

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Energi Matahari

Matahari memasok energi ke bumi dalam bentuk radiasi. Tanpa radiasi dari matahari, maka kehidupan di bumi tidak akan berjalan. Setiap tahunnya ada sekitar 3.9×10^{24} Joule $\sim 1.08 \times 10^{18}$ kWh energi matahari yang mencapai permukaan bumi, ini berarti energi yang diterima bumi dari matahari adalah 10.000 kali lebih banyak dari permintaan energi primer secara global tiap tahunnya dan lebih banyak dari cadangan ketersediaan keseluruhan energi yang ada di bumi. Intensitas radiasi matahari diluar atmosfer bumi tergantung pada jarak antara bumi dengan matahari. sepanjang tahun, jarak antara matahari dengan bumi bervariasi antara $1,47 \times 10^8$ km sampai $1,52 \times 10^8$ km. Akibatnya, irradiance G_{sc} berfluktuasi antara 1.325 W/m^2 sampai 1412 W/m^2 . Nilai rata-rata dari irradiance ini disebut dengan solar constant (konstanta surya). Konstanta Surya $G_{sc} = 1.367 \text{ W/m}^2$.

Nilai konstan ini bukanlah besarnya radiasi yang sampai dipermukaan bumi. Atmosfir bumi mereduksi atau mengurangi radiasi matahari tersebut melalui proses pemantulan, penyerapan (oleh ozon, uap air, oksigen dan karbon dioksida) dan penghamburan (oleh molekul-molekul udara, partikel debu atau polusi). Untuk cuaca yang cerah pada siang hari, irradiant yang mencapai permukaan bumi adalah 1.000 W/m^2 . Nilai ini relatif terhadap lokasi. Insolasi (energi radiasi) maksimum terjadi pada hari yang cerah namun berawan

sebagian. Ini karena pemantulan radiasi matahari oleh awan sehingga insolasi (energi radiasinya) dapat mencapai 1.400 W/m^2 untuk periode yang singkat.

Pancaran matahari merupakan radiasi elektromagnetik yang luar biasa banyak. Dalam kaitannya dengan sel surya yaitu perangkat pengkonversi radiasi matahari menjadi listrik, terdapat dua parameter penting dalam energi surya: pertama intensitas radiasi, yaitu jumlah daya matahari yang datang kepada permukaan per luas area, dan karakteristik spektrum cahaya matahari.

Energi surya terpancar hingga ke bumi berupa paket-paket energi yang disebut foton. Total kekuatan radiasinya mencapai $3,83 \times 10^{23}$ kilowatt (kW). Namun demikian sebagian besar dari radiasi ini hilang di angkasa. Radiasi surya dipancarkan dari fotosphere matahari pada temperatur 6000 K , yang memberikan distribusi spektrumnya mirip dengan distribusi spectrum black body. Dengan melalui atmosfer bumi, radiasi surya diatenuasikan oleh berbagai partikel diantaranya molekul udara, aerosol, partikel debu, dll.

Hubungan Matahari dan Bumi :

Matahari adalah suatu bola pejal yang terbentuk dari material bersiat gas yang sangat panas. Diameter matahari $1,39 \times 10^9 \text{ m}$ dan jarak rata-rata matahari dari bumi adalah $1,5 \times 10^{11} \text{ m}$. Temperatur dibagian pusat sekitar 8×10^6 hingga 10^6 K dan massa jenisnya sekitar seratus (100) kali berat jenis air. Matahari merupakan efek reaksi fusi yang terjadi secara terus-menerus dengan komponen gas-gasnya berada pada suatu wadah penampung.

Diperkirakan bahwa 90% energi matahari diproduksi pada daerah 0 sampai $0,23R$ (R adalah jari-jari matahari), 40% dari masa matahari terkandung pada

daerah ini. Pada daerah $0,7R$ dari pusat temperatur jauh menurun sampai sekitar 130.000 K dan massa jenis jauh menurun sampai 70 kg/m^3 disini proses konveksi mulai menjadi bagian yang penting dan zona $0,7$ sampai $1R$ dikenal dengan *convection zone*. Lapisan paling luar dari *convection zone* disebut *photosphere*. Pada lapisan ini gas-gas yang telah tersusun terionisasi sangat kuat dan mampu mengabsorpsi dan mengemisikan spectrum radiasi secara terus menerus. *Photosphere* merupakan sumber dari radiasi matahari (Duffie, 1991).

Energi thermal dari cahaya matahari adalah jenis energi yang terbarukan. Panjang gelombang radiasi matahari yang diterima di permukaan bumi berada pada daerah $0,29$ sampai $2,5\text{ }\mu\text{m}$. emisi radiasi dari matahari ke bumi menghasilkan intensitas radiasi surya yang hampir tetap diluar atmosfer bumi. *Solar Constant* (konstanta surya) $G_{sc} = 1367\text{ W/m}^2$ (*World Radiation Center* (WRC)) merupakan energi dari matahari setiap satuan waktu yang diterima suatu satuan area permukaan tegak lurus dengan arah perambatan radiasi pada jarak rata-rata bumi-matahari, di luar atmosfer.

B. Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor atau alih bahang (*heat transfer*) ialah ilmu untuk meramalkan perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan suhu di antara benda atau material. Dari termodinamika telah kita ketahui bahwa energi yang pindah itu dinamakan kalor atau bahang atau panas (*heat*). Ilmu perpindahan kalor tidak hanya mencoba menjelaskan bagaimana energi kalor itu berpindah dari suatu benda ke benda lain, tetapi juga dapat meramalkan laju perpindahan yang terjadi pada kondisi-kondisi tertentu. Kenyataan di sini

yang menjadi sasaran analisis ialah masalah laju perpindahan, inilah yang membedakan ilmu perpindahan kalor dari ilmu termodinamika. Termodinamika membahas sistem dalam keseimbangan, ilmu ini dapat digunakan untuk meramal energi yang diperlukan untuk mengubah sistem dari suatu keadaan seimbang ke keadaan seimbang lain, tetapi tidak dapat meramalkan kecepatan perpindahan itu. Hal ini disebabkan karena pada waktu proses perpindahan itu berlangsung, sistem tidak berada dalam keadaan seimbang. Ilmu perpindahan kalor melengkapi hukum pertama dan kedua termodinamika, yaitu dengan memberikan beberapa kaidah percobaan yang dapat dimanfaatkan untuk menentukan perpindahan energi. Sebagaimana juga dalam ilmu termodinamika, kaidah-kaidah percobaan yang digunakan dalam masalah perpindahan kalor cukup sederhana, dan dapat dengan mudah dikembangkan sehingga mencakup berbagai ragam situasi praktis (Holman, 1983).

1. Perpindahan Kalor Konduksi

Perpindahan kalor konduksi adalah perpindahan tenaga sebagai kalor melalui sebuah proses medium stasioner, seperti tembaga, air, atau udara. Di dalam benda-benda padat maka perpindahan tenaga timbul karena atom-atom pada temperatur yang lebih tinggi bergetar dengan lebih bergairah, sehingga atom-atom tersebut dapat memindahkan tenaga kepada atom-atom yang lebih lesu yang berada di dekatnya dengan kerja mikroskopik, yakni kalor. Di dalam logam-logam, elektron-elektron bebas juga membuat kontribusi kepada proses hantaran kalor. Di dalam sebuah cairan atau gas, molekul-molekul juga giat (mudah bergerak), dan tenaga

juga dihantar oleh tumbukan-tumbukan molekul (Reynold dan Perkins, 1983).

Perpindahan kalor konduksi satu dimensi melalui padatan diatur oleh hukum Fourier, yang dalam bentuk satu dimensi dapat dinyatakan sebagai,

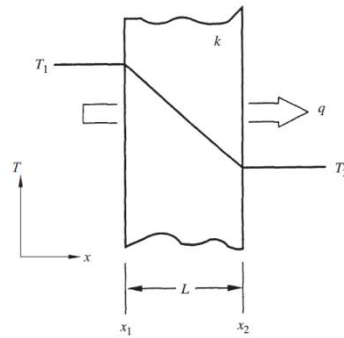
$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (2.1)$$

di mana q adalah arus panas, k konduktivitas termal medium, A itu penampang luas untuk aliran panas, dan dT / dx gradien suhu, membutuhkan penyisipan tanda minus di persamaan (2.1) untuk menjamin panas positif aliran q . Perbedaan suhu yang dihasilkan dari difusi *steady-state* panas dengan demikian berkaitan dengan konduktivitas termal dari material, luas penampang A , dan panjang jalur L (seperti Gambar 2.1), menjadi,

$$(T_1 - T_2)cd = q \frac{L}{kA} \quad (2.2)$$

Bentuk persamaan (2.2), dimana k dan A diduga konstan, menunjukkan bahwa dengan cara yang analog dengan hukum Ohm mengatur aliran arus listrik melalui hambatan, adalah mungkin untuk menentukan hambatan konduktivitas termal.

$$R_{cd} = \frac{T_1 - T_2}{kA} \quad (2.3)$$



Gambar 2.1. Perpindahan Kalor Konduksi Melalui Lempengan
(Bejan dan Kraus, 1948)

Persamaan (2.1) merupakan persamaan dasar tentang konduktivitas termal. Berdasarkan rumusan itu maka dapatlah dilaksanakan pengukuran dalam percobaan untuk menentukan konduktivitas termal berbagai bahan. Untuk gas-gas pada suhu agak rendah, pengolahan analitis teori kinetik gas dapat dipergunakan untuk meramalkan secara teliti nilai-nilai yang diamati dalam percobaan.

Mekanisme konduksi termal pada gas cukup sederhana. Energi kinetik molekul ditunjukkan oleh suhunya, jadi pada bagian bersuhu tinggi molekul-molekul mempunyai kecepatan yang lebih tinggi daripada yang berada pada bagian bersuhu rendah. Molekul-molekul itu selalu berada dalam gerakan rambang atau acak, saling bertumbukkan satu sama lain, di mana terjadi pertukaran energi dan momentum. Jika suatu molekul bergerak dari daerah bersuhu tinggi ke daerah bersuhu rendah, maka molekul itu mengangkut energi kinetik ke bagian sistem yang suhunya lebih rendah, dan di sini menyerahkan energinya pada waktu bertumbukkan dengan molekul yang energinya lebih rendah. Jika aliran kalor dinyatakan dalam watt, satuan untuk konduktivitas termal itu ialah

watt per meter per derajat Celsius. Nilai konduktivitas termal itu menunjukkan berapa cepat kalor mengalir dalam bahan tertentu.

Energi termal dihantarkan dalam zat padat menurut salah satu dari dua modus berikut : melalui getaran kisi (*lattice vibration*) atau dengan angkutan melalui elektron bebas. Dalam konduktor listrik yang baik, dimana terdapat elektron bebas yang bergerak di dalam struktur kisi bahan-bahan, maka elektron, di samping dapat mengangkut muatan listrik, dapat pula membawa energi termal dari daerah bersuhu tinggi ke daerah bersuhu rendah, sebagaimana halnya dalam gas. Energi dapat pula berpindah sebagai energi getaran dalam struktur kisi bahan. Namun, pada umumnya perpindahan energi melalui getaran ini tidaklah sebanyak dengan cara angkutan elektron. Karena itu penghantar listrik yang baik selalu merupakan penghantar kalor yang baik pula, seperti halnya tembaga, aluminium dan perak. Sebaliknya isolator listrik yang baik merupakan isolator kalor (Holman, 1983).

2. Perpindahan Kalor Radiasi

Perpindahan kalor radiasi adalah perpindahan tenaga oleh penjalaran (rambatan) foton yang tak terorganisir. Setiap benda yang terus memancarkan foton-foton secara serampangan di dalam arah dan waktu, dan tenaga netto yang dipindahkan oleh foton-foton ini diperhitungkan sebagai kalor. Bila foton-foton ini berada di dalam jangkauan panjang gelombang 0,38 sampai 0,76 μm , maka foton-foton tersebut mempengaruhi mata kita sebagai sinar cahaya yang tampak (dapat dilihat). Bertentangan dengan itu, maka setiap tenaga foton yang terorganisir,

seperti transmisi radio, dapat diidentifikasi secara mikroskopik dan tak dipandang sebagai kalor.

Bila foton-foton yang diradiasikan mencapai permukaan lain, maka foton-foton tersebut baik diserap, direfleksikan, maupun diteruskan melalui permukaan tersebut. Tiga sifat-sifat permukaan yang mengukur kuantitas-kuantitas ini adalah:

- a. α absorptivitas, bagian radiasi yang masuk yang diserap
- b. ρ reflektivitas, bagian radiasi yang masuk yang direfleksikan
- c. τ transmittivitas, bagian radiasi yang masuk yang ditransmisikan

Dari pertimbangan-pertimbangan tenaga tenaga maka,

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.4)$$

Tenaga yang direfleksikan tersebut dapat merupakan difusi (*diffuse*), dimana refleksi tak bergantung dari sudut radiasi yang masuk, maupun merupakan spekular (*specular*), di mana sudut refleksi menyamai sudut masuk. Kebanyakan permukaan teknik menunjukkan kombinasi kedua jenis refleksi tersebut.

Fluks radiasi tenaga [Btu/(h.kaki²)] dari sebuah permukaan didefinisikan sebagai daya pancar (*emissive power*) E. Pertimbangan termodinamika memperlihatkan bahwa E adalah sebanding dengan pangkat 4 dari temperature absolute.

Untuk sebuah benda dengan $\alpha = 1, \rho = \tau = 0$ (sebuah benda hitam),

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.5)$$

Di mana σ adalah konstanta Stefan Boltzmann,

$$\begin{aligned}\sigma &= 5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \\ &= 0,1714 \times 10^{-8} \text{ Btu / (h. kaki}^2 \cdot \text{R}^4)\end{aligned}$$

Oleh karena itu benda nyata tidak berwarna “hitam”, benda tersebut memancarkan energi yang lebih sedikit dibandingkan dengan suatu benda hitam pada suhu yang sama. Perbandingan antara daya pancar nyata terhadap daya pancar benda hitam dinyatakan dengan *emisivitas* ϵ , di mana

$$\epsilon = \frac{E}{E_b} \quad (2.6)$$

dengan E = Daya pancar benda nyata

E_b = Daya pancar benda hitam

Pada banyak bahan, emisivitas dan absorbtivitas dapat dianggap sama.

Bahan ini dikelompokkan ke dalam benda kelabu (*gray bodies*), dan

$$\epsilon = \alpha \quad (2.7)$$

Ciri khas pertukaran enegi radiasi yang penting lagi adalah sifatnya yang menyebar secara merata ke segala arah. Karena itu hubungan geometric antara kedua permukaan akan mempengaruhi pertukaran energi radiasinya.

Hubungan geometri dapat diterangkan dan dihitung dengan memperhatikan faktor bentuk F_A .

Sifat optika permukaan, yaitu emisivitas, absorpsivitas, reflektivitas, dan transmisivitas juga mempengaruhi laju perpindahan kalor radiasi. Jika pengaruh ini dinyatakan dengan suatu faktor F_ϵ , maka pertukaran energi secara radiasi dapat dinyatakan dengan,

$$q_{1-2} = \sigma A F_\epsilon F_A (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.8)$$

3. Perpindahan Kalor Konveksi

Bila sebuah fluida lewat di atas sebuah permukaan padat panas, maka tenaga dipindahkan kepada fluida dari dinding oleh panas hantaran. Tenaga ini kemudian diangkut atau dikonveksikan (*convected*), ke hilir oleh fluida, dan didifusikan melalui fluida oleh hantaran di dalam fluida tersebut. Jenis proses perpindahan tenaga ini dinamakan perpindahan tenaga konveksi (*convection heat transfer*).

Jika proses aliran fluida tersebut diinduksikan oleh sebuah pompa atau sistem pengedar (*circulating system*) yang lain, maka digunakan istilah konveksi yang dipaksakan (*forced convection*). Bertentangan dengan itu, jika aliran fluida timbul karena daya apung fluida yang disebabkan oleh pemanasan, maka proses tersebut dinamakan konveksi bebas (*free*) atau konveksi alami (*natural*).

Banyak parameter yang mempengaruhi perpindahan kalor konveksi di dalam sebuah geometri khusus. Parameter-parameter ini termasuk skala panjang sistem (L), konduktivitas termal fluida (k), biasanya kecepatan fluida (V), kerapatan (ρ), viskositas (μ), panas jenis (C_p), dan kadangkadangkang faktor lain yang berhubungan dengan cara-cara pemanasan (temperatur dinding uniform atau temperatur dinding berubah-ubah). Fluks kalor dari permukaan padat akan bergantung juga pada temperatur permukaan (T_s) dan temperatur fluida (T_f), tetapi biasanya dianggap bahwa ($\Delta T = T_s - T_f$) yang penting. Akan tetapi, jika sifat-sifat fluida berubah dengan nyata pada daerah pengkonveksi (*convection region*), maka temperatur-temperatur absolute T_s dan T_f dapat juga merupakan

faktor-faktor penting didalam korelasi. Jelaslah bahwa dengan sedemikian banyak variable-variabel penting, maka korelasi spesifik akan sulit dipakai, dan sebagai konsekuensinya maka korelasi-korelasi biasanya disajikan dalam pengelompokkan-pengelompokkan tak berdimensi (*dimensionless groupings*) yang mengizinkan representasi-representasi yang jauh lebih sederhana. Juga faktor-faktor dengan pengaruh yang kurang penting, seperti variasi sifat fluida dan distribusi temperatur dinding, seringkali diabaikan untuk menyederhanakan korelasi-korelasi tersebut (Stoecker dan Jones, 1977).

C. Photovoltaic

Panel Photovoltaic (PV panel) adalah sumber listrik pada sistem pembangkit listrik tenaga surya, material semikonduktor yang mengubah secara langsung energi sinar matahari menjadi energi listrik. Daya listrik yang dihasilkan PV berupa daya DC. Istilah “photovoltaic” ini telah digunakan dalam bahasa Inggris sejak tahun 1849. Tenaga listrik dari cahaya matahari pertama kali ditemukan oleh Alexandre – Edmund Becquerel seorang ahli fisika Perancis pada tahun 1839. Temuannya ini merupakan cikal bakal teknologi solar cell. Percobaannya dilakukan dengan menyinari 2 elektrode dengan berbagai macam cahaya. Elektrode tersebut di balut (coated) dengan bahan yang sensitif terhadap cahaya, yaitu AgCl dan AgBr dan dilakukan pada kotak hitam yang dikelilingi dengan campuran asam. Dalam percobaannya ternyata tenaga listrik meningkat manakala intensitas cahaya meningkat. Selanjutnya penelitian dari Bacquerel dilanjutkan oleh peneliti-peneliti lain. Tahun 1873 seorang insinyur Inggris Willoughby Smith menemukan Selenium sebagai suatu elemen *photo conductivity*. Kemudian tahun 1876, William Grylls dan

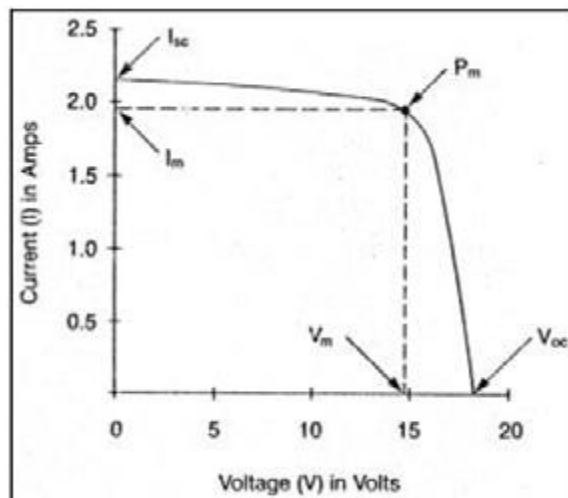
Richard Evans Day membuktikan bahwa Selenium menghasilkan arus listrik apabila disinari dengan cahaya matahari. Hasil penemuan mereka menyatakan bahwa Selenium dapat mengubah tenaga matahari secara langsung menjadi listrik tanpa ada bagian bergerak atau panas. Sehingga disimpulkan bahwa solar cell sangat tidak efisien dan tidak dapat digunakan untuk menggerakkan peralatan listrik.

Tahun 1894 Charles Fritts membuat *Solar Cell* pertama yang sesungguhnya yaitu suatu bahan *semi conductor (selenium)* dibalut dengan lapisan tipis emas. Tingkat efisiensi yang dicapai baru 1% sehingga belum juga dapat dipakai sebagai sumber energi, namun kemudian dipakai sebagai sensor cahaya. Tahun 1905 Albert Einstein mempublikasikan tulisannya mengenai *photoelectric effect*. Tulisannya ini mengungkapkan bahwa cahaya terdiri dari paket-paket atau "*quanta of energi*" yang sekarang ini lazim disebut "photon." Teorinya ini sangat sederhana tetapi revolusioner. Kemudian tahun 1916 pendapat Einstein mengenai *photoelectric effect* dibuktikan oleh percobaan Robert Andrew Millikan seorang ahli fisika berkebangsaan Amerika dan ia mendapatkan Nobel Prize untuk karya *photoelectric effect*. Tahun 1923 Albert Einstein akhirnya juga mendapatkan Nobel Prize untuk teorinya yang menerangkan *photoelectric effect* yang dipublikasikan 18 tahun sebelumnya. Hingga tahun 1980 an efisiensi dari hasil penelitian terhadap solar cell masih sangat rendah sehingga belum dapat digunakan sebagai sumber daya listrik. Tahun 1982, Hans Tholstrup seorang Australia mengendarai mobil bertenaga surya pertama untuk jarak 4000 km dalam waktu 20 hari dengan kecepatan maksimum 72 km/jam. Tahun 1985 University of South Wales Australia memecahkan rekor efisiensi solar

cell mencapai 20% dibawah kondisi satu cahaya matahari. Tahun 2007 University of Delaware berhasil menemukan solar cell technology yang efisiensinya mencapai 42.8% Hal ini merupakan rekor terbaru untuk "*thin film photovoltaicsolar cell*". Perkembangan dalam riset solar cell telah mendorong komersialisasi dan produksi solar cell untuk penggunaannya sebagai sumber daya listrik (Gunadarma, 2014)

Pengembangan Sel Surya semakin banyak menggunakan bahan semikonduktor yang bervariasi dan Silikon yang secara Individu (chip) banyak digunakan, diantaranya :

1. Mono-crystalline (Si), dibuat dari silikon kristal tunggal yang didapat dari peleburan silikon dalam bentukan bujur. Sekarang Mono-crystalline dapat dibuat setebal 200 mikron, dengan nilai efisiensi sekitar 24%.
2. Polycrystalline/Multi-crystalline (Si), dibuat dari peleburan silikon dalam tungku keramik, kemudian pendinginan perlahan untuk mendapatkan bahan campuran silikon yang akan timbul diatas lapisan silikon. Sel ini kurang efektif dibanding dengan sel Polycrystalline (efektivitas 18%), tetapi biaya lebih murah.
3. Gallium Arsenide (GaAs). Galium Arsenide pada unsur periodik III-V berbahan semikonduktor ini sangat efisien dan efektif dalam menghasilkan energi listrik sekitar 25%. Banyak digunakan pada aplikasi pemakaian Sel Surya (Mintorogo, 2000).



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

Isc = short-circuit current
 Vsc = open-circuit voltage
 Vm = voltage maximum power
 Im = current maximum power
 Pm = Power maximum-output
 dari PV array (watt)

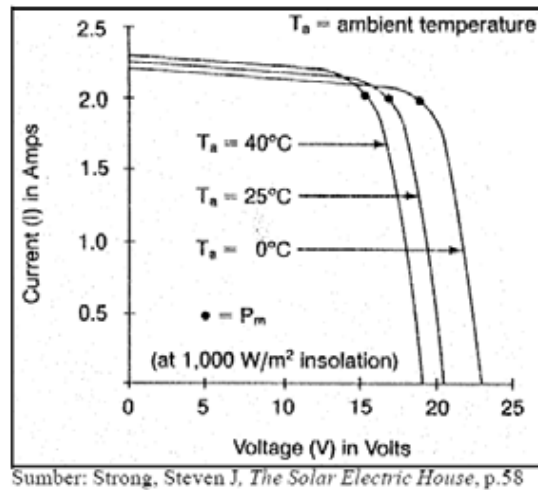
Gambar 2.2. Grafik kuat arus dan tegangan listrik sel surya
 (Hamrouni, 2008)

1. Faktor Pengoperasian Sel Surya

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

a. Ambient air temperature

Sebuah sel surya dapat beroperasi secara maksimum jika temperatur sel tetap normal (pada 25°C). Kenaikan temperatur lebih tinggi dari temperatur normal pada sel surya akan melemahkan tegangan (V_{oc}). Pada gambar 2.4 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 .

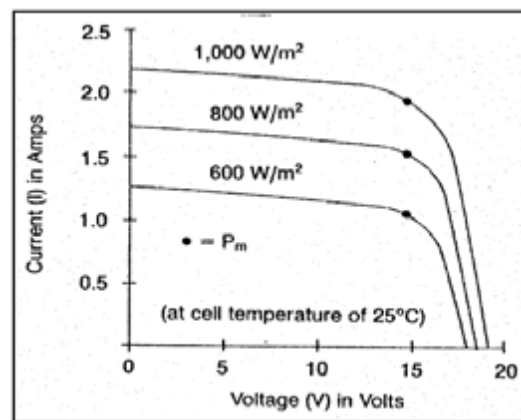


Sumber: Strong, Steven J, *The Solar Electric House*, p.58

Gambar 2.3. *Effect of Cell Temperature on Voltage (V)*
(Hamrouni, 2008)

b. Radiasi matahari

Radiasi matahari di bumi dan berbagai lokasi bervariasi, dan sangat tergantung keadaan spektrum solar ke bumi. Insolation solar matahari akan banyak berpengaruh pada current (I) sedikit pada tegangan (lihat gambar 2.4).



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

Gambar 2.4. *Effect of Insolation Intensity on Current (I)*
(Hamrouni, 2008)

c. Kecepatan angin bertiup

Kecepatan tiup angin disekitar lokasi larik sel surya dapat membantu mendinginkan permukaan temperatur kaca-kaca larik sel surya.

d. Keadaan atmosfer bumi

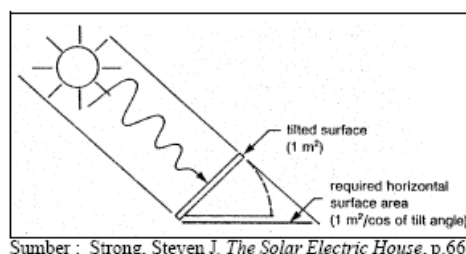
Keadaan atmosfer bumi berawan, mendung, jenis partikel debu udara, asap, uap air udara (Rh), kabut dan polusi sangat menentukan hasil maximum arus listrik dari deretan sel surya.

e. Orientasi panel atau larik sel surya

Orientasi dari rangkaian sel surya (larik) ke arah matahari secara optimum adalah penting agar panel surya dapat menghasilkan energi maksimum. Sudut orientasi (tilt angle) dari panel surya juga sangat mempengaruhi hasil energi maksimum (lihat penjelasan tilt angle). Sebagai guideline: untuk lokasi yang terletak di belahan Utara latitude, maka panel surya sebaiknya diorientasikan ke Selatan, orientasi ke Timur Barat walaupun juga dapat menghasilkan sejumlah energi, tetapi tidak akan mendapatkan energi matahari optimum.

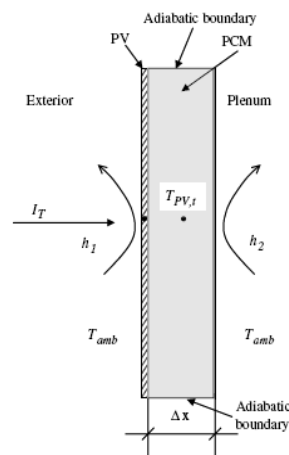
f. Posisi letak sel surya (larik) terhadap matahari (tilt angle)

Mempertahankan sinar matahari jatuh ke sebuah permukaan panel sel surya secara tegak lurus akan mendapatkan energi maksimum $\pm 1000 \text{ W/m}^2$ atau 1 kW/m^2 . Kalau tidak dapat mempertahankan ketegak lurus antara sinar matahari dengan bidang PV, maka ekstra luasan bidang panel sel surya dibutuhkan (bidang panel sel surya terhadap sun altitude yang berubah setiap jam dalam sehari).



Gambar 2.5. Ekstra Luasan Panel PV dalam posisi datar (Hamrouni, 2008)

Panel sel surya pada Equator (latitude 0 derajat) yang diletakkan mendatar (tilt angle = 0) akan menghasilkan energi maksimum, sedangkan untuk lokasi dengan latitude berbeda harus dicarikan “tilt angle” yang optimum. Proses perpindahan panas yang terjadi pada panel surya dan dioperasikan PCM diilustrasikan seperti gambar berikut.



Gambar 2.6. Perpindahan panas pada panel surya (Hamrouni, 2008)

Energi dari radiasi matahari pada waktu tertentu (I_T) diserap oleh PV tetapi sebagian besar energi dirubah menjadi panas dan kemudian merambat ke PCM yang ditempatkan di bagian belakang panel PV. Diasumsikan bahwa (i) suhu panel PV T_{PV} sama dengan suhu PCM, (ii) koefisien perpindahan panas di bagian depan dan bagian belakang adalah h_1 dan h_2 konstan, (iii) dalam selang waktu Δt , perubahan suhu PCM dari kondisi awal T_{PV} ke $T_{PV,t+\Delta t}$, (iv) dan tidak ada kehilangan panas dari batas-batas sistem adiabatik. Keseimbangan energi ketika suhu perhitungan lebih rendah dari temperatur pencairan PCM (T_m) adalah:

$$Al_T\Delta t = A (h_1 + h_2) (T_{pv,t} - T_{amb})\Delta t + (T_{pv,t+\Delta t} - T_{pv,t})\rho c_p \Delta x A \quad (2.9)$$

A , adalah luas permukaan panel, T_{amb} adalah suhu ambien. Ketika nilai temperatur $T_{PV,t+\Delta t}$ lebih besar dari temperatur leleh PCM (T_m), energi yang diserap digunakan oleh PCM untuk mengubah fase dan suhu T_m tetap konstan sampai tahap bahan berubah sepenuhnya. Diasumsikan panas laten fusi PCM adalah H , PCM Volume $\Delta x.A$, dan total waktu untuk mengubah fase bahan adalah $\Sigma \Delta t$. Keseimbangan energi untuk transisi fase adalah :

$$Al_T \Sigma \Delta t = A(h_1 + h_2)(T_m - T_{amb}) \Sigma \Delta t + H\Delta xA \quad (2.10)$$

Perubahan fasa hanya bisa cocok pada suhu tertentu. Dalam hal kapasitas panas spesifik untuk setiap fase adalah konstan, suhu dapat didefinisikan sebagai:

$$T \begin{cases} E/c_s & T < T_m \text{ (solid phase)} \\ T_m & 0 < E < H, T > T_m \text{ (melt zone)} \\ T_m + (E - H)/c_L & E \geq H, T > T_m \text{ (liquid phase)} \end{cases}$$

Jenis-jenis solar cell antara lain (Muchammad dan Eflita Yohana, 2010):

1. Single crystalline

Yaitu kristal yang mempunyai satu jenis macamnya, tipe ini dalam perkembangannya mampu menghasilkan efisiensi yang sangat tinggi. Jenis single crystalline antara lain:

a. Gallium Arsenide Cell

Gallium arsenide cell sangat efisien dari semua sel, tetapi harganya sangat mahal. Efisiensi dari sel ini mampu mencapai 25 persen.

b. Cadmium Sulfide Cell

Cadmium sulfide cell ini merupakan suatu bahan yang dapat dipertimbangkan dalam pembuatan sel surya, karena harga yang murah dan mudah dalam proses pembuatannya.

2. Polycrystalline cell

Polycrystalline cell merupakan kristal yang banyak macamnya, terbuat dari kristal silikon dengan efisiensi 10-12 persen.

3. Amorphous Silikon Cell

Amorphous berarti tidak memakai kristal struktur atau non kristal, bahan yang digunakan berupa proses film yang tipis dengan efisiensi sekitar 4-6 persen.

4. Copper indium diselenide (CIS) cells

Bahan semikonduktor yang aktif dalam sel surya CIS adalah copper indium diselenide. Senyawa CIS sering juga merupakan paduan dengan gallium dan / atau belerang. Efisiensi 9 persen sampai 11 persen.

5. Cadmium telluride (CdTe) cells

Sel surya CdTe diproduksi pada substrat kaca dengan lapisan konduktor TCO transparan biasanya terbuat dari indium tin oxide (ITO) sebagai kontak depan. Efisiensi 1 persen hingga 8,5 persen per efisiensi modul.

6. Dye sensitized

Prinsip kerja Dye sensitized yaitu menyerap cahaya dalam pewarna organik mirip dengan cara di mana tanaman menggunakan klorofil untuk menangkap energi dari sinar matahari dengan fotosintesis.

2. Perhitungan Daya Masukan dan Daya Keluaran

Sebelum mengetahui berapa nilai daya sesaat yang dihasilkan kita harus mengetahui daya yang diterima (daya input), di mana daya tersebut adalah perkalian antara intensitas radiasi matahari yang diterima dengan luas area PV module dengan persamaan (Muchammad dan Eflita Yohana, 2010):

$$P_{in} = I_r \times A \quad (2.11)$$

Keterangan:

P_{in} : Daya Input akibat irradiance matahari (Watt)

I_r : 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}), arus hubung singkat (I_{sc}), dan Fill Factor (FF) yang dihasilkan oleh sel Photovoltaic dapat dihitung dengan rumus sebagai berikut (Muchammad dan Eflita Yohana, 2010):

$$P_{out} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (2.12)$$

Keterangan:

P_{out} : Daya yang dibangkitkan oleh solar cell (Watt)

V_{oc} : Tegangan rangkaian terbuka pada solar cell (Volt)

I_{sc} : Arus hubung singkat pada solar cell (Ampere)

FF : *Fill Factor*

Nilai FF dapat diperoleh dari rumus:

$$FF = V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0.72) / V_{oc} + 1 \quad (2.13)$$

Efisiensi yang terjadi pada sel surya adalah merupakan perbandingan daya yang dapat dibangkitkan oleh sel surya dengan energi input yang diperoleh dari irradiance matahari. Efisiensi yang digunakan adalah efisiensi sesaat pada pengambilan data.

$$\eta = \frac{\text{Output}}{\text{Input}} \times 100\% \quad (2.14)$$

Sehingga efisiensi yang dihasilkan:

$$\eta \text{ sesaat} = \frac{P}{I_r} \times 100\% \quad (2.15)$$

Keterangan:

η sesaat : Efisiensi solar cell (%)

I_r : Intensitas radiasi matahari (Watt/m²)

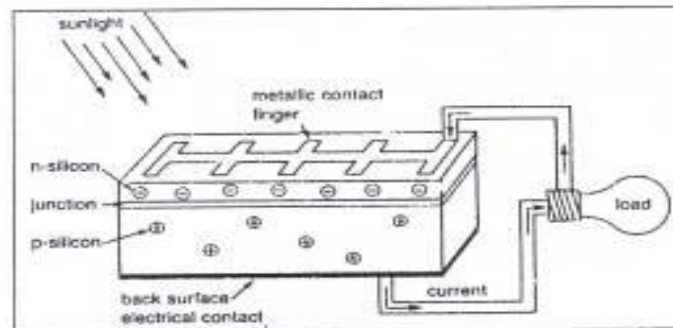
P : Daya output yang dibangkitkan oleh solar cell (Watt)

A : Luas area permukaan module photovoltaic (m²)

Photovoltaics (PV), merupakan teknologi di mana cahaya diubah menjadi tenaga listrik. Dikenal sebagai metode untuk membangkitkan tenaga matahari dengan menggunakan solar sel dalam modul. Listrik terhubung dalam jumlah yang banyak sebagai *solar photovoltaic arrays* untuk mengubah energi dari matahari menjadi listrik.

Sel surya diproduksi dari bahan semikonduktor yaitu silikon, yang berperan sebagai *insulator* pada temperatur rendah dan sebagai konduktor bila ada energi dan panas. Sebuah silikon sel surya adalah sebuah diode yang terbentuk dari lapisan atas silikon tipe n (*silicon doping of phosphorous*), dan lapisan bawah silikon tipe p (*silicon doping of boron*).

Elektron-elektron bebas terbentuk dari jutaan photon atau benturan atom pada lapisan penghubung menyebabkan terjadinya aliran listrik.



Gambar 2.7. Diagram potongan sel surya (Hamrouni, 2008)

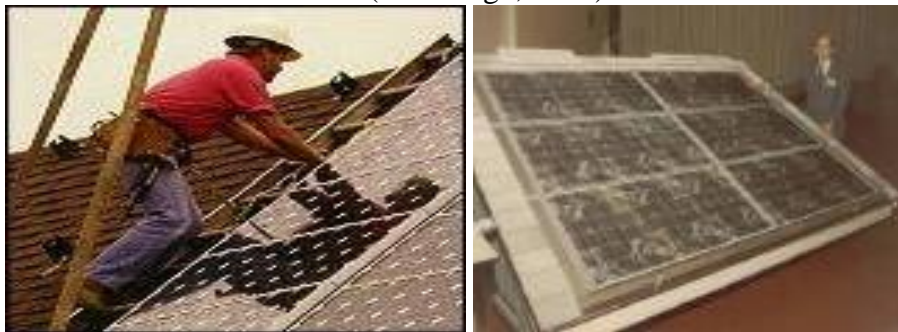
Terdapat 5 cara perletakan modul PV:

1. Fixed array

Deretan modul PV diletakkan pada struktur penyangga PV (rangka tersendiri) atau menyatu ke struktur atap. Perhitungan sudut kemiringan pada suatu lokasi berdasarkan latitude optimum pada posisi 21 Maret dan 21 September. Ada 2 macam cara pemasangan photovoltaic pada atap, yaitu shingle module; deretan modul dikaitkan di atas penutup atap, dan Integral Roof Modules; deretan modul dipasang secara integral dengan struktur rangka atap. Sedangkan pada lisplank, deretan PV dipasang secara tetap pada bidang lisplank overstack. Pada wall-cladding dipakai silikon efisiensi tinggi yaitu "Mono-crystalline", dan sebagai glass cladding dipakai silikon 'amorphous dan 'crystalline'. PV bisa dipasang pada bangunan yang telah ada, atau bisa diletakkan terpisah dari bangunan tapi dihubungkan oleh kabel untuk mensuply power ke bangunan.



Gambar 2.8. Shingle Modules PV
(Mintorogo, 2000)



Gambar 2.9. Integral Roof Modules PV
(Mintorogo, 2000)



Gambar 2.10. Modules PV pada Overstack Rumah
(Mintorogo, 2000)



Gambar 2.11. Deretan Modul PV sebagai penutup SunSpace, memasukkan cahaya alami sambil mendapatkan listik surya (PV Glass-Modules pada SunSpace)
(Mintorogo, 2000)

2. Seasonally Adjusted Tilting

Deretan modul PV dapat diubah secara manual sesuai waktu sesuai waktu yang dikehendaki untuk pengoptimalan tilt angle.

3. One axis tracking

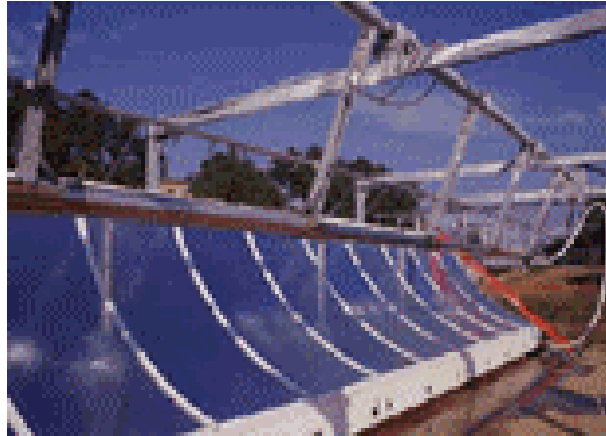
Panel modul PV dapat mengikuti lintasan pergerakan matahari dari timur ke barat secara otomatis, akan mendapatkan efisiensi 20% dibandingkan dengan fixed arrays.

4. Two axis tracking

Panel modul PV dapat mengikuti lintasan pergerakan matahari dari timur ke barat serta orientasi Utara-selatan secara otomatis; akan mendapatkan efisiensi 40% dibandingkan fixed arrays.

5. Concentrator Arrays

Deretan lensa optik dan cermin yang memfokuskan pada suatu area sel surya efisiensi tinggi.

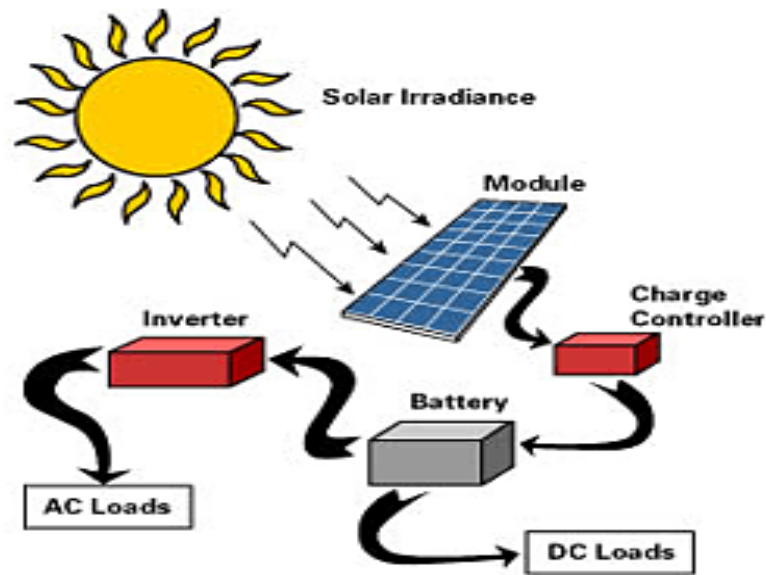


Gambar 2.12. Concentrator Arrays
(Mintorogo, 2000)

Jika sebuah bangunan berada jauh dari supply listrik umum, seperti di daerah pegunungan, PV bisa digunakan sebagai pembangkit listrik, atau PV bisa digunakan bersamaan dengan angin, diesel generator dan/atau hydroelectric power. Normalnya, modul photovoltaic bertahan sampai 25 tahun, tapi tetap bisa digunakan bahkan sampai 30-40 tahun (Mintorogo, 2000).

Tenaga matahari tidak membawa kepada emisi yang berbahaya selama operasionalnya, tapi produksi panel membawa kepada sejumlah polusi. Photovoltaic menjadi lebih efisien dan biaya yang lebih sedikit, menyediakan energi listrik 16 watt per square feet atau lebih (Crowther, 1992).

3. Prinsip kerja Photovoltaic :



Gambar 2.13. Prinsip kerja Photovoltaic
(PT. Centradaya Citra Lestari, 2012)

Pembangkit listrik tenaga surya itu konsepnya sederhana. Yaitu mengubah cahaya matahari menjadi energi listrik. Cahaya matahari merupakan salah satu bentuk energi dari sumber daya alam. Sumber daya alam matahari ini sudah banyak digunakan untuk memasok daya listrik di satelit komunikasi melalui sel surya. Sel surya ini dapat menghasilkan energi listrik dalam jumlah yang tidak terbatas langsung diambil dari matahari, tanpa ada bagian yang berputar dan tidak memerlukan bahan bakar. Sehingga sistem sel surya sering dikatakan bersih dan ramah lingkungan. Bandingkan dengan sebuah generator listrik, ada bagian yang berputar dan memerlukan bahan bakar untuk dapat menghasilkan listrik. Suaranya bising. Selain itu gas buang yang dihasilkan dapat menimbulkan efek gas rumah kaca (green house gas) yang pengaruhnya dapat merusak ekosistem planet bumi kita.

Sistem sel surya yang digunakan di permukaan bumi terdiri dari panel sel surya, rangkaian kontroler pengisian (charge controller), dan aki (batere) 12 volt yang maintenance free. Panel sel surya merupakan modul yang terdiri beberapa sel surya yang digabung dalam hubungkan seri dan paralel tergantung ukuran dan kapasitas yang diperlukan. Yang sering digunakan adalah modul sel surya 20 watt atau 30 watt. Modul sel surya itu menghasilkan energi listrik yang proporsional dengan luas permukaan panel yang terkena sinar matahari. Rangkaian kontroler pengisian aki dalam sistem sel surya itu merupakan rangkaian elektronik yang mengatur proses pengisian akinya. Kontroler ini dapat mengatur tegangan aki dalam selang tegangan 12 volt plus minus 10 persen. Bila tegangan turun sampai 10,8 volt, maka kontroler akan mengisi aki dengan panelsurya sebagai sumber dayanya. Tentu saja proses pengisian itu akan terjadi bila berlangsung pada saat ada cahaya matahari. Jika penurunan tegangan itu terjadi pada malam hari, maka kontroler akan memutus pemasokan energi listrik.

Komponen utama sistem surya fotovoltaik adalah modul yang merupakan unit rakitan beberapa sel surya fotovoltaik. Untuk membuat modul fotovoltaik secara pabrikasi bisa menggunakan teknologi kristal dan thin film. Modul fotovoltaik kristal dapat dibuat dengan teknologi yang relatif sederhana, sedangkan untuk membuat sel fotovoltaik diperlukan teknologi tinggi.

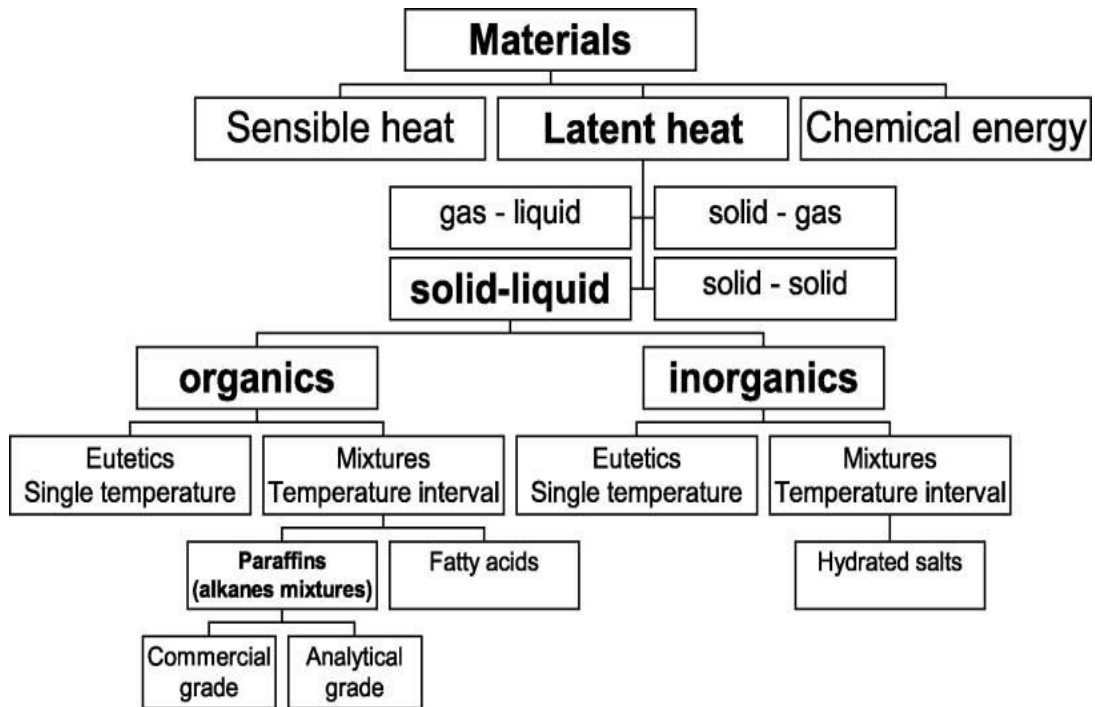
Modul fotovoltaik tersusun dari beberapa sel fotovoltaik yang dihubungkan secara seri dan paralel. Biaya yang dikeluarkan untuk

membuat modul sel surya yaitu sebesar 60% dari biaya total. Jadi, jika modul sel surya itu bisa diproduksi di dalam negeri berarti akan bisa menghemat biaya pembangunan PLTS. Untuk itulah, modul pembuatan sel surya di Indonesia tahap pertama adalah membuat bingkai (frame), kemudian membuat laminasi dengan sel-sel yang masih diimpor.

Bahan sel surya sendiri terdiri 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, semikonduktor P-type dan N-type (terbuat dari campuran Silikon) untuk menghasilkan medan listrik, saluran awal dan saluran akhir (tebuat dari logam tipis) untuk mengirim elektron ke perabot listrik. Cara kerja sel surya sendiri sebenarnya identik dengan piranti semikonduktor dioda. Ketika cahaya bersentuhan dengan sel surya dan diserap oleh bahan semi-konduktor, 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.

D. Phase Change Material (PCM)

Bahan perubah fasa (Phase Change Material/ PCM) merupakan bahan yang sering digunakan sebagai *passive cooling* untuk menyerap kalor dengan memanfaatkan panas laten. Berikut ini klasifikasi pemanfaatan material dalam perpindahan panas.



Gambar 2.14. klasifikasi pemanfaatan material dalam perpindahan panas (Farid, et. al, 2004)

Pemanfaatan material perubah fasa dalam penyerapan panas di sesuaikan dengan temperatur perubah fasanya. Berikut ini beberapa PCM dengan sifat-sifat termofisika.

Tabel 2.1. PCM dan Sifat-sifat Termofisikanya (Farid, et. al, 2004)

	RT20	CL	CP	CaCl ₂ .6H ₂ O	SP22
Melting onset, °C	21.23	20.78	22.33	29.17	22.97
Melting peak, °C	25.73	24.66	26.4	29.66	24.6
Heat of fusion, kJ/kg	240.3	171.98	196.07	213.12	182
Thermal conductivity, W/m-K	0.2	0.139-0.143	0.139-0.143	1.09	0.6
Density solid, kg/l	0.87	0.88	0.883	1.71	1.38
Density liquid, kg/l	0.75	0.863	0.84	-	1.378
Volumetric expansion, l/kg %	10	Negligible	Negligible	Negligible	1
Sub-cooling, °C	Negligible	Negligible	Negligible	Negligible	6
Specific heat capacity, kJ/kg-K	1.8-2.4	-	-	-	2.5

Bahan yang akan digunakan sebagai PCMs untuk PV/PCM sistem harus memiliki kualitas tertentu atau memenuhi persyaratan, yaitu :

1. Bahan harus memiliki panas laten yang tinggi besar dan konduktivitas termal yang tinggi
2. Bahan seharusnya mencair suhu dalam jangkauan operasi, dapat mencair secara sejalan dan secara kimia stabil.
3. Biaya rendah, tidak beracun, dan tidak korosi.

Dalam beberapa tahun terakhir, bahan yang telah diteliti adalah garam terhidrasi, lilin parafin, asam lemak dan eutectics senyawa organik dan non organik (Hasan A. dkk, 2007).

Energi panas dapat disimpan dalam bentuk panas sensibel dan panas laten atau gabungan panas sensibel dan panas laten. Pada penyimpanan panas sensibel energi panas disimpan dengan menaikkan temperatur suatu medium padat atau cair dengan menggunakan kapasitas panas yang dimiliki bahan. Jumlah energi panas yang tersimpan dalam bentuk panas sensibel tergantung pada massa, nilai panas spesifik dari bahan yang digunakan untuk menyimpan energi panas dan perubahan suhu. Pada prinsipnya penyimpanan panas laten adalah menyimpan panas memanfaatkan panas laten dari bahan. Panas laten adalah jumlah panas yang diserap atau dilepaskan selama perubahan fasa dari material penyimpanan panas. Ada dua jenis panas laten, panas laten fusi dan panas laten penguapan. Panas laten fusi adalah jumlah panas yang diserap atau dilepaskan ketika perubahan fase padat ke fase cair material atau sebaliknya, sedangkan panas laten penguapan adalah jumlah energi panas

yang diserap atau dilepaskan ketika perubahan fase cair ke fase uap material atau sebaliknya.

Pada penyimpan panas laten volume yang dibutuhkan lebih kecil dibandingkan dengan penyimpan panas sensibel. Penyimpan panas laten mampu menyimpan sebagian besar energi panas dengan perubahan temperatur yang kecil, akan tetapi aplikasi penyimpan panas laten masih menghadapi banyak kendala seperti tingginya harga material penyimpan panas laten, stabilitas sifat-sifat termodinamik material setelah mengalami siklus dan konduktivitas termal material yang rendah.

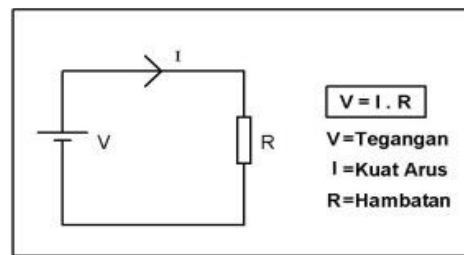
Semua material dapat digolongkan sebagai material berubah fasa, yang membedakan hanyalah adalah temperatur perubahan fasa. Masing-masing material memiliki temperature perubahan fasa yang berbeda. Hal yang penting dalam memilih material penyimpan panas panas laten adalah temperature berubah fasa yang sesuai dengan range temperature aplikasinya. Oleh karena itu, tidak ada material yang spesifik yang disebut sebagai material ideal untuk digunakan sebagai material perubah fasa (Dailami, 2012).

E. Hukum ohm, Power dan Energi

Ada hubungan langsung antara Arus (I), Tegangan (V) dan Resistance (R). Hubungan ini dinyatakan dalam Hukum Ohm. Hukum Ohm adalah suatu pernyataan bahwa besar arus listrik yang mengalir melalui sebuah penghantar selalu berbanding lurus dengan beda potensial yang diterapkan kepadanya. Sebuah benda penghantar dikatakan mematuhi hukum Ohm

apabila nilai resistansinya tidak bergantung terhadap besar dan polaritas beda potensial yang dikenakan kepadanya. Walaupun pernyataan ini tidak selalu berlaku untuk semua jenis penghantar, namun istilah "hukum" tetap digunakan dengan alasan sejarah (Pieter de Vries DKK, 2010).

Berikut contoh rangkaian Hukum Ohm:



Gambar 2.15. Rangkaian Hukum Ohm
(Irfandy, 2013)

V = Tegangan listrik yang terdapat pada kedua ujung penghantar dalam satuan volt (V).

I = Arus listrik yang mengalir pada suatu penghantar dalam satuan Ampere (A).

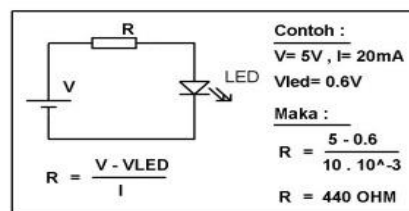
R = nilai hambatan listrik (resistansi) yang terdapat pada suatu penghantar dalam satuan Ohm (Ω)

Berdasarkan hukum Ohm, 1 Ohm didefinisikan sebagai hambatan yang digunakan dalam suatu rangkaian yang dilewati kuat arus sebesar 1 Ampere dengan beda potensial 1 Volt. Oleh karena itu, kita dapat mendefinisikan pengertian hambatan yaitu perbandingan antara beda potensial dan kuat arus. Semakin besar sumber tegangan maka semakin besar arus yang dihasilkan. Jadi, besar kecilnya hambatan listrik tidak

dipengaruhi oleh besar tegangan dan arus listrik tetapi dipengaruhi oleh panjang penampang, luas penampang dan jenis bahan.

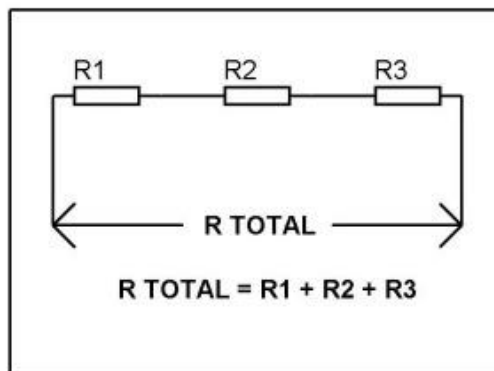
Hambatan dipengaruhi oleh 3 faktor yaitu panjang, luas dan jenis bahan. Hambatan berbanding lurus dengan panjang benda, semakin panjang maka semakin besar hambatan suatu benda. Hambatan juga berbanding terbalik dengan luas penampang benda, semakin luas penampangnya maka semakin kecil hambatannya. Inilah alasan mengapa kabel yang ada pada tiang listrik dibuat besar-besar, tujuannya adalah untuk memperkecil hambatan sehingga tegangan bisa mengalir dengan mudah. Hambatan juga berbanding lurus dengan jenis benda (hambatan jenis) semakin besar hambatan jenisnya maka semakin besar hambatan benda itu.

Berikut ini contoh penerapan Hukum Ohm untuk menghidupkan lampu LED :



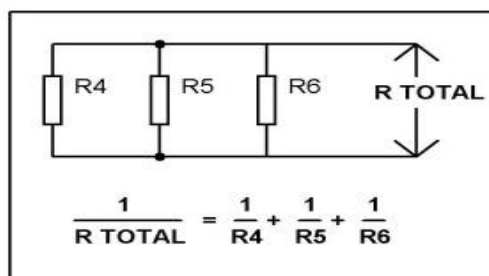
Gambar 2.16. Penerapan Hukum Ohm
(Irfandy, 2013)

Pada rangkaian beberapa resistor yang disusun seri, maka dapat diperoleh nilai resistor totalnya dengan menjumlah semua resistor yang disusun seri tersebut. Hal ini mengacu pada pengertian bahwa nilai kuat arus disemua titik pada rangkaian seri selalu sama.



Gambar 2.17. Rangkaian Resistor Seri
(Irfandy, 2013)

Pada rangkaian beberapa resistor yang disusun secara paralel, perhitungan nilai resistor totalnya mengacu pada pengertian bahwa besar kuat arus yang masuk ke percabangansama dengan besar kuat arus yang keluar dari percabangan ($I_{in} = I_{out}$). Dengan mengacu pada perhitungan Hukum Ohm maka dapat diperoleh rumus sebagai berikut.



Gambar 2.18. Rangkaian Resistor Paralel
(Irfandy, 2013)

Fungsi utama dari Hukum Ohm adalah untuk mengetahui hubungan tegangan dan kuat arus serta dapat digunakan untuk menentukan suatu hambatan beban listrik tanpa menggunakan alat ukur Ohmmeter.

Daya listrik adalah banyaknya energi tiap satuan waktu dimana pekerjaan sedang berlangsung atau kerja yang dilakukan persatuan waktu. Dari definisi ini, maka daya listrik (P) dapat dirumuskan:

Daya = Energi/waktu

$$P = W/t \quad (2.16)$$

$$P = V.i.t/t = V.i \quad (2.17)$$

$$P = i^2 R \quad (2.18)$$

$$P = V^2/R \text{ (dalam satuan volt-ampere, VA)} \quad (2.19)$$