

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Perpindahan Kalor

Perpindahan kalor (*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 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,

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

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 , 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.

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

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. (Bejan dan Kraus, 1948)

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)

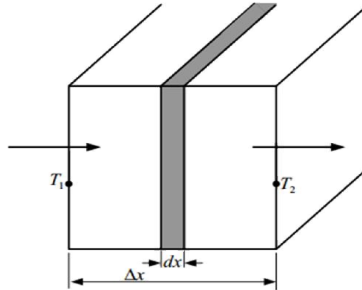
Nilai konduktivitas thermal suatu bahan menunjukkan laju perpindahan panas yang mengalir dalam suatu bahan. Konduktivitas thermal kebanyakan bahan

merupakan fungsi suhu, dan bertambah sedikit kalau suhu naik, akan tetapi variasinya kecil dan sering kali diabaikan. Jika nilai konduktivitas thermal suatu bahan makin besar, maka makin besar juga panas yang mengalir melalui benda tersebut. Karena itu, bahan yang harga k -nya besar adalah penghantar panas yang baik, sedangkan bila k -nya kecil bahan itu kurang menghantar atau merupakan isolator.

Tabel 2.1. Nilai Konduktivitas Bahan

Bahan	k (W/m.C)	Bahan	k (W/m.C)
Logam		Non Logam	
Perak	410	Kuarsa	41,6
Tembaga	385	Magnesit	4,15
Aluminium	202	Marmar	2,08 – 2,94
Nikel	93	Batu pasir	1,83
Besi	73	Kaca, jendela	0,78
Baja karbon	43	Kayu	0,08
Timbal	35	Serbuk gergaji	0,059
Baja krom-nikel	16,3	Wol kaca	0,038
Emas	314	Karet	0,2
		Polystyrene	0,157
		Polyethylene	0,33
		Polypropylene	0,16
		Polyvinyl Chlorida	0,09
		Kertas	0,166
Zat cair		Gas	
Air raksa	8,21	Hidrogen	0,175
Air	0,556	Helium	0,141
Amonia	0,540	Udara	0,024
Minyak lumas SAE 50	0,147	Uap air (jenuh)	0,0206
Freon 12	0,073	Karbon-dioksida	0,0146

Perpindahan panas pada suatu dinding datar seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1, dapat diturunkan dengan menerapkan Persamaan 2.1.



Gambar 2.1. Konduksi pada Bidang Datar

Jika Persamaan 2.1 diintegrasikan :

$$\int q dx = - \int k A dx$$

Maka akan diperoleh :

$$Q \Delta x = -k A \Delta T$$

$$Q = -\frac{kA}{\Delta x} (T_2 - T_1) \quad (2.4)$$

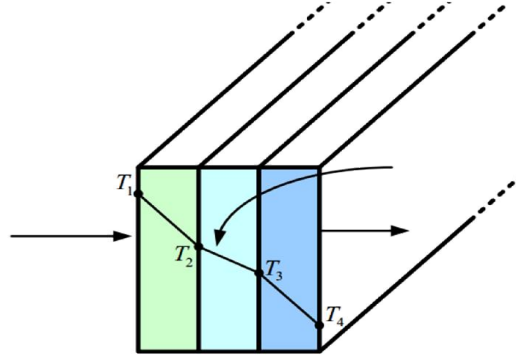
Dimana : T_1 = Suhu Dinding Sebelah Kiri ($^{\circ}\text{C}$)

T_2 = Suhu Dinding Sebelah Kanan ($^{\circ}\text{C}$)

Δx = Tebal Dinding (m)

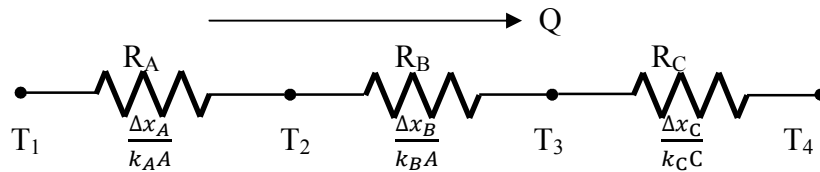
Apabila pada suatu sistem terdapat lebih dari satu macam bahan, misalnya dinding berlapis-lapis (gambar 2.5), maka aliran kalor dapat digambarkan sebagai berikut :

$$Q = -\frac{k_A A}{\Delta x_A} (T_2 - T_1) = -\frac{k_B A}{\Delta x_B} (T_3 - T_2) = -\frac{k_C A}{\Delta x_C} (T_4 - T_3) \quad (2.5)$$



Gambar 2.2. Konduksi pada Dinding Berlapis (Lebih Dari Satu Bahan)

Persamaan 2.5 mirip dengan Hukum Ohm dalam aliran listrik. Dengan demikian perpindahan panas dapat dianalogikan dengan aliran arus listrik seperti pada gambar 2.3.



Gambar 2.3. Analogi Perpindahan Panas Dalam Aliran Listrik

Menurut analogi di atas perpindahan panas sama dengan :

$$Q = \frac{\Delta T_{\text{menyeluruh}}}{\sum R_{th}} \quad (2.6)$$

Jadi persamaan 2.5 dipecahkan serentak, maka aliran panas adalah :

$$Q = \frac{(T_1 - T_4)}{\frac{\Delta x_A}{k_A A} + \frac{\Delta x_B}{k_B A} + \frac{\Delta x_C}{k_C A}} \quad (2.7)$$

Sehingga persamaan Fourier dapat dituliskan sebagai berikut.

$$\text{Aliran Panas} = \frac{\text{Beda Potensial Panas}}{\text{Tahanan Termal}}$$

Harga tahanan termal total R_{th} tergantung pada susunan dinding penyusunnya, apakah bersusun seri atau paralel atau gabungan.

2. Perpindahan Kalor Radiasi

Perpindahan kalor radiasi adalah perpindahan tenaga oleh penjararan (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 transmissi radio, dapat diidentifikasi secara mikroskopik dan tak dipandang sebagai kalor. (Reynold dan Perkins, 1983)

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 maka,

$$\alpha + \rho + \tau = 0$$

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),

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.8)$$

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

$$\epsilon = \frac{E}{E_b} \quad (2.9)$$

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

$$\epsilon = \alpha$$

Ciri khas pertukaran energi 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 . (Reynold dan Perkins, 1983)

untuk perbedaan temperatur, persamaan (2.8) dapat ditulis dalam bentuk,

$$q_r = h_r S (T_1 - T_2) \quad (2.10)$$

di mana h_r ($\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$) adalah koefisien perpindahan panas radiasi. (Bejan dan Kraus, 1948)

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*). (Stoecker dan Jones, 1982)

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*). Persamaan dasar untuk menghitung laju perpindahan panas konveksi yaitu,

$$q = hA (T_w - T_f) \quad (2.11)$$

Dimana : q = Laju perpindahan panas (W)

h = Koefisien perpindahan panas konveksi ($\text{W}/\text{m}^2.\text{K}$)

A = Luas Penampang (m^2)

T_w = Temperatur Dinding ($^{\circ}\text{C}$)

T_f = Temperatur Fluida ($^{\circ}\text{C}$)

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 kadang-kadang 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, 1982)

B. Energi Matahari (Surya)

Pemanfaatan energi matahari sudah berusia setua kehidupan itu sendiri, karena pada dasarnya tidak akan ada kehidupan di permukaan bumi tanpa energi

matahari. Matahari telah digunakan untuk mengeringkan buah-buahan dan pangan lain serta pangan lain serta menguapkan air laut untuk mendapatkan garam. Pada awal abad dua puluh kolektor sinar matahari telah digunakan untuk memanaskan air. Karena harga bahan bakar fosil membumbung tinggi, pada pertengahan decade 70-an dan kemungkinan akan terus naik di waktu-waktu mendatang, energi matahari menjadi pusat perhatian sebagai salah satu sumber energi yang dapat diperbaharui (*renewable*). (Vries DKK, 2011)

Beberapa bidang studi dan pemanfaatan energi matahari yaitu antara lain; konversi langsung energi matahari menjadi energi listrik, kolektor energi matahari suhu tinggi yang cocok untuk menggerakkan pembangkit daya, kolektor energi matahari plat datar suhu rendah, dan rancang bangunan yang menggunakan energi matahari secara pasif. Karena dalam waktu sehari energi matahari yang tersedia barangkali tidak mencukupi kebutuhan energi secara sempurna, maka tempat menyimpan kalor merupakan komponen yang tak terpisahkan dari suatu rancang bangun sistem energi matahari. (Reynold dan Perkins, 1983)

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. (Vries DKK, 2011)

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 μm . Emisi radiasi dari matahari ke bumi menghasilkan intensitas radiasi surya yang hampir tetap di luar 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.

Matahari bisa menjadi sumber energi yang sempurna untuk menyediakan tenaga listrik yang diperlukan di seluruh dunia. Sayangnya energi yang berasal dari matahari tidak bersifat homogen. Nilai segeranya tidak saja bergantung kepada cuaca setiap hari, namun berubah-ubah sepanjang tahun. Artinya, energi yang tersedia untuk mengoperasikan peralatan listrik juga akan berubah-ubah.

Setiap hari matahari terbit di timur dan ketika semakin meninggi di langit, maka volume energinya meningkat hingga mencapai puncaknya pada tengah hari (setengah rotasi antara terbit dan terbenam). Setelah itu (pada saat matahari bergerak ke arah barat), energi yang tersedia berkurang. Efek lain yang kita perlu ingat adalah bahwa bumi mengitari matahari sepanjang tahun. Hal ini berada di belahan bumi selatan (dan tidak berada di garis katulistiwa), maka anda akan mengalami musim dingin, oleh karena jalur matahari akan rendah di ufuk utara. Sebaliknya pada saat musim panas, matahari akan berada pada jalur tinggi di ufuk utara. Anda yang berada di belahan bumi utara akan menyaksikan matahari

mengikuti jalur yang sama tetapi di ufuk selatan. Hal ini terjadi karena bumi mengitari matahari, maka dampaknya pada bumi adalah matahari mengikuti jalurnya. (Vries DKK, 2011)

1. Sel Surya (*Photovoltaics*)

Tujuan utama suatu sistem energi matahari adalah mengumpulkan energi radiasi matahari dan mengubahnya menjadi energi panas yang bermanfaat. Prestasi sistem bergantung pada banyak faktor, antara lain ketersediaan energi matahari, suhu udara lingkungan sekitar, karakteristik kebutuhan energi, dan terutama sekali karakteristik kalor sistem energi matahari sendiri. (Bejan dan Kraus, 1948)

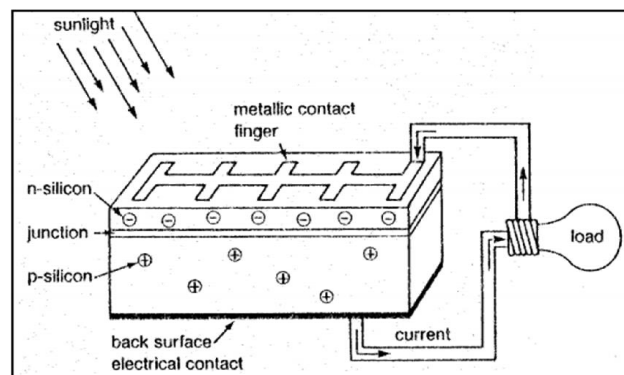
Ada beberapa jenis energi matahari, sedangkan pemilihan terhadap salah satu atau lainnya tergantung rencana pemakaiannya. Sel surya yang ada digolongkan menjadi dua, yaitu tetap dan penjejak (*fixed or tracking*). Sel surya jenis penjejak dikendalikan oleh suatu alat pengatur supaya dapat mengikuti matahari sepanjang hari. Sistem ini agak rumit dan pada umumnya hanya digunakan untuk pemakaian suhu tinggi saja. Sel surya jenis tetap jauh lebih sederhana. Walaupun kedudukan dan arahnya dapat pula diatur berdasarkan musim, namun kolektor jenis ini kurang efisien dibandingkan dengan jenis penjejak, walaupun biasanya lebih disukai karena lebih murah dan mudah pemeliharaannya. (Reynold dan Perkins, 1983)

Sel surya dapat juga dibagi menjadi plat datar dan memfokus. Jenis terakhir menggunakan permukaan-permukaan berkaca atau lensa-lensa berkaca untuk memfokuskan energi matahari agar terkumpulkan pada area yang lebih kecil untuk mendapatkan suhu kerja yang lebih tinggi.

Sel surya jenis plat datar terdiri dari plat penyerap, kaca penutup, isolasi, dan blok (badan). Plat penyerap biasanya terbuat dari tembaga dan diberi lapisan untuk meningkatkan penyerapan energi radiasi sinar matahari. Kaca penutup digunakan untuk memperkecil konveksi dan reradiasi yang hilang dari penyerap. Penyerap (terisolasi pada sisi-sisinya), dan plat penutup bertumpu pada rumah (badan) kolektor. Besarnya irradiasi yang mencapai bagian atas kaca bergantung pada lokasi, arah, dan kemiringan kolektor. Banyaknya energi berguna yang terkumpulkan juga tergantung pada sifat-sifat optik (transmisivitas dan reflektivitas), sifat-sifat plat penyerap (absorptivitas dan emisivitas), dan rugi kalor (kehilangan kalor) karena konduksi, konveksi, dan radiasi kembali. (Stoecker dan Jones, 1982)

Sel surya (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. 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.

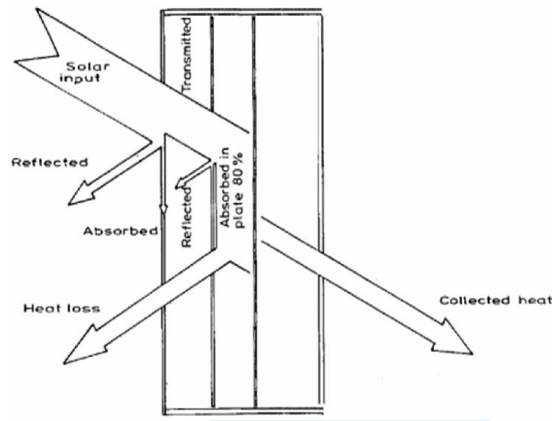


Sumber : Steven J.Strong, *The Solar Electric House*, p.18

Gambar 2.4. Diagram dari Sebuah Potongan Sel Surya

Tidak semua sinar matahari yang datang akan diserap oleh sel surya, seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.2, bahwa sebagian dari sinar ini

dipantulkan lagi ke angkasa, sebagian panasnya diserap oleh plat penyerap sel surya.



Gambar 2.5. Aliran Panas Sel Surya. (Huang, Earmes, dan Norton, 2004)

Sebuah Sel Surya dalam menghasilkan energi listrik (energi sinar matahari menjadi photon) tidak tergantung pada besaran luas bidang Silikon, dan secara konstan akan menghasilkan energi berkisar ± 0.5 volt — max. 600 mV pada 2 amp, dengan kekuatan radiasi solar matahari $1000 \text{ W/m}^2 = "1 \text{ Sun}"$ akan menghasilkan arus listrik (I) sekitar 30 mA/cm^2 per sel surya.

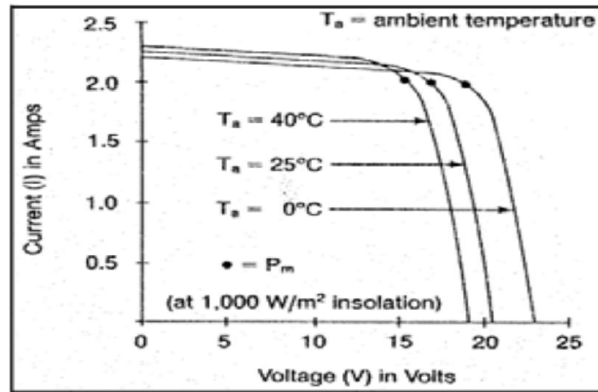
a. Faktor Pengoperasian Sel Surya

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

1. *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 3, setiap kenaikan temperatur sel surya 10°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 .

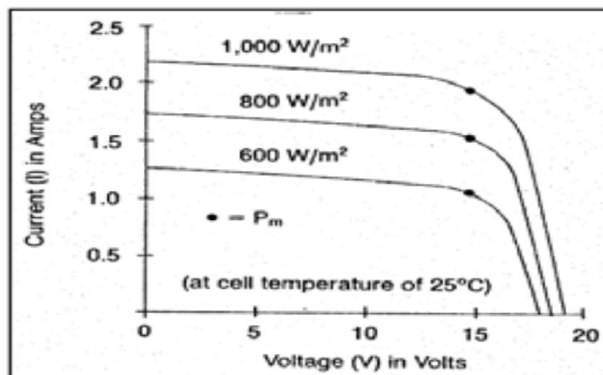


Sumber: Strong, Steven J. *The Solar Electric House*, p.58

Gambar 2.6. Efek Dari Temperatur Sel Terhadap Tegangan (V)

2. 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 (V).



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

Gambar 2.7. Efek Intensitas Cahaya Terhadap Kuat Arus

3. Kecepatan Angin Bertiup.

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

4. Keadaan Atmosfir Bumi.

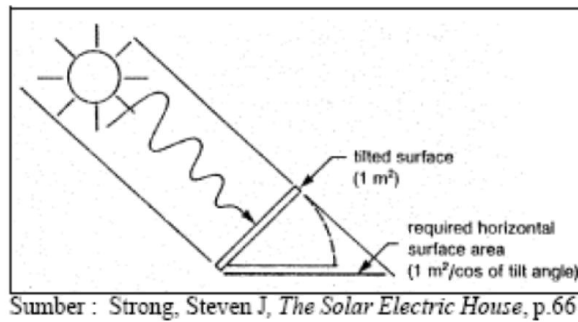
Keadaan atmosfir bumi berawan, mendung, jenis partikel debu udara, asap, uap air udara (Rh), kabut dan polusi sangat menentukan hasil maximum arus listrik dari deretan sel surya.

5. 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. Sebagai *guidline*: 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.

6. 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 2.8. Ekstra Luasan Panel PV dalam Posisi Datar

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

Modul photovoltaic tersusun dari beberapa sel photovoltaic mempunyai ukuran 10 cm x 10 cm yang dihubungkan secara seri atau paralel. Biaya yang dikeluarkan untuk membuat modul sel surya sekitar 60% dari biaya total. Jadi, bila modul sel surya bisa dibuat didalam negeri berarti akan bisa menghemat biaya. Untuk itulah, modul pembuatan sel surya di Indonesia tahap pertama adalah membuat bingkai (*frame*), kemudian membuat laminasi dengan sel-sel yang masih di import. (Bejan dan Kraus, 1948)



Gambar 2.9. Contoh modul *photovoltaic*
<http://www.azetsurya.com/info.php>

Untuk memperoleh besar tegangan dan daya yang sesuai dengan kebutuhan, sel-sel *photovoltaic* tersebut harus dikombinasikan secara seri dan parallel, dengan aturan sebagai berikut:

- a. Untuk memperoleh tegangan keluaran yang dua kali lebih besar dari tegangan keluaran sel *photovoltaic*, maka dua buah sel *photovoltaic* harus dihubungkan secara seri.
- b. Untuk memperoleh arus keluaran yang dua kali lebih besar dari arus keluaran sel *photovoltaic*, maka dua buah sel *photovoltaic* harus dihubungkan secara parallel.
- c. Untuk memperoleh daya keluaran yang dua kali lebih besar dari daya keluaran
- d. Sel *photovoltaic* dengan tegangan yang konstan maka dua buah sel *photovoltaic* harus dihubungkan secara seri dan parallel. (Bejan dan Kraus, 1948)

2. Radiasi Matahari (Surya)

Jumlah tenaga surya tersedia per satuan luas disebut radiasi. Jika ini terjadi selama periode waktu tertentu maka disebut iradiasi atau "*insolation*". Satuan ukuran untuk irradiasi adalah watt per meter persegi (W/m^2). Radiasi matahari adalah integrasi atau penjumlahan penyinaran matahari selama periode waktu. Radiasi surya (*solar radiation*) merupakan satu bentuk radiasi termal yang mempunyai distribusi panjang gelombang khusus. Intensitasnya sangat tergantung dari kondisi atmosfer, saat dalam tahun, dan sudut timpa (*angle of incidence*) sinar matahari dipermukaan bumi. Pada batas luar atmosfer, iradiasi total adalah 1395 W/m^2 bilamana bumi berada pada jarak rata-ratanya dari matahari. Angka ini disebut konstanta surya (*solar constant*), dan mungkin akan berubah bila data eksperimental yang lebih teliti sudah ada.

Tidak seluruh energi yang disebutkan dalam konstanta surya mencapai permukaan bumi, karena terdapat absorpsi yang kuat dari karbon dioksida dan uap air di atmosfer. Radiasi surya yang menimpa permukaan bumi juga bergantung dari kadar debu dan zat pencemar lainnya dalam atmosfer. Energi surya yang maksimum akan mencapai permukaan bumi bilamana berkas sinar itu langsung menimpa permukaan bumi karena terdapat bidang pandang yang lebih luas terhadap fluks surya yang datang dan berkas sinar surya menempuh jarak yang lebih pendek di atmosfer, sehingga mengalami absorpsi lebih sedikit dari pada jika sudut timpanya miring terhadap normal.

Radiasi matahari yang diterima suatu benda meliputi:

1. Radiasi sorotan (beam radiation), yaitu radiasi matahari yang diterima suatu benda dari matahari tanpa disebarkan oleh atmosfer terlebih dahulu.
2. Radiasi sebaran (diffuse radiation), yaitu radiasi matahari yang diterima suatu benda setelah radiasi tersebut diubah arahnya karena disebarkan oleh atmosfer.
3. Radiasi pantulan, yaitu radiasi matahari yang diterima suatu benda dari radiasi matahari yang dipantulkan dari permukaan yang berdekatan dengan benda tersebut. (Bejan dan Kraus, 1948)

C. *Phasa 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. 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. (Huang, Earmes, dan Norton, 2004)

Pemanfaatan energi terbarukan sebagai penyedia energi ditujukan untuk mengurangi biaya awal dan mengurangi dampak lingkungan yang diakibatkan oleh penggunaan bahan bakar fosil (Sharma et al, 2009). Salah satu pemanfaatan energi terbarukan yang paling banyak digunakan adalah pemanfaatan energi surya untuk penghasil energi listrik atau sebagai pemanas air (Buddhi D, 1977). Namun, masalah utama pada pemanfaatan energi surya adalah sifat radiasi surya yang intermiten, dan besarnya radiasi yang tersedia dipengaruhi oleh waktu, kondisi cuaca dan posisi lintang. Untuk pemecahan permasalahan tersebut, teknologi yang dianggap sangat cocok adalah penyimpanan energi termal (Thermal Energy Storage, TES) (Sharma et al, 2009). Sistem ini terdiri dari material dengan massa tertentu yang mampu menyimpan energi termal dalam bentuk panas atau dingin.

Pada dasarnya penyimpan energi termal dapat diklasifikasikan sebagai penyimpan energi dalam bentuk panas laten, panas sensibel dan termokimia. Diantara jenis penyimpanan energi tersebut, yang paling menarik adalah penyimpan energi dalam bentuk panas laten menggunakan materi perubahan fasa (*phase change material*, PCM). Keuntungan menggunakan material perubah fasa adalah mampu menyimpan kalor dalam kapasitas besar dengan volume material yang kecil dan proses penyerapan dan pengeluaran energi panas terjadi pada temperatur yang hampir konstan (Buddhi D, 1977).

Dalam sistem penyimpanan energi panas laten, salah satu elemen penting adalah material penyimpan kalor. Kebanyakan kajian dilakukan untuk pemanfaatan

material penyimpan panas dari hidrat garam, parafin, dan senyawa organik (Abhat,1981). Namun, material tersebut memiliki konduktivitas termal yang rendah dan sehingga membutuhkan waktu yang cukup untuk proses peleburan dan pemadatan, yang mengurangi daya keseluruhan dari perangkat penyimpanan panas dan dengan demikian akan membatasi aplikasi (Buddhi D, 1977).