulistiwa adalah 12.757 kilometer dan diameter kutub hanya 12.714 kilometer[4].

Oleh karena orbit bumi berbentuk elips dengan matahari terletak pada salah satu fokusnya, maka dalam setiap kali revolusi bumi itu kadang-kadang dekat dan kadang-kadang jauh dari matahari. Titik terjauh disebut *aphelium*, dan titik terdekat disebut *perihelium*. Bumi terletak pada *aphelium*nya pada tanggal 1 Juli dan jaraknya dari matahari adalah 152.000.000 kilometer. Titik *perihelium*nya dicapai pada 1 Januari, yang jaraknya dari matahari adalah 147.000.000 kilometer. Apabila bumi terletak pada *perihelium*nya, maka bumi akan bergerak dengan cepat. Sebaliknya jika jauh dari matahari, maka gerakan bumi menjadi lambat[4].

2.4.1 Pengaruh Revolusi Bumi



Gambar 2.5 Pergerakan Bumi Mengelilingi Matahari[4]

Selama mengelilingi matahari, sumbu bumi miring dengan arah yang sama. Kemiringan itu membentuk sudut sebesar $23,5^\circ$ terhadap garis tegak lurus pada bidang ekliptika, sebagaimana dilihat pada bola dunia dan penyangganya. Didalam perjalanan bumi mengelilingi matahari sejak tanggal 21 Maret sampai dengan tanggal 21 Juni, kutub utara seakan-akan makin condong kearah matahari. Sebaliknya kutub selatan seakan-akan semakin menjauhi matahari. Selama jangka waktu itu, belahan bumi utara mengalami musim semi dan belahan bumi selatan mengalami musim gugur[4].

Pada tanggal 21 Juni, matahari seakan-akan berada pada $23,5^\circ$ LU (Lintang Utara). Dari tanggal 21 Juni sampai dengan tanggal 23 September kecondongan kutub utara kearah matahari semakin berkurang. Sebaliknya kecondongan kutub selatan kearah matahari semakin bertambah. Selama jangka waktu itu, belahan bumi utara mengalami musim panas dan belahan bumi selatan mengalami musim dingin. Pada tanggal 23 September matahari seakan-akan berada dikhatulistiwa. Dari tanggal 21 Maret sampai dengan tanggal 23 September siang lebih panjang dibandingkan malam

di belahan bumi utara, sedangkan malam lebih panjang dibandingkan siang di belahan bumi selatan. Dari tanggal 23 September sampai dengan tanggal 22 Desember kutub selatan seakan-akan makin condong kearah matahari, sebaliknya kutub utara seakan-akan makin menjauhi matahari. Selama jangka waktu itu, belahan bumi selatan mengalami musim semi dan belahan bumi utara mengalami musim gugur. Pada tanggal 22 Desember matahari seakan-akan berada pada $23,5^{\circ}$ LS (Lintang Selatan)[4].

Dari tanggal 22 Desember sampai dengan tanggal 21 Maret kecondongan kutub selatan kearah matahari makin berkurang sedangkan kecondongan kutub utara kearah matahari semakin bertambah. Selama jangka waktu itu, belahan bumi bagian selatan mengalami musim panas dan belahan bumi bagian utara mengalami musim dingin. Pada tanggal 21 maret matahari kembali berada diatas katulistiwa. Beberapa panel surya mengikuti matahari dengan bergerak dengan cara melakukan sesuatu dalam waktu yang telah ditentukan untuk meminimalisasi sudut datang radiasi beam pada permukaan sehingga sudut datangnya bisa maksimal. Sudut datang dan sudut *azimuth* permukaan dibutuhkan untuk panel surya-panel surya. *Tracking system* diklasifikasikan oleh pergerakannya. Rotasi dapat terjadi pada *single axis* atau sumbu tunggal (yang biasanya dapat merupakan beberapa arah, namun untuk praktisnya biasanya timur-barat horisontal, utara-selatan horisontal, vertikal atau paralel terhadap sumbu bumi)[4].

2.4.2 Pengaruh Rotasi Bumi

Bersamaan dengan revolusi bumi, bumi pun berputar mengelilingi sumbunya yang dapat disebut dengan rotasi. Arah rotasi sama dengan arah revolusi, yaitu dari barat ke timur. Itulah sebabnya matahari lebih dahulu terbit di papua dari pada di pulau jawa. Setelah satu kali rotasi, tempat-tempat di bumi telah menjalani 360° bujur. Oleh karena ke- 360° ditempuh selama 24 jam, maka tiap satu derajat ditempuh selama empat menit. Dengan demikian, perbedaan waktu antara dua tempat yang perbedaan bujurnya 15° adalah satu jam. Oleh karena itu, disepakatilah untuk membagi permukaan bumi menjadi 24 daerah waktu yang masing-masing 15° besarnya dengan Perbedaan waktu di antara dua daerah waktu yang berdampingan adalah satu jam[4].

Waktu pangkal yang ditetapkan adalah waktu yang berlaku untuk garis bujur yang melewati daerah *Greenwich*. Bujur ini ditetapkan sebagai bujur 0° dengan setiap

garis bujur yang jauhnya 15^0 atau kelipatan 15^0 ke arah timur dan ke arah barat bujur nol dipakai sebagai bujur standar. Waktu pada bujur standar disebut waktu standar atau waktu lokal. Indonesia misalnya, mempunyai tiga bujur standar, yaitu 105^0 , 120^0 , dan 135^0 bujur timur. Dengan demikian, waktu lokal masing-masing ialah waktu *Greenwich* ditambah dengan 7, 8, dan 9 jam. Jika letak bujur standar itu di sebelah barat (bujur barat) bujur nol, maka waktunya dikurangi[4].

2.4.3 Pengaruh Posisi Modul Surya (*Photovoltaic*) Terhadap Pergerakan Arah Matahari

Beberapa macam cara yang dapat mendapatkan radiasi matahari yang lebih banyak yaitu dengan mengatur kedudukan modul surya, dimana kedudukan modul surya dapat diatur mengikuti pergerakan arah matahari dengan menentukan posisi sudut kemiringan, sudut deklinasi, bujur lintang, sudut *zenith*, sudut datang matahari, sudut permukaan *azimuth*, serta sudut jam matahari terhadap pergerakan arah matahari. Cara kedua adalah dengan menggunakan cermin pantul[4].

Posisi relatif matahari terhadap modul surya (*photovoltaic*) di bumi bisa dijelaskan dalam beberapa sudut. Beberapa diantaranya bisa dilihat pada gambar 2.5 Sudut-sudut itu adalah[1] :

- *Latitude* (garis lintang)

Adalah sudut lokasi di sebelah utara atau selatan dari equator (khatulistiwa), utara positif ; $-90^0 \leq \phi \leq 90^0$. hal ini pengujian solar cell dilakukan ditempat kampus undip semarang dengan letak geografisnya berada pada $7^{\circ}LS - 110^{\circ}BT$.

- Deklinasi (δ)

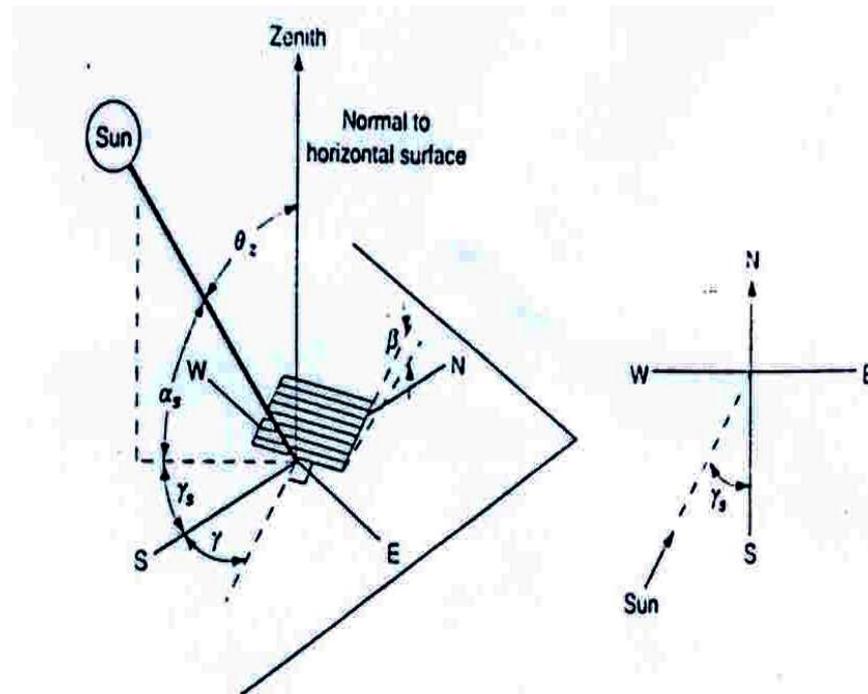
Adalah sudut posisi matahari terhadap bidang khatulistiwa, utara positif $-23,45^0 < \delta < 23,45^0$. deklinasi dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan :

$$\delta = 23,45^0 \sin \left(260 \frac{284 \times n}{365} \right), \text{ dimana } n = \text{hari dalam bulan} \quad (2.1)$$

- **Kemiringan (β)**
Adalah sudut antara permukaan bidang yang ditanyakan dengan permukaan horizontal. Slope (kemiringan) dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan :
$$\beta = \text{Tan}^{-1} (\text{Tan } \theta_z \times \cos \gamma_s) \quad (2.2)$$
- **Sudut permukaan *azimuth* (γ)**
Adalah proyeksi ke bidang horizontal normal terhadap permukaan dari lokasi bujur, dengan nol menghadap selatan, timur negatif, barat positif ; $-180^0 \leq \gamma \leq 180^0$.
- **Sudut jam matahari (ω)**
Adalah sudut penyimpangan matahari di sebelah timur atau barat garis bujur lokal karena rotasi pada porosnya sebesar 15^0 per jam ; sebelum jam 12.00 negatif, setelah jam 12.00 positif.
$$\omega = (t_s - 12) \times \frac{360}{24} , t_s = \text{waktu jam} \quad (2.3)$$
- **Sudut datang (θ)**
Adalah sudut antara permukaan radiasi langsung normal vertikal terhadap radiasi langsung vertikal kolektor. Sudut datang dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan :
$$\theta = \cos^{-1} (1 - \cos^2 \delta \times \sin^2 \omega)^{1/2} \quad (2.4)$$
- **Sudut *zenith* (θ_z)**
Adalah sudut antara garis vertikal bidang normal dan garis datang sinar matahari. Sudut *zenith* dapat diperoleh dengan menggunakan persamaan :
$$\theta_z = \cos^{-1} (\cos \phi \times \cos \delta \times \cos \omega + \sin \phi \times \sin \delta) \quad (2.5)$$
- **Sudut ketinggian matahari (α_s)**
Adalah Sudut antara garis horisontal dengan garis matahari datang pada modul surya (*photovoltaic*).
- **Sudut azimuth matahari (γ_s)**
Adalah sudut penyimpangan dari selatan dengan proyeksi radiasi langsung pada bidang horisontal. Penyimpangan ke sebelah timur adalah negatif dan ke sebelah barat adalah positif. Sudut zenith dapat diperoleh dengan menggunakan

persamaan :

$$\gamma_s = \sin^{-1}\left(\frac{\sin \omega t \times \cos \delta}{\sin \theta_z}\right) \quad (2.6)$$



Gambar 2.6 Beberapa Sudut Penting Energi Surya[1]

Tabel. 2.1 Data Tanggal Pengujian Modul Surya Dalam Bulan Terhadap Matahari[1]

Bulan	Tanggal dalam bulan	Tanggal pengujian	Jumlah tanggal pengujian terhadap bulan	Deklinasi (δ)
Januari	i	17	17	-20.9
Februari	31 + i	16	47	-13.0
Maret	59 + i	16	75	-2.4
April	90 + i	15	105	9.4

Lanjutan Data Tanggal Pengujian Modul Surya Dalam Bulan Terhadap Matahari

Mei	120 + i	135	135	18.8
Juni	151 + i	162	162	23.1
Juli	181 + i	198	198	21.2
Agustus	212 + i	228	228	13.5
September	243 + i	258	258	2.2
Oktober	273 + i	288	288	-9.6
November	304 + i	318	318	-18.9
Desember	334 + i	344	344	-23.0

2.4.4 Pengaruh Pola Lintasan Matahari Terhadap Intensitas Radiasinya

Intensitas radiasi matahari juga dipengaruhi oleh pola peredaran matahari tersebut dengan ukuran AM nya. AM adalah faktor jalur lintasan sinar (*radiation path*), dimana daerah-daerah yang berada di tepat khatulistiwa bumi mempunyai AM sama dengan satu. Semakin jauh letaknya dari khatulistiwa menuju ke kutub bumi, maka AM-nya semakin besar dan nilai radiasi matahari yang terbesar bila nilai AM nya sama dengan satu[5].

2.5. Photovoltaic (PV)

Kata '*photovoltaic*' terdiri dari dua kata yaitu *photo* dan *volta*. *Photo* yang berarti cahaya (dari bahasa Yunani yaitu phos, photos: cahaya) dan *Volta* (berasal dari nama seorang fisikawan italia yang hidup antara tahun 1745-1827 yang bernama Alessandro Volta) yang berarti unit tegangan listrik. Dengan kata lain, arti *photovoltaic* yaitu proses konversi cahaya matahari secara langsung untuk diubah menjadi listrik. Oleh karena itu, kata *photovoltaic* biasa disingkat dengan PV. Nama lain untuk sel *photovoltaic* adalah *solar cell*, *solar panel*, *solar array*, dan *photovoltaic panel*. *Solar array* adalah kelompok dari *solar panel*, dan *solar panel* adalah kelompok dari *solar*

cell. *Solar cell* merupakan elemen aktif (semikonduktor) yang memanfaatkan efek *photovoltaic* untuk mengubah energi surya menjadi energi listrik tanpa penggunaan dari bagian-bagian mekanis yang bergerak dan tanpa penggunaan bahan bakar, contoh sel *photovoltaic* bisa dilihat pada gambar 2.8 *PV Module* atau *Solar cell* terbuat dari potongan silikon yang sangat kecil dengan dilapisi bahan kimia khusus untuk membentuk dasar dari *solar cell*. *Solar cell* pada umumnya memiliki ketebalan minimum 0,3 mm yang terbuat dari irisan bahan semikonduktor dengan kutub positif dan negatif. Semikonduktor adalah suatu bahan yang mempunyai sifat konduktor dan isolator yang baik. Contoh semikonduktor yang sering digunakan adalah silikon dan germanium. Silikon berperan sebagai isolator pada temperatur rendah dan sebagai konduktor bila ada energi dan panas. Dapat diperkirakan kita tidak akan kekurangan silikon karena kira-kira 25% dari kerak bumi adalah silikon. Tiap *solar cell* biasanya menghasilkan tegangan 0,5 Volt. Pada *solar cell* terdapat sambungan (*junction*) antara dua lapisan tipis yang terbuat dari bahan semikonduktor yang masing-masing diketahui sebagai semikonduktor jenis “P” (positif) dan semikonduktor jenis “N” (negatif). Semikonduktor jenis N dibuat dari kristal silikon dan terdapat juga sejumlah material lain (umumnya *phosfor*) dalam batasan bahwa material tersebut dapat memberikan suatu kelebihan elektron bebas[2].

Elektron adalah partikel sub atom yang bermuatan negatif, sehingga silikon paduan dalam hal ini disebut sebagai semikonduktor jenis N (negatif). Semikonduktor jenis P juga terbuat dari kristal silikon yang didalamnya terdapat sejumlah kecil material lain (umumnya boron) yang mana menyebabkan material tersebut kekurangan satu elektron bebas. Kekurangan atau hilangnya elektron ini disebut lubang (*hole*). Karena tidak ada atau kurangnya elektron yang bermuatan listrik negatif, maka silikon paduan dalam hal ini sebagai semikonduktor jenis P (positif)[5].

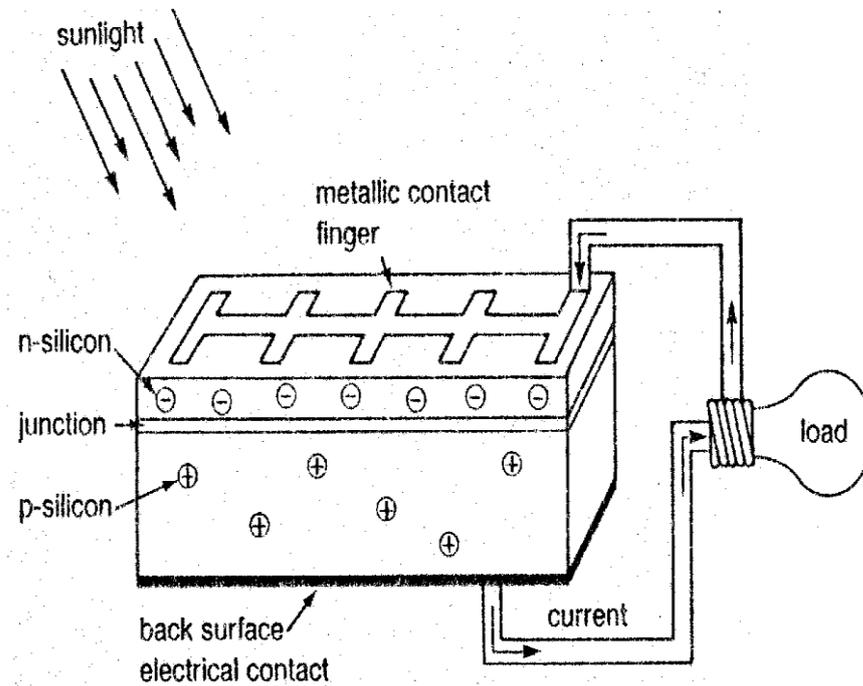
Bahan sel surya sendiri terdiri dari kaca pelindung dan material *adhesive* transparan yang melindungi bahan sel surya dari keadaan lingkungan, material anti-refleksi untuk menyerap lebih banyak cahaya dan mengurangi jumlah cahaya yang dipantulkan, semi-konduktor *P-type* dan *N-type* (terbuat dari campuran silikon) untuk menghasilkan medan listrik, saluran awal dan saluran akhir (terbuat dari logam tipis) untuk mengirim electron ke perabot listrik[5].

Unjuk kerja dari *solar cell* ditunjukkan dengan memperhatikan parameter efisiensi. Untuk menunjukkan unjuk kerja *solar cell*, efisiensi tergantung pada spektrum dan intensitas pancaran cahaya matahari dan suhu *solar cell*. Oleh karena itu kondisi tersebut harus diperhatikan, jika ingin membandingkan unjuk kerja dari satu *solar cell* dengan *solar cell* lainnya. *Solar cell* yang digunakan untuk aplikasi terrestrial, diukur berdasarkan kondisi pada spektrum AM 1,5 pada suhu 25°C [6].

Cara kerja sel surya sendiri sebenarnya identik dengan piranti semikonduktor diode. 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 semi-konduktor menyebabkan aliran medan listrik. Dan menyebabkan elektron dapat disalurkan ke saluran awal dan akhir untuk digunakan pada perabot listrik[6].



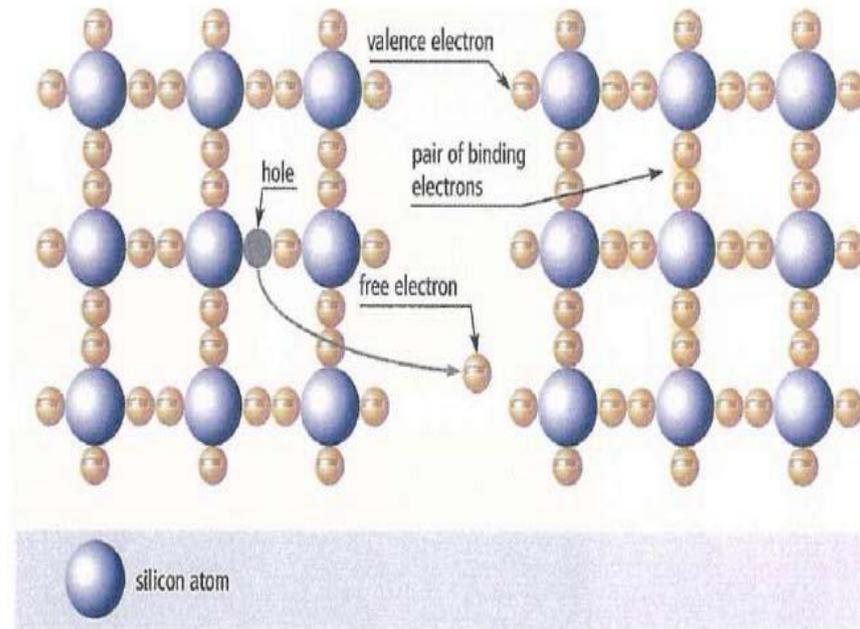
Gambar 2.7 Contoh Sel *Photovoltaic*[6]



Gambar 2.8 Diagram dari Sebuah Potongan Sel Surya (PV)[5]

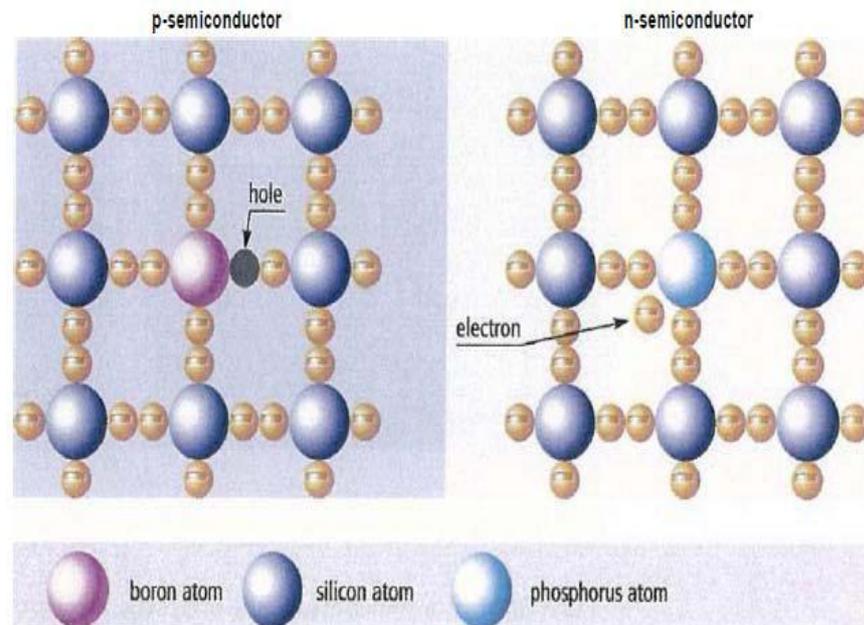
2.5.1. Prinsip Kerja Dari Modul Surya (*Photovoltaic*)

Silikon kemurnian tinggi dengan kualitas kristal yang tinggi pula, diperlukan untuk membuat sel surya. Atom-atom silikon tersebut membentuk suatu kisi kristal yang stabil. Tiap atom silikon memiliki empat ikatan elektron (elektron valensi) di kulit terluarnya. Untuk membentuk konfigurasi elektron yang stabil di dalam kisi kristal, dua elektron dengan atom yang saling berdekatan membentuk suatu ikatan pasangan elektron. Dengan membentuk ikatan pasangan elektron dengan empat atom yang berdekatan, silikon mencapai konfigurasi gas mulianya yang stabil dengan delapan elektron di kulit terluarnya. Suatu ikatan elektron bisa dipisahkan dengan pemberian cahaya atau panas. Elektron tersebut kemudian bebas bergerak dan menuju suatu rongga di dalam kisi kristalnya yang dikenal sebagai konduktivitas intrinsik[3].



Gambar 2.9 Struktur Kristal Silikon dan Konduktivitas Intrinsik [3]

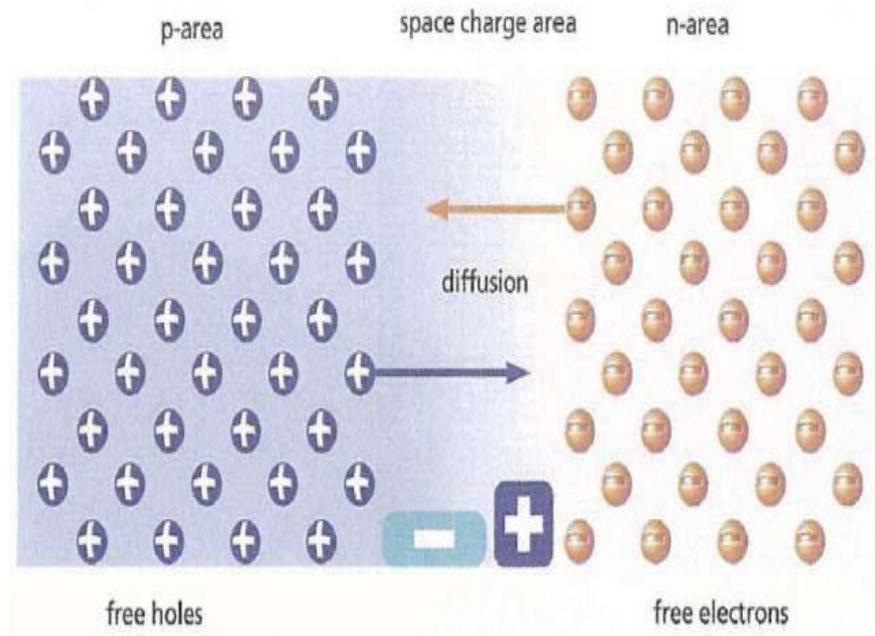
Konduktivitas intrinsik tidak bisa digunakan dulu untuk menghasilkan listrik. Maka material silikon dapat digunakan untuk menghasilkan energi, pengotornya dengan bebas masuk ke dalam kisi kristal. Hal ini disebut sebagai atom doping (*doping atoms*), lihat (Gambar 2.9). Atom-atom ini memiliki satu elektron lebih banyak (fosfor) dan satu elektron lebih sedikit (boron) daripada silikon di kulit elektron terluarnya. Sehingga, *doping atoms* menghasilkan atom pengotor (*impurity atom*) di dalam kisi kristal [3].



Gambar 2.10 Konduksi Ekstrinsik pada Silikon *n-doped* dan *p-doped* [3]

Pada fosfor *doping* (*phosphorus doping, n-doped*), terdapat kelebihan elektron untuk setiap atom fosfor di dalam kisi. Elektron ini dapat bergerak bebas di dalam kristal dan dapat membawa muatan listrik. Pada *boron doping (p-doped)*, terdapat suatu rongga (ikatan elektron yang hilang) untuk setiap atom boron pada kisi. Elektron-elektron dari atom silikon yang berdekatan dapat mengisi rongga ini, membentuk sebuah rongga baru di tempat lain. Metode konduksi yang berdasarkan pada *doping atoms* ini dinamakan konduksi pengotor (*impurity conduction*) atau konduksi ekstrinsik. Pada material *n-doped* atau *p-doped*, muatan-muatan bebas tidak memiliki arah yang ditentukan untuk pergerakannya [3].

Jika lapisan semikonduktor n dan p-doped secara bersamaan, akan membentuk suatu sambungan positif negatif (*p-n junction*). Pada sambungan ini, kelebihan elektron dari semikonduktor n terdifusi ke dalam lapisan semikonduktor p. Hal ini akan membentuk sebuah daerah (*region*) dengan sedikit pembawa (*carrier*) muatan bebas (lihat Gambar 2.11). Daerah ini dikenal sebagai daerah muatan ruang (*space charge region*) yang secara positif mengisi muatan pada *doping atoms* yang tersisa di dalam daerah transisi n dan secara negatif mengisi muatan pada *doping atoms* yang tersisa di dalam daerah transisi p [3].



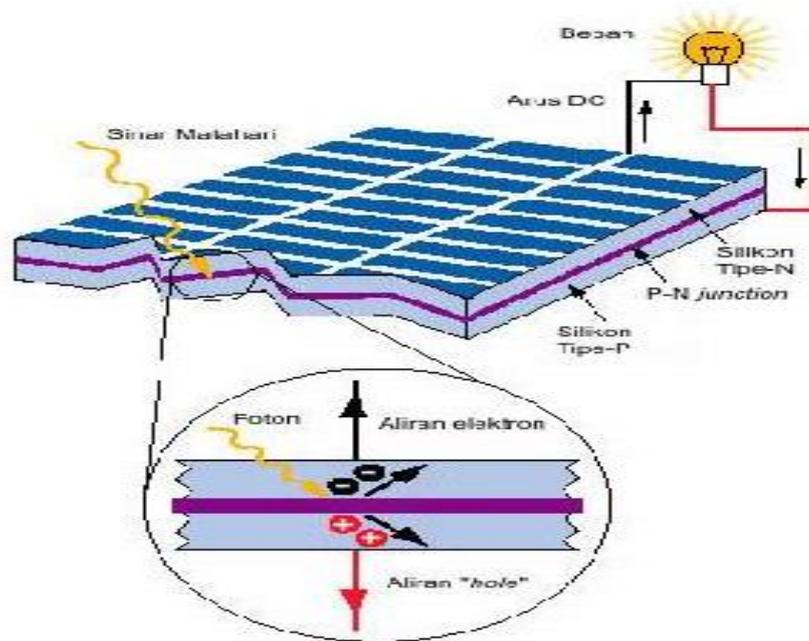
Gambar 2.11 Pembentukan Daerah Muatan Ruang pada Sambungan p-n melalui Difusi Elektron dan Lubang [3].

Jika semikonduktor p-n (sel surya) sekarang diarahkan menghadap cahaya, maka foton akan diserap oleh elektron. Energi masukan ini akan memecah ikatan elektron. Elektron yang terlepas akan tertarik melewati medan listrik, menjadi daerah n (*n-region*). Rongga yang terbentuk akan berpindah ke arah berlawanan menjadi daerah p. Proses ini secara keseluruhan disebut sebagai efek *photovoltaic*. Difusi pembawa muatan ke hubungan listrik akan menyebabkan timbulnya tegangan yang ada pada sel surya. Pada keadaan tak berbeban timbul tegangan rangkaian terbuka (*open circuit voltage*) pada sel surya. Jika rangkaian listriknya ditutup, arus akan mengalir[3].

Jika lapisan P dan lapisan N dihubungkan dengan beban, maka akan mengalir arus dari lapisan N menuju lapisan P (untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada Gambar (2.11)[4].

Beberapa elektron tidak mampu mencapai kontak dan akan menyatu ulang (*recombine*) pada ikatan elektron bebas dengan atom yang kekurangan elektron terluar (rongga). Panjang difusi dalam hal ini adalah jarak rata-rata elektron pada kisi

kristalnya selama waktu hidupnya hingga menyatu dengan atom yang kehilangan elektron serta terikat dengannya. Panjang difusi tergantung pada jumlah atom pengotornya didalam kristal dan harus cukup besar sehingga cukup untuk sejumlah pembawa muatan mencapai kontak dengan Panjang difusi tergantung pada materialnya. Pada satu atom pengotor kristal (*doping*) ke 10 milyar atom silicon jaraknya 0,5 mm [3].

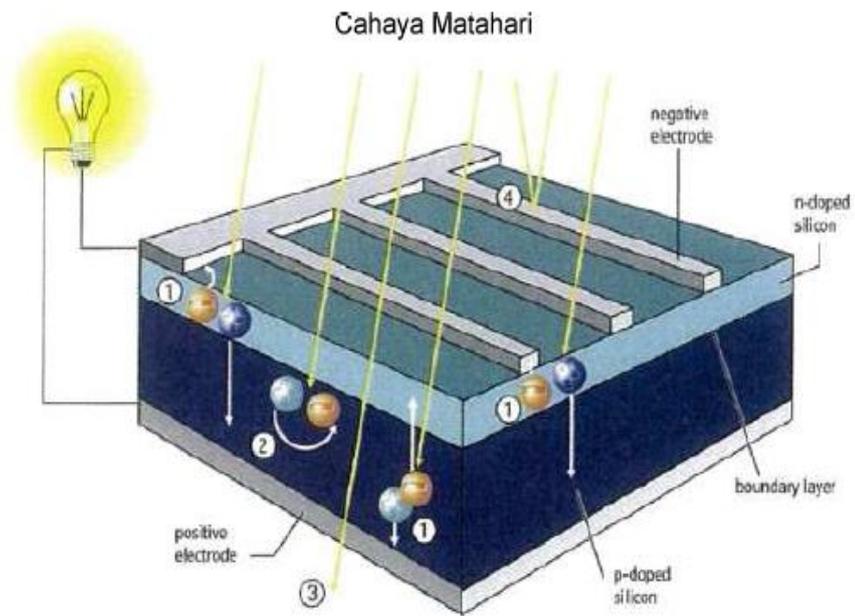


Gambar 2.12 Proses Pembangkit Energi Listrik Pada Sebuah *Photovoltaic* [4]

2.5.2 Perancangan dan Pendayagunaan Sel Surya Silikon *Crystalline*

Sel surya silikon *crystalline* klasik, terdiri dari dua lapisan *doped silicon* yang berbeda. Lapisan yang menghadap cahaya matahari secara negatif di-*dope* dengan fosfor dan lapisan di bawahnya secara positif di-*dope* dengan boron. Pada lapisan batasnya terjadi pemisahan muatan (elektron dan rongga), yang akan terjadi medan listrik jika terkena cahaya matahari. Agar dapat mengambil daya dari sel surya, kontak logam perlu dipaskan pada bagian depan dan belakang sel. Pada bagian belakang sel surya, lapisan kontak di seluruh permukaannya menggunakan material aluminium atau pasta perak. Pada bagian depan, dirancang agar membiarkan cahaya masuk sebanyak

mungkin, biasanya menggunakan material silikon nitrida atau titanium oksida sebagai lapisan anti pantul yang mengurangi pemantulan cahaya[3].



Notes:

1. *charge separation;*
2. *recombination;*
3. *unused photon energi (e.g. transmission);*
4. *reflection and shading caused by front contacts.*

Gambar 2.13 Desain dan Prinsip Kerja Sel *Photovoltaic* [3]

Seperti telah dijelaskan di atas, ketika cahaya mengenai sel surya pembawa muatan akan memisahkannya dan jika suatu beban dihubungkan maka arus akan mengalir. Kerugian terjadi pada sel surya akibat dari penyatuan ulang, pemantulan, dan bayangan yang disebabkan oleh kontak bagian depan. Di samping itu, adanya radiasi gelombang panjang dan pendek yang tidak dapat digunakan. Kerugian pada transmisi

ditunjukkan pada Gambar 2.13. Bagian energi yang tidak digunakan kemudian diserap dan diubah menjadi panas. Masing-masing komponen yang hilang pada sel surya silikon *crystalline* ditunjukkan pada kesetimbangan energi berikut ini[3].

Kesetimbangan energi pada sel surya *crystalline* 100% energi pancaran matahari :

- 3% pemantulan dan bayangan yang disebabkan oleh kontak bagian depan
- 23% energi foton yang terlalu rendah pada radiasi panjang gelombang yang panjang
- 32% energi foton yang terlalu tinggi pada radiasi panjang gelombang yang pendek
- 8,5% hilang akibat penyatuan ulang
- 20% perbedaan potensial pada sel, terutama pada daerah muatan ruang
- 0,5% tahanan seri (rugi secara ohm)
- 13% energi listrik yang dapat dimanfaatkan.

2.5.3 Jenis Solar Cell

Solar cell memiliki jenis yang berbeda tergantung dari bahan yang dipakai, ada kira-kira tiga jenis yang cukup banyak terdapat di pasaran saat ini. Bahan yang dipakai *solar cell* membedakan kualitas dari *solar cell* yaitu kualitas tegangan dan arus. Beberapa jenis *solar cell* antara lain : [3]

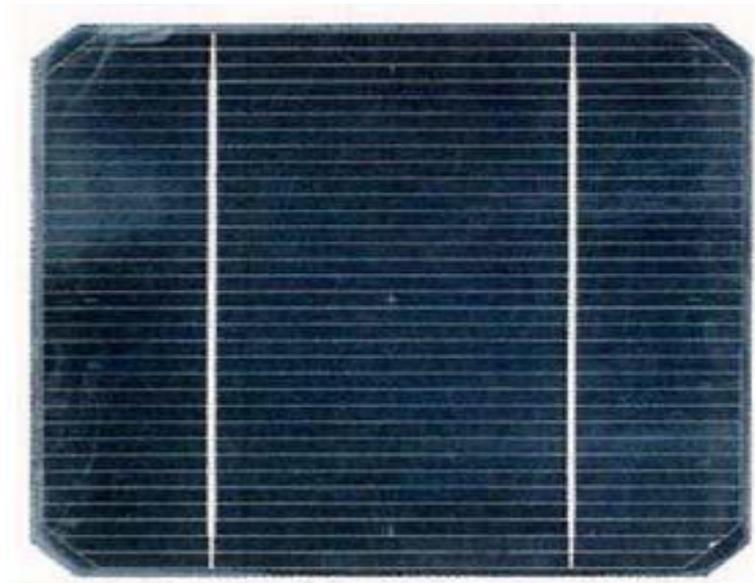
2.5.3.1 Silikon *Crystalline*

Material terpenting dalam sel surya *crystalline* yaitu silikon. Setelah oksigen, silikon adalah elemen terbanyak kedua di bumi, sehingga tersedia dalam jumlah yang hampir tak terbatas. Silikon tersedia tidak dalam bentuk murni, tapi dalam bentuk senyawa kimia dengan oksigen dalam bentuk kuarsa atau pasir [3].

- Sel Silikon *Monocrystalline*

Proses *Czochralski (crucible drawing process)* telah ditetapkan dalam produksi silikon kristal tunggal untuk penggunaan peralatan yang berhubungan dengan bumi (*terrestrial*). Pada proses ini, material awal dari *polycrystalline (polysilicon)* dilelehkan di dalam suatu wadah kuarsa, dengan suhu sekitar 1420⁰C. Sebuah biji kristal dicelupkan ke dalam lelehan silikon tadi dan perlahan-lahan akan tertarik ke atas, keluar dari lelehan. Selama proses ini, kristal akan berubah menjadi bentuk silinder

dengan *monocrystal* dan diameter mencapai 30 cm. Kristal tunggal silinder ini dipotong untuk membentuk batangan semi bulat atau persegi yang kemudian dipotong lagi dengan menggunakan gergaji kawat menjadi lempeng-lempeng tipis dengan tebal sekitar 0,3 mm. Lapisan berbentuk wafer itu lalu dibersihkan dengan pembersihan secara kimia, dengan pengetsaan dan pembilasan untuk menghilangkan sisa-sisa pemotongan dan bekas pemotongan. Dimulai dari lapisan mentah (*raw wafers*) yang telah menjadi *p-doped* dengan boron, lapisan tipis *n-doped* dibuat dengan melalui difusi fosfor. Gas fosfor terdifusi ke dalam ruang pembakaran difusi pada suhu antara 800⁰ C dan 900⁰ C [3]. Sel ini mempunyai efisiensi antara 15% sampai 18% [3].

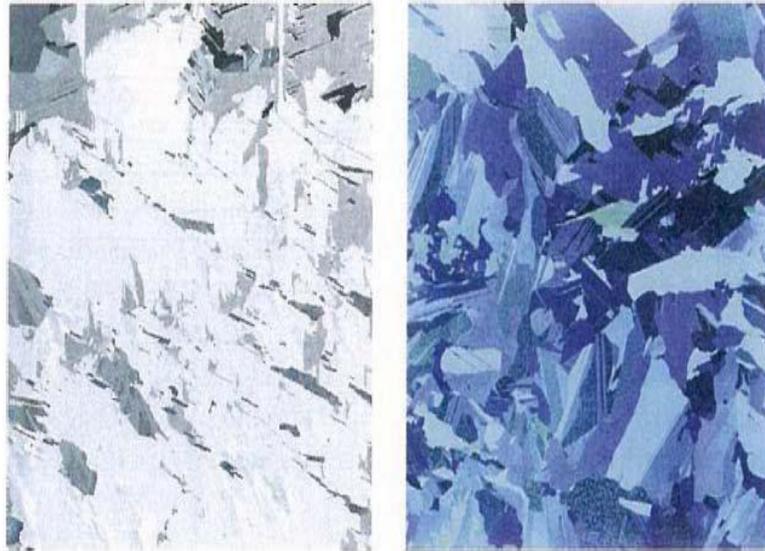


Gambar 2.14 Sel Surya *Monocrystalline* [3]

- Sel Silikon *Polycrystalline*

Material silikon mula-mula dilelehkan didalam wadah kuarsa. Pada metode balok tuang (*block cast method*), balok silikon berukuran besar atau *ingot* akan terbentuk. *Ingot* biasanya dipotong-potong menjadi batangan-batangan dengan menggunakan gergaji pita (*band saw*) dan kemudian dipotong lagi menjadi lempengan-lempengan dengan ketebalan sekitar 0,3 mm dengan menggunakan gergaji kawat.

Setelah pembersihan dan penambahan fosfor, lapisan anti pantul digunakan. Sel ini mempunyai efisiensi antara 13% hingga 16% (dengan AR) [3].



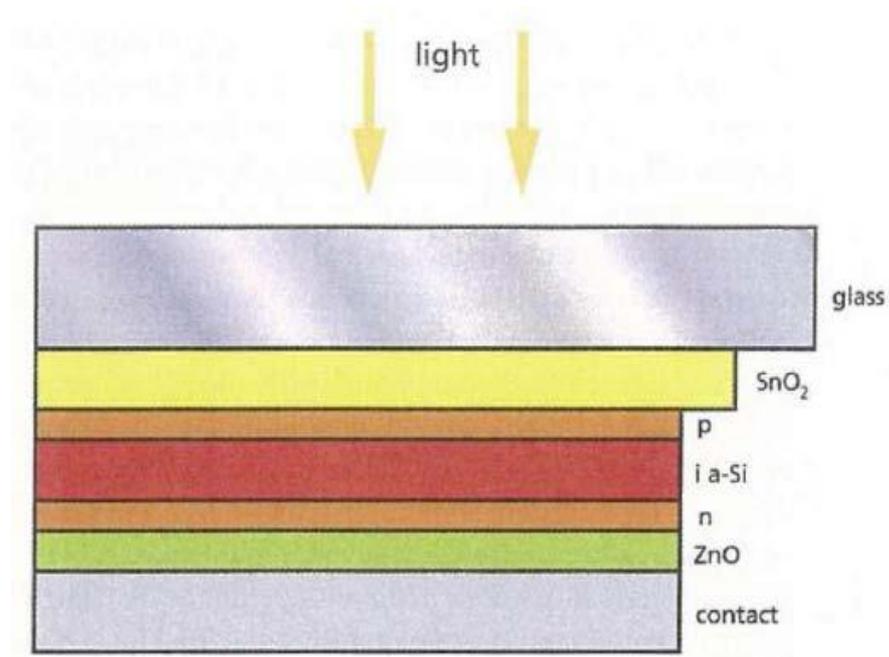
Gambar 2.15 (a) Lapisan *Polycrystalline* tanpa Pelapisan AR,
(b) Lapisan *Polycrystalline* dengan Pelapisan AR [3]

2.5.3.2 Teknologi Sel Film Tipis

Sejak tahun 1990-an, telah terjadi peningkatan pada perkembangan proses film tipis untuk pembuatan sel-sel surya. Dalam hal ini, semi konduktor peka cahaya dipakai sebagai lapisan tipis untuk substrat yang biayanya rendah (kebanyakan kaca) [3]. Salah satu contoh sel film tipis adalah:

- *Silikon Amorphous*

Amorphous berarti tidak memakai kristal struktur atau non kristal, bahan yang digunakan berupa proses film yang tipis dengan efisiensi sekitar 4-6 %. Murni silikon tetapi tanpa kristal dan tidak mahal karena pembuatannya tidak melalui sesuatu yang khusus, juga sangat tidak efisien. Sel surya jenis ini banyak dipakai pada mainan anak-anak, jam dan kalkulator [4].



Gambar 2.16 Struktur Lapisan Sel *Amorphous* [3]

Harga maksimum dari efisiensi sel-sel surya dan modul-modulnya, diringkas pada Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Perbandingan Efisiensi Material Bahan Pembuat *Photovoltaic* [2]

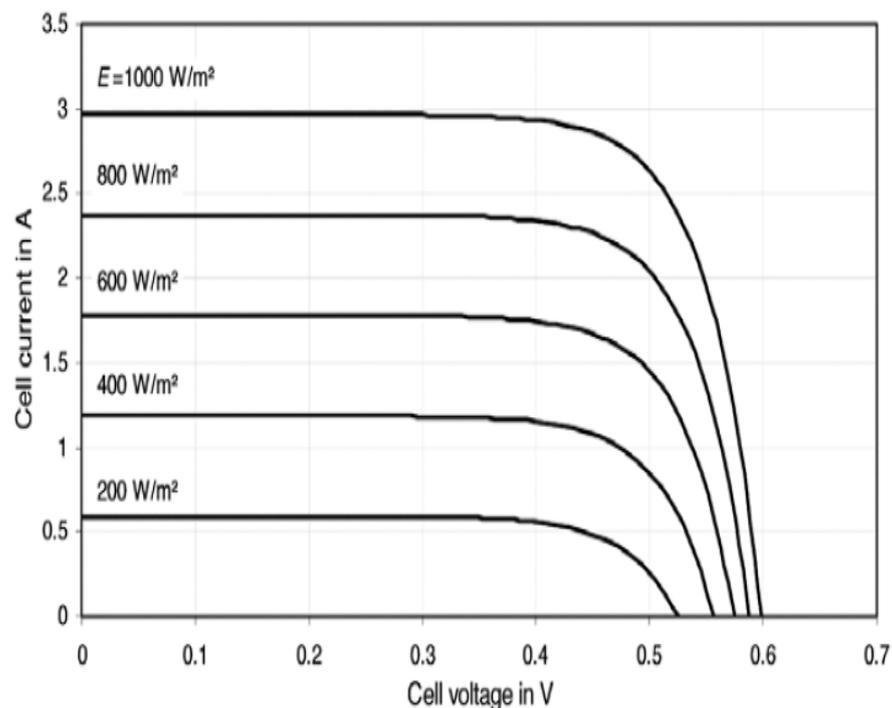
<i>solar cell material</i>	<i>Cell efficiency, η_{cell} (laboratory)</i>	<i>Cell efficiency, η_{cell} (production)</i>	<i>Module efficiency, η_{module} (series production)</i>
<i>Monocrystalline silicon</i>	24.7%	18%	14%
<i>Polycrystalline silicon</i>	19.8%	16%	13%
<i>Ribbon silicon</i>	19.7%	14%	13%
<i>Crystalline thin film silicon</i>	19.2%	9.5%	7.9%
<i>Amorphous silicon</i>	13.0%	10.5%	7.5%

2.5.4 Sifat-sifat Elektrik pada *Photovoltaic*

Sifat elektrik dari sel surya dalam menghasilkan energi listrik dapat diamati dari karakteristik listrik sel tersebut, yaitu berdasarkan arus dan tegangan yang dihasilkan sel surya pada kondisi cahaya dan beban yang berbeda-beda. Karakteristik ini biasanya digambarkan oleh kurva arus-tegangan terminalnya (kurva I-V). Kurva I-V sel surya mempunyai 3 titik utama yaitu arus hubung singkat (I_{sc}), tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), dan titik daya maksimum P [7].

2.5.4.1 Efek Perubahan Pancaran Iradiasi Matahari

Apabila jumlah energi cahaya matahari yang diperoleh sel surya berkurang atau intensitas cahayanya melemah, maka besar tegangan dan arus listrik yang dihasilkan juga akan menurun. Penurunan tegangan relatif lebih kecil dibandingkan penurunan arus listriknya [4]. Gambar 2.17 di bawah ini menunjukkan pengaruh dari iradiasi pada karakteristik I-V dari sel surya.

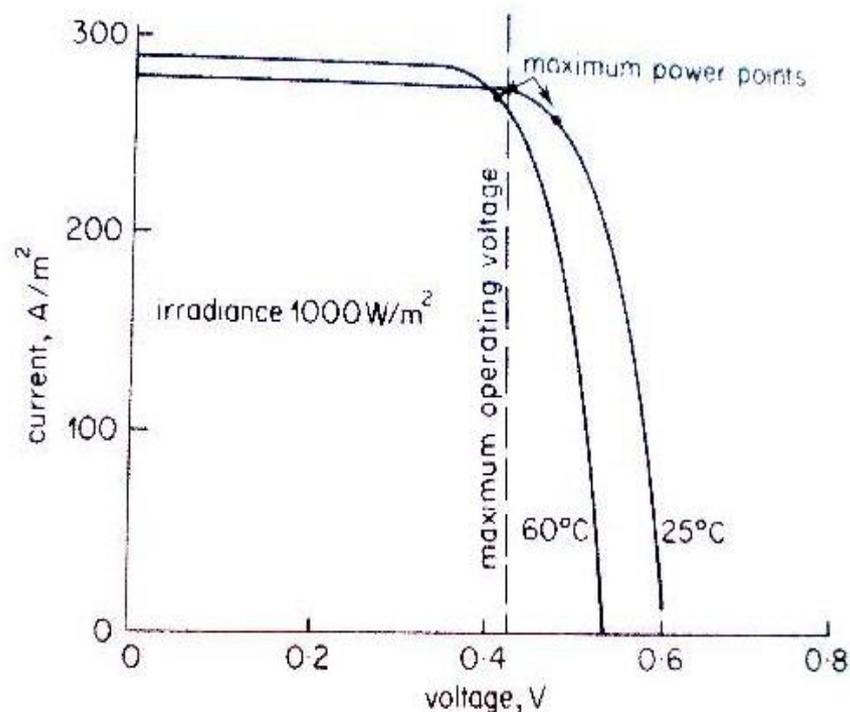


Gambar 2.17 Pengaruh Iradiasi, E pada Karakteristik I-V dari Sel Surya [2]

2.5.4.2 Efek Perubahan Temperatur pada *Photovoltaic*

Temperatur juga mempengaruhi kinerja sel dan efisiensi. Jika sel mendapat lebih dingin, maka menghasilkan lebih daya. Hubungannya bervariasi untuk produk-produk yang berbeda. Pada umumnya, ketika penyinaran pada sel adalah 1 kw/m^2 , temperatur sel kira-kira 30°C lebih tinggi dari udara sekitar [7].

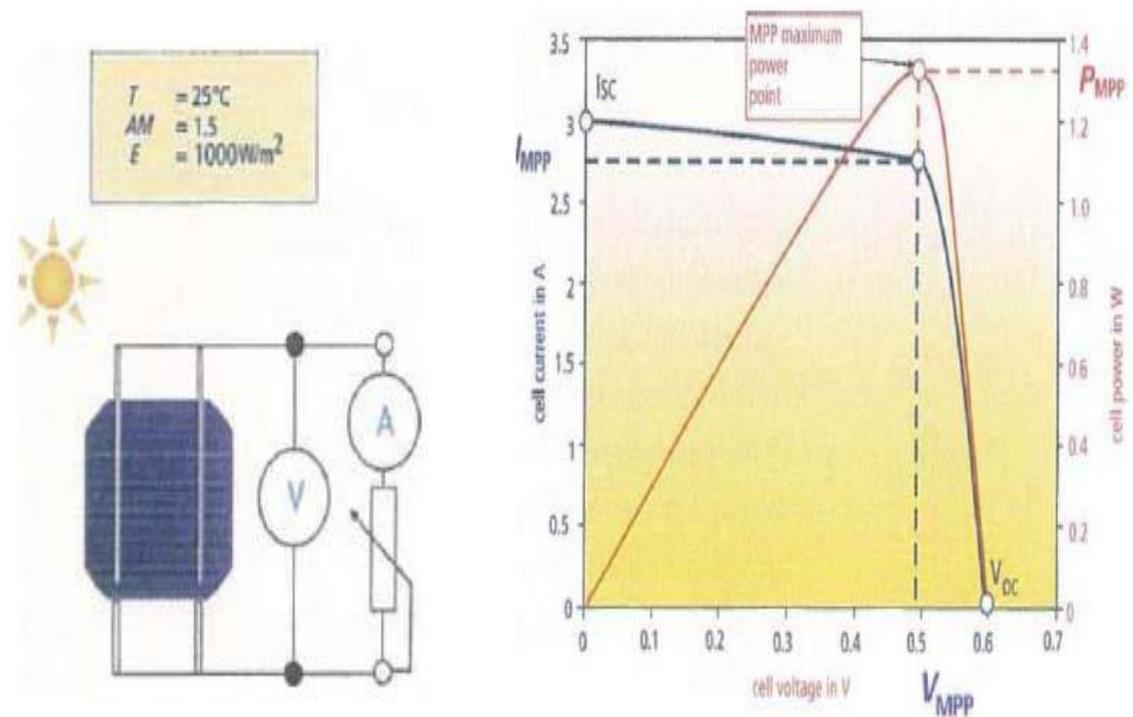
Tegangan yang dihasilkan dari sel surya bergantung dari temperatur sel surya, makin besar temperatur sel surya, tegangan berkurang sekitar $0,0023 \text{ Volt}/^\circ\text{C}$ untuk teknologi silikon *crystalline* atau sekitar $0,0028 \text{ Volt}/^\circ\text{C}$ untuk teknologi film tipis. Daya listrik juga mengalami penurunan sampai $0,5\%/^\circ\text{C}$ untuk teknologi silikon *crystalline* atau sekitar $0,3\%/^\circ\text{C}$ untuk teknologi film tipis. Sementara tegangan mengalami penurunan, sebaliknya arus listrik menunjukkan peningkatan dengan adanya penambahan temperatur. Karakteristik perubahan temperatur pada sel surya diperlihatkan pada gambar 2.18 di bawah ini[7].



Gambar 2.18 Kemampuan *Photovoltaic* pada beberapa Variasi Temperatur dengan *Irradiance* 1000 Watt/ m^2 [4]

2.5.4.3 Parameter-Parameter Sel dan Kurva Karakteristik I-V pada *Photovoltaic*

Penggunaan tegangan dari sel surya bergantung dari bahan semi konduktor yang dipakai. Jika menggunakan bahan silikon, maka tegangan yang dihasilkan dari setiap sel surya berkisar 0,5 V. Tegangan yang dihasilkan dari sel surya bergantung dari pancaran matahari. Untuk arus yang dihasilkan dari sel surya bergantung dari luminasi (kuat cahaya) matahari seperti pada saat cuaca cerah atau mendung. Sebagai contohnya, setiap 100 cm² sel silikon dapat meningkatkan intensitas arus maksimum berkisar 2 A pada waktu intensitas radiasi matahari 1000 W/m² [4].



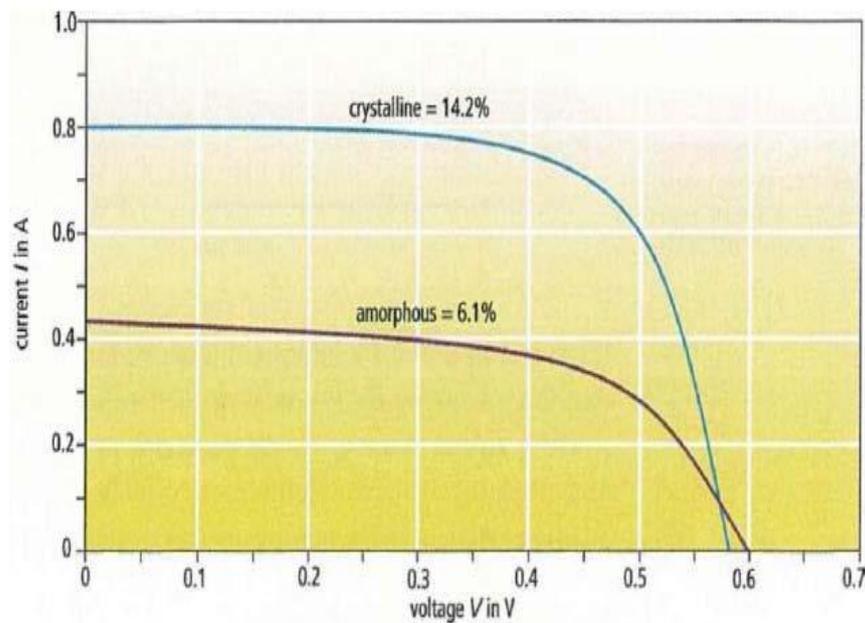
Gambar 2.19 Kurva Karakteristik I-V untuk Sel Surya Silikon *Crystalline* [3]

Untuk dapat membandingkan sel yang berbeda-beda, atau modul PV yang satu dengan yang lainnya, kondisi yang sama ditetapkan untuk menentukan data elektriknya dimana kurva karakteristik I-V pada sel surya dapat dihitung.

Pada dasarnya, kurva I-V digolongkan menjadi 3 antara lain :

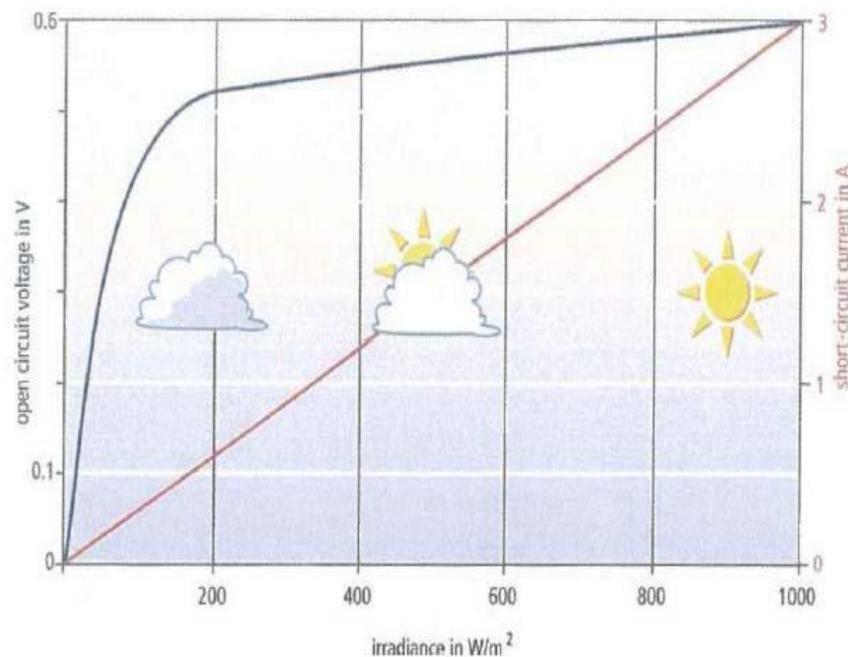
1. Harga titik daya maksimum (MPP) adalah titik pada kurva I-V dimana sel surya bekerja dengan daya maksimum. Untuk titik ini daya (P_{mpp}), arus (I_{mpp}), dan tegangan (V_{mpp}), dapat ditentukan. Daya MPP ini merupakan satuan *peak watt* (WP).
2. Arus hubung singkat (I_{sc}), besarnya mendekati 5% hingga 15% lebih tinggi dari arus MPP. Pada sel-sel standar *crystalline* (10 cm x 10 cm) di bawah STC, maka arus hubung singkat ini (I_{sc}) berada di sekitar angka 3 A.
3. Tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) untuk sel-sel *crystalline*, menunjukkan angka mendekati 0,5 V hingga 0,6 V dan untuk sel-sel tak berbentuk, mendekati 0,6 V hingga 0,9 V.

Parameter-parameter sel dan kurva karakteristik I-V pada sel-sel film tipis berbeda jauh dengan sel-sel silikon *crystalline*. Pada sel-sel tak berbentuk, titik MPP berada pada 0,4 V (lihat Gambar 2.20). Untuk mendapat daya keluaran yang sama dengan sel-sel *crystalline*, dibutuhkan sebuah permukaan sel yang lebih luas[3].



Gambar 2.20 Perbandingan Kurva Karakteristik I-V dari Sel Surya *Crystalline* dan *Amorphous* pada Luas Permukaan Sel 5 cm x 5 cm dan Suhu 28⁰C [3]

Arus pada hubung singkat secara linear bergantung pada besar pancaran matahari. Jika besar pancaran matahari dua kali lipat maka arus juga akan meningkat dua kali lipat, hal ini ditunjukkan pada Gambar 2.21. Tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) secara relatif tetap konstan seiring dengan perubahan besar pancaran matahari. Tetapi ketika nilai besar pancaran matahari menurun mendekati 100 W/m^2 , menyebabkan tegangan menurun drastis. Secara matematis, ada dependensi logaritmik antara tegangan dan pancaran matahari pada sel surya *crystalline*[3].



Gambar 2.21 Tegangan Rangkaian Terbuka dan Arus Hubung Singkat tergantung pada Pancaran Matahari [3]

Keluaran dari sel surya yang berupa arus dan tegangan juga bergantung dari temperatur yang dihasilkan dari sel surya itu sendiri. Temperatur tinggi menyebabkan nilai arus hubungan singkat (I_{sc}) meningkat, sedangkan nilai tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}) menurun (tetapi penurunannya tidak signifikan). Besar dari arus hubungan singkat (I_{sc}) juga dipengaruhi oleh beberapa faktor yang lain[4]:

- Pancaran matahari yang mencapai sel surya

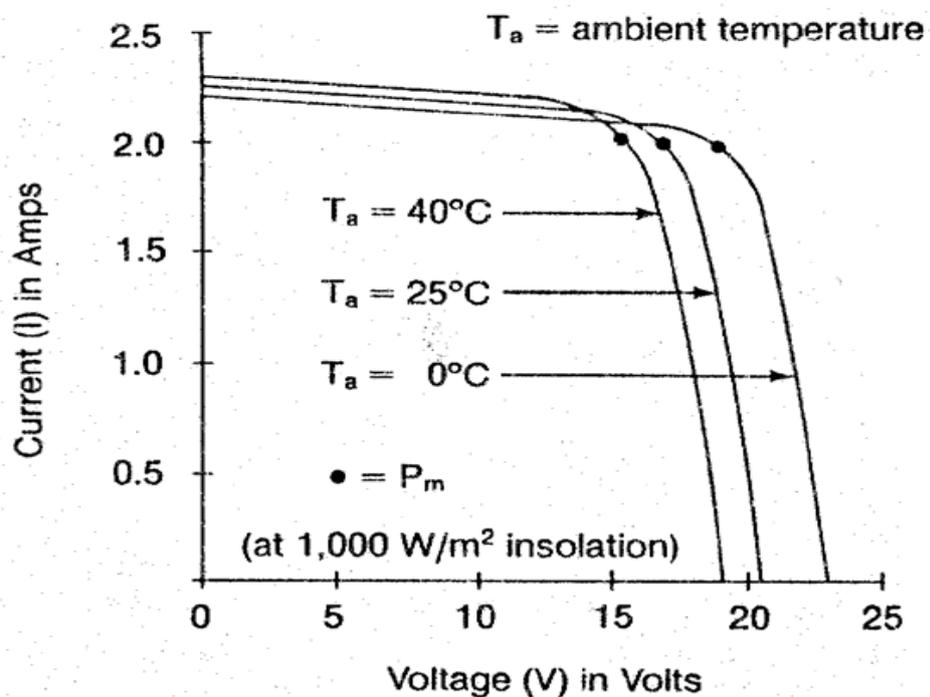
- Jumlah sel surya yang ada di dalam sebuah PV *module*
- Luas area dari tiap sel surya
- Tipe silikon yang digunakan
- Efek rugi-rugi yang ada pada sistem

2.5.5 Faktor Pengoperasian Modul Surya (*Photovoltaic*)

Pengoperasian maximum modul surya sangat tergantung pada [5]:

- Temperatur udara lingkungan

Sebuah modul surya dapat beroperasi secara maksimum jika temperatur modul tetap normal (pada 25⁰C) dan kenaikan temperatur lebih tinggi dari temperatur normal pada PV modul akan melemahkan tegangan (V_{oc}). Setiap kenaikan temperatur modul surya 1⁰ C (dari 25⁰C) akan berkurang sekitar 0,4% pada total tenaga yang dihasilkan atau akan melemah 2 kali lipat untuk kenaikan temperatur modul per 10⁰C[5].

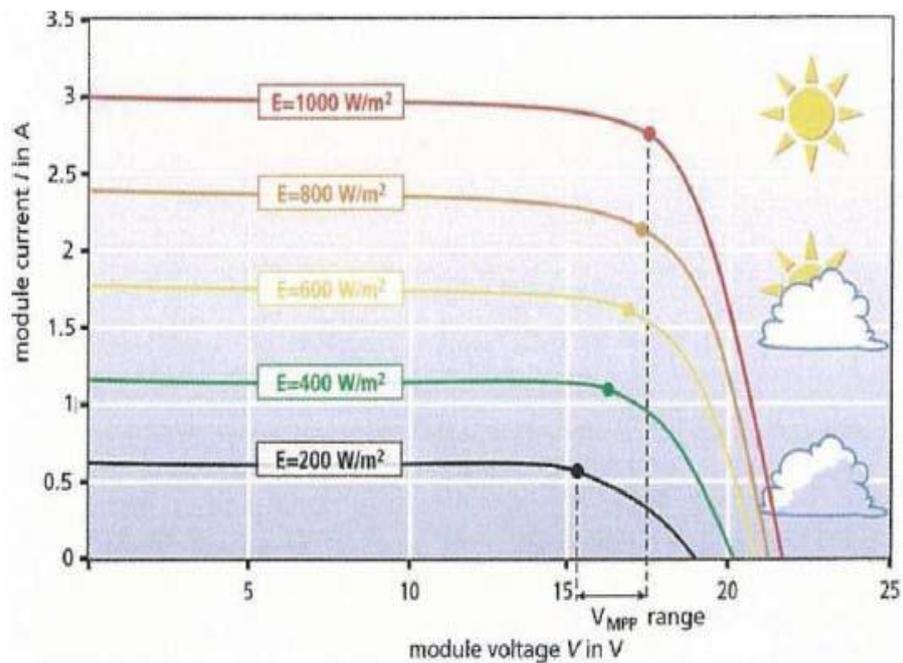


Gambar 2.22 Efek Temperatur Modul pada Tegangan[5]

Koefisien temperatur untuk perubahan tegangan dan arus juga biasanya ditetapkan pada lembar kerja modul PV dalam persentase mV atau mA per °C, hal ini memungkinkan parameter-parameter elektriknya dihitung pada berbagai kondisi temperatur. Jika lembar kerjanya tidak memberikan banyak informasi pada koefisien temperturnya, maka grafik modul silikon *crystalline* yang digambarkan pada gambar 2.20 juga bisa digunakan untuk menentukan parameter-parameter perubahan temperatur [3].

➤ Radiasi matahari (*insolation*)

Radiasi matahari di bumi dan diberbagai lokasi bervariasi dan sangat tergantung keadaan spektrum matahari ke bumi. *Insolation* matahari akan banyak berpengaruh pada arus (I) tetapi sedikit pada tegangan (V)[5].



Gambar 2.23 Kurva I-V dari Modul Surya untuk beberapa Iradiasi dan Temperatur konstan[3].

➤ Kecepatan angin bertiup

Kecepatan angin disekitar lokasi modul PV dapat membantu mendinginkan permukaan temperatur kaca-kaca modul PV [5].

➤ Keadaan atmosfer bumi

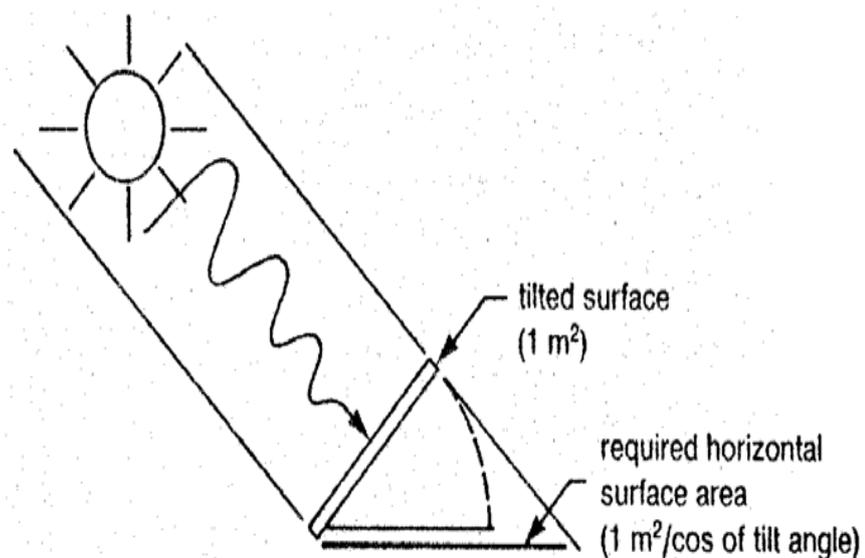
Jenis partikel debu udara, asap, uap air udara (RH), kabut dan polusi sangat menentukan hasil maksimum arus listrik dari modul PV[5].

➤ Orientasi modul surya (*photovoltaic*)

Orientasi modul PV ke arah matahari secara optimum penting agar modul PV dapat menghasilkan energi maksimum. Untuk lokasi yang terletak di belahan utara maka modul PV sebaiknya diorientasikan ke selatan[5].

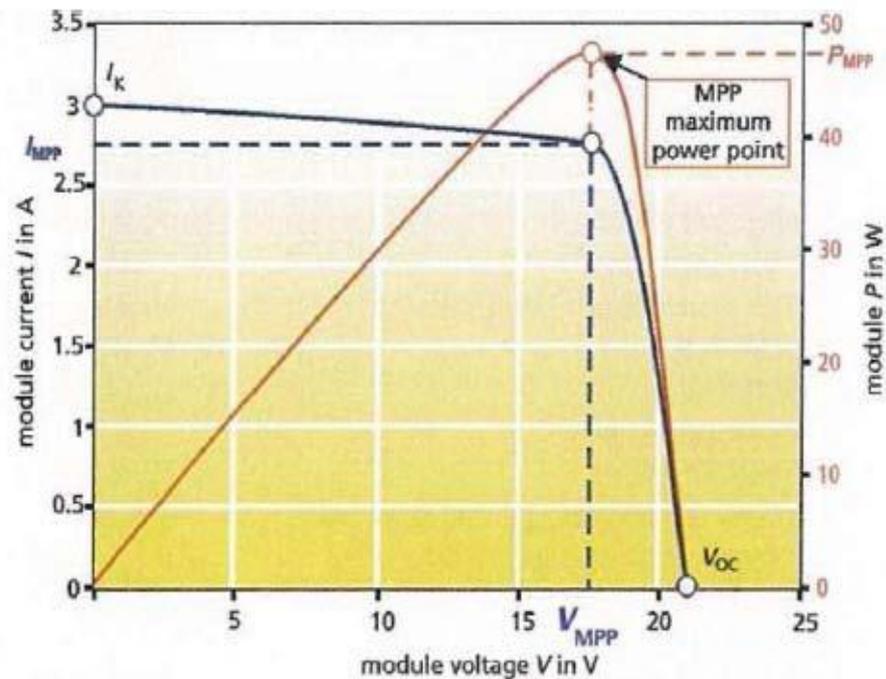
➤ Posisi letak modul surya terhadap matahari (*tilt angle*)

Mempertahankan sinar matahari jatuh ke sebuah permukaan modul PV secara tegak lurus akan mendapatkan energi maksimum $\pm 1000 \text{ W/m}^2$ atau 1 kw/m^2 . Kalau tidak dapat mempertahankan ketegaklurusan antara sinar matahari dengan PV, maka tambahan luasan bidang modul PV dibutuhkan[5].



Gambar 2.24 Extra Luasan Modul PV dalam Posisi Datar[5]

Pada gambar 2.25 menunjukkan kurva karakteristik arus-tegangan (kurva I-V) dan kurva tegangan daya untuk modul berdaya 50 W. Kurva I-V ini dihasilkan dari merangkai 36 sel surya secara seri[3].



Gambar 2.25 Kurva I-V untuk Modul *Mono-crystalline* 50 W[3]

2.5.6 Karakteristik Dari *photovoltaic*

Beberapa karakteristik penting *photovoltaic* terdiri dari tegangan *open circuit* (V_{oc}), arus hubung singkat (I_{sc}), efek perubahan intensitas cahaya matahari, efek perubahan temperatur pada *solar cell* (T_{sc}) dan karakteristik tegangan-arus (*V-I characteristic*) pada *photovoltaic*[6].

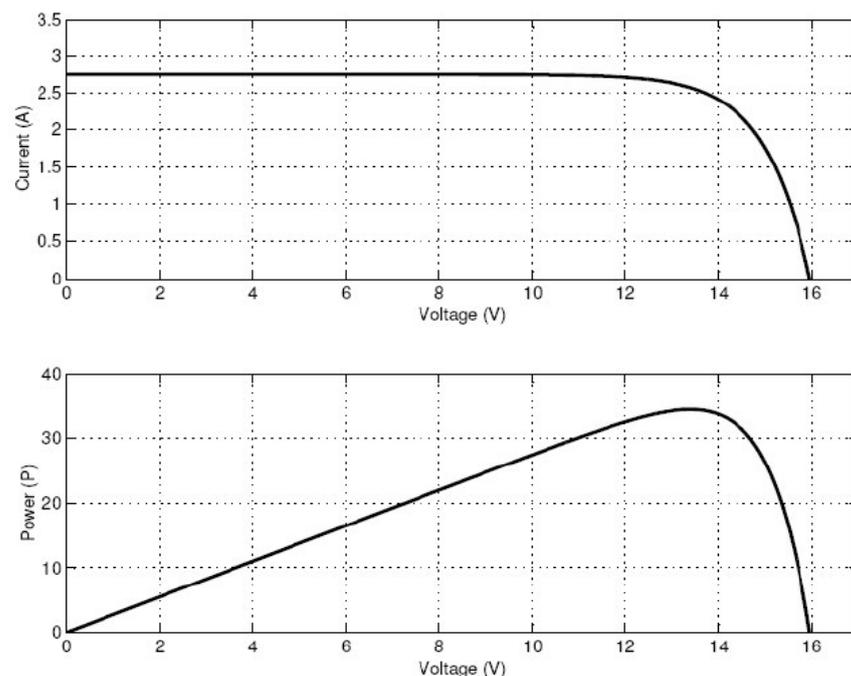
2.5.6.1 Tegangan *Open Circuit* (V_{oc})

V_{oc} adalah tegangan yang dibaca pada saat arus tidak mengalir atau dengan kata lain tegangan maksimum *solar cell* yang terjadi ketika arus hubung singkat sama

dengan nol. Cara untuk mencapai tegangan *open circuit* (V_{oc}) yaitu dengan cara menghubungkan kutub positif dan kutub negatif PV *module* pada multimeter maka akan terlihat pembacaan nilai tegangan *open circuit* sel surya pada multimeter[4].

2.5.6.2 Arus *Short Circuit* (I_{sc})

I_{sc} merupakan arus maksimal yang dapat dihasilkan oleh modul sel surya. Cara untuk mendapatkan nilai I_{sc} yaitu dengan cara menge-*short*-kan kutub positif dengan kutub negatif pada PV *module*, kemudian nilai I_{sc} dibaca pada multimeter sebagai pembaca arus sehingga didapatkan nilai pengukuran arus maksimum pada sel surya[4].

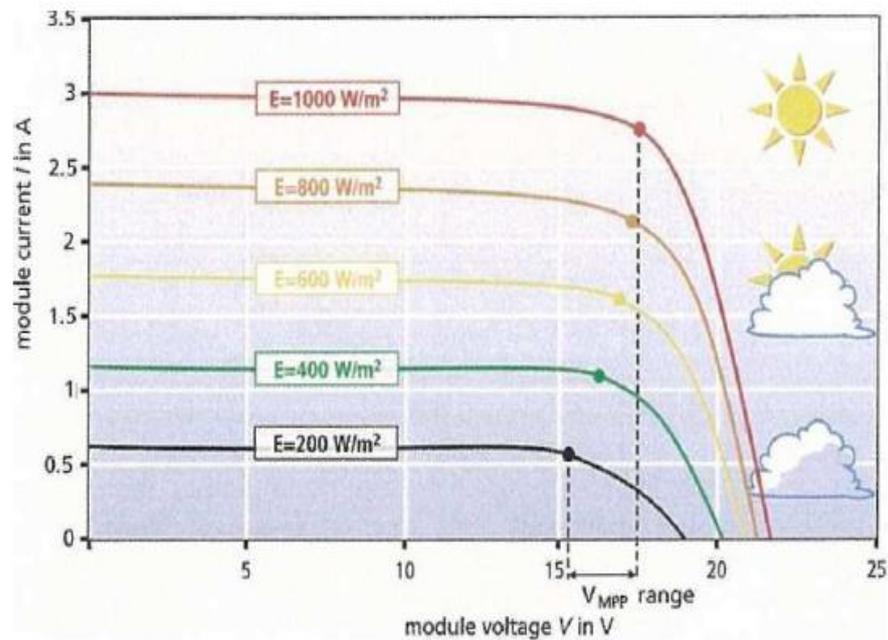


Gambar 2.26 Karakteristik Tegangan Arus dan Kurva Daya[8]

2.6 Efek Perubahan Intensitas Cahaya Matahari

Apabila jumlah energi cahaya matahari yang diperoleh sel surya (*photovoltaic*) berkurang atau intensitas cahayanya melemah, maka besar tegangan dan arus listrik yang dihasilkan juga akan menurun. Penurunan tegangan relatif lebih kecil

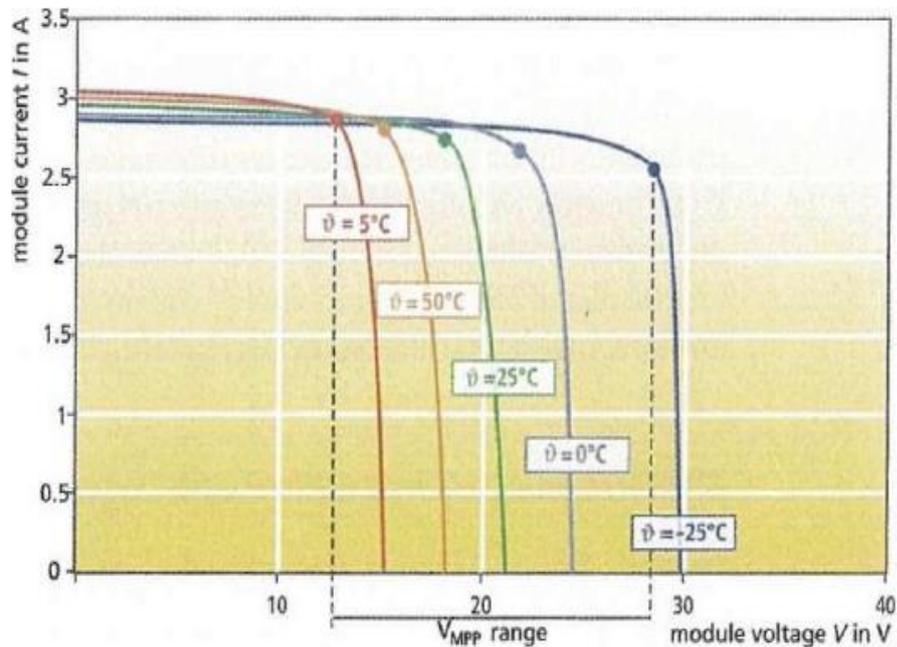
dibandingkan penurunan arus listriknya. Gambar 2.27 di bawah ini memperlihatkan perubahan arus dan tegangan dari sel surya (*photovoltaic*) apabila intensitas cahaya matahari yang diperoleh berubah-ubah nilainya[4].



Gambar.2.27 Kurva I-V Terhadap Tingkat *Irradiance* dan Temperatur yang Tetap[2]

2.7 Efek Perubahan Temperatur Pada *photovoltaic*

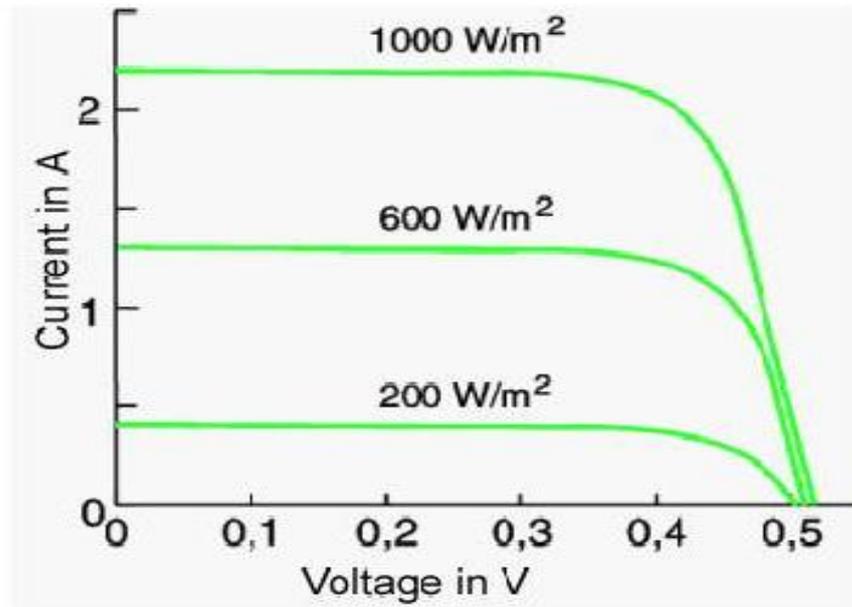
Temperatur juga mempengaruhi kinerja sel dan efisiensi *photovoltaic*, Jika sel surya berada pada kondisi dingin maka akan menghasilkan daya yang lebih besar. Pada umumnya ketika penyinaran pada sel adalah 1 kW/m^2 temperatur sel kira-kira 30°C lebih tinggi dari udara sekitar. Makin besar temperatur sel surya maka tegangan berkurang sekitar $0,0023 \text{ Volt}^\circ\text{C}$ untuk teknologi *crystalline silikon* atau sekitar $0,0028 \text{ Volt}^\circ\text{C}$ untuk teknologi film tipis (*thin film*). Daya listrik juga mengalami penurunan sampai $0,5\%^\circ\text{C}$ untuk teknologi *crystalline silikon* atau sekitar $0,3\%^\circ\text{C}$ untuk teknologi film tipis (*thin film*). Karakteristik perubahan temperatur pada sel surya diperlihatkan pada gambar 2.28.



Gambar 2.28 Kemampuan Sel Surya pada Beberapa Variasi Temperatur[2]

2.8 Karakteristik Tegangan-Arus Pada *photovoltaic*

Penggunaan tegangan dari *photovoltaic* bergantung dari bahan semikonduktor yang dipakai. Jika menggunakan bahan silikon maka tegangan yang dihasilkan dari setiap sel surya berkisar 0,5 V. Tegangan yang dihasilkan dari *photovoltaic* bergantung dari radiasi cahaya matahari. Untuk arus yang dihasilkan dari *photovoltaic* bergantung dari luminasi (kuat cahaya) matahari, seperti pada saat cuaca cerah atau mendung. Sebagai contohnya suatu kristal silikon tunggal *photovoltaic* dengan luas permukaan 100 cm^2 akan menghasilkan sekitar 1,5 Watt dengan tegangan sekitar 0,5 Volt tegangan searah dan arus sekitar 2 Ampere di bawah cahaya matahari dengan panas penuh (intensitas sekitar 1000 W/m^2). Karakteristik perubahan tegangan-arus pada *photovoltaic* diperlihatkan pada gambar 2.29[4].



Gambar2.29 Karakteristik Tegangan-Arus pada Silikon *Photovoltaic*[4]

Kinerja *photovoltaic* dipengaruhi oleh faktor dari dalam dan faktor dari luar. Faktor dalam meliputi bahan semikonduktor, kemurnian material, efek dari proses manufakturnya, serta faktor luar meliputi intensitas matahari dan temperatur sel. Pada umumnya faktor internal hanya dapat diubah dengan pembuatnya. Oleh karena itu, kita hanya dapat mengoptimalkan kinerja sel dengan mengatur faktor *external*[4].

2.9 Daya Dan Efisiensi Pada *Photovoltaic*

Untuk mengetahui berapa nilai daya sesaat yang dihasilkan, kita harus terlebih dulu mengetahui daya yang diterima (daya input), dimana daya tersebut adalah perkalian antara intensitas radiasi matahari yang diterima dengan luas area modul PV dengan persamaan[4] :

$$P_{in} = E \times A \quad (2.7)$$

Dimana:

P = Daya input akibat *irradiance* matahari (Watt)

E = Intensitas radiasi matahari (Watt/m²)

A = Luas area permukaan *photovoltaic module* (m²)

Sedangkan untuk besarnya daya pada *solar cell* (P_{out}) yaitu perkalian tegangan rangkaian terbuka (V_{oc}), dengan arus hubung singkat (I_{sc}), dan *Fill Factor* (FF) yang dihasilkan oleh sel *Photovoltaic* dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut [4]:

$$P_{out} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (2.8)$$

Dimana:

P_{out} = Daya yang dibangkitkan oleh *photovoltaic* (Watt)

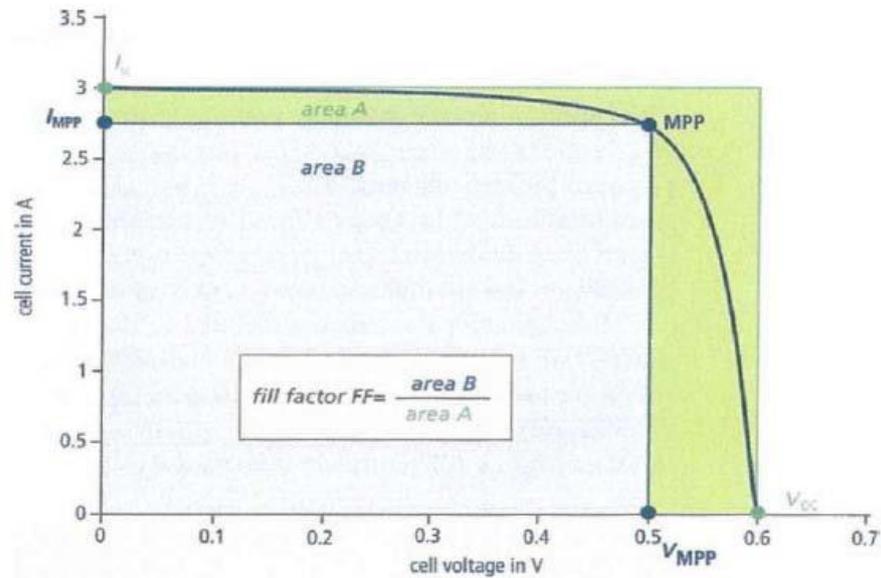
V_{oc} = Tegangan rangkaian terbuka pada *photovoltaic* (Volt)

I_{sc} = Arus hubung singkat pada *photovoltaic* (Ampere)

FF = *Fill Factor*

2.10 *Fill Factor* (FF)

merupakan parameter yang menentukan daya maksimum dari *photovoltaic* dalam kaitannya dengan I_{sc} dan V_{oc} . *Fill factor* didefinisikan sebagai rasio daya maksimum *photovoltaic* terhadap hasil kali V_{oc} dan I_{sc} . *Fill factor* juga merupakan ukuran besarnya deviasi karakteristik I-V terhadap kurva ideal dioda. Nilai *Fill factor* ini umumnya sebesar 0,75-0,85. Selain itu *Fill factor* merupakan indikator dari kualitas metalisasi kontak yang bergantung pada resistansi total pada sebuah *photovoltaic*. Resistansi total tersebut meliputi resistansi seri (R_s) dan resistansi parallel (R_p). Besarnya *Fill factor* dapat dihitung dengan menggunakan rumus[4].



Gambar2.30 Faktor pengisian dari Modul Surya[3]

$$FF = \frac{V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0.72)}{V_{oc} + 1} \quad (2.9)$$

Sedangkan untuk menentukan efisiensi panel surya dengan membagikan daya masukan dengan daya keluaran dikali 100 % yaitu dengan menggunakan rumus :

$$\text{Efisiensi} = (p_{out}/p_{in}) \times 100\% \quad (2.10)$$

Efisiensi yang terjadi pada *photovoltaic* merupakan perbandingan daya yang dapat dibandingkan oleh *photovoltaic* dengan energi input yang diperoleh dari *irradiance* matahari. efisiensi yang digunakan adalah efisiensi sesaat pada pengambilan data[4].

$$\eta = \frac{\text{ouput}}{\text{input}} \times 100\% \quad (2.11)$$

Sehingga efisiensi yang dihasilkan :

$$\eta = \frac{P}{I_r \times A} \times 100\% \quad (2.12)$$

Dimana :

η = Efisiensi *photovoltaic* (%)

I_r = Intensitas radiasi matahari (Watt/m²)

P = Daya output yang dibangkitkan oleh *photovoltaic* (Watt)

A = Luasan Permukaan modul surya atau *photovoltaic* (m²)