

II. TINJAUAN PUSTAKA

A. Energi Surya

Pemanfaatan energi surya sudah dilakukan sejak pertama kali kehidupan itu sendiri bermula. Matahari digunakan untuk mengeringkan buah-buahan dan mendapatkan garam dengan mengeringkan air laut. Mulai pada awal abad dua puluh kolektor sinar matahari digunakan untuk memanaskan air. Karena harga bahan bakar fosil semakin tinggi mulai pertengahan decade 70-an, energy 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. Dalam waktu sehari energi matahari yang tersedia mungkin tidak mencukupi kebutuhan energi secara sempurna, maka dibutuhkan tempat

penyimpan energi sebagai komponen yang tak terpisahkan dari suatu rancang bangun sistem energi matahari (Reynold dan Perkins, 1983).

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) $G_{\text{sc}} = 1367 \text{ W/m}^2$ (*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.

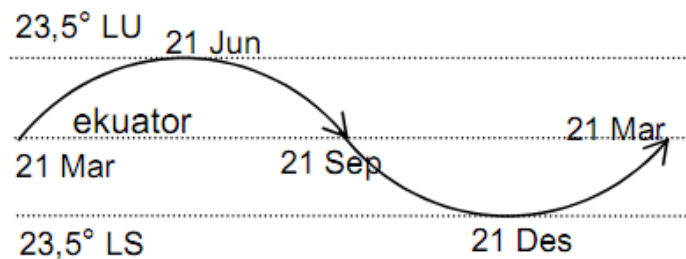
Matahari dapat menjadi sumber energi yang cukup untuk keperluan tenaga listrik di seluruh dunia. Sayangnya energi yang berasal dari matahari tidak bersifat homogen. Nilainya tidak saja bergantung kepada cuaca setiap hari, namun berubah-ubah sepanjang tahun. Artinya, energi yang tersedia untuk mengoperasikan peralatan listrik juga akan berubah-ubah.

Energi matahari 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. Pada belahan bumi selatan (dan tidak berada di garis katulistiwa) terjadi musim dingin karena jalur matahari akan rendah di ufuk utara. Sebaliknya pada saat musim panas, matahari

akan berada pada jalur tinggi di ufuk utara. Saat berada di belahan bumi utara gerak matahari mengikuti jalur yang sama tetapi di ufuk selatan. Hal ini disebut sebagai gerak semu matahari (Vries DKK, 2011).

Disadari atau tidak disadari, gerak semu matahari ini mempengaruhi radiasi matahari yang masuk ke bumi. Gerak Semu Harian (Gerak Diurnal), terjadi akibat rotasi Bumi. Periode menengahnya yakni 24 jam. Arah pergerakannya adalah dari timur ke barat. Kemiringan lintasan gerak harian Matahari tergantung letak geografis pengamat. Lintasan pada bagian ekuator Bumi adalah berupa lingkaran tegak, di bagian kutub mendatar, di belahan Bumi selatan terlihat miring ke arah utara dan sebaliknya di belahan Bumi utara terlihat miring ke selatan. Besar kemiringan tersebut berbanding lurus dengan besar lintangnya (Abdur Rachim, 1983).

Gerak Semu Tahunan (Gerak Annual), arah gerak semu tahunan Matahari yakni ke arah timur sekitar $0^{\circ}59'$ /hari. Periode gerak semu tahunan Matahari adalah sekitar 365,25 hari, akibatnya arah terbit dan tenggelam Matahari selalu berubah letaknya sepanjang tahun (Muhyiddin Khazin, 2008).



Gambar 1. Pola gerak semu tahunan matahari

Pada tanggal 21 Maret dan 23 September Matahari terbit tepat di titik timur dan tenggelam tepat di titik barat, pada tanggal 22 Juni Matahari terbit dan tenggelam sejauh $23,5^\circ$ ke arah utara dari titik timur dan barat, sebaliknya pada tanggal 22 Desember Matahari berada $23,5^\circ$ ke arah selatan dari titik timur dan barat. Posisi Matahari ketika berada di dua titik terakhir disebut dengan soltitium, yang artinya pemberhentian Matahari. Hal tersebut karena pada saat itu perubahan deklinasi Matahari sangat lambat seolah-olah berhenti. Sebaliknya pada titik ekuinox, yakni ketika lintasan Matahari berada tepat pada titik timur dan barat, perubahan deklinasi berlangsung cepat (Slamet Hambali, 2012).

B. Photovoltaics

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.

1. Prinsip Kerja Sel Surya

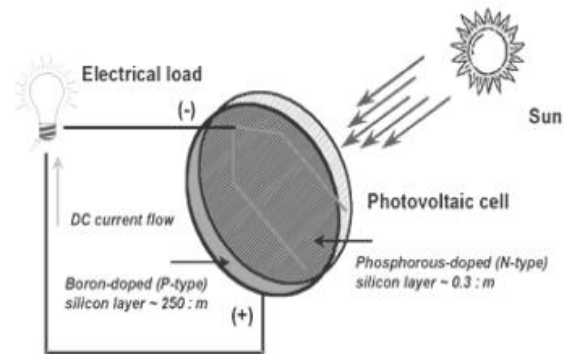
Sel surya bekerja berdasarkan efek fotoelektrik pada material semikonduktor untuk mengubah energi cahaya menjadi energi listrik. Berdasarkan teori Maxwell tentang radiasi elektromagnet, cahaya dapat dianggap sebagai spektrum gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang berbeda. Pendekatan berbeda dijabarkan oleh Einstein bahwa efek fotoelektrik

mengindikasikan cahaya merupakan partikel diskrit atau quanta energi. Dualitas cahaya sebagai partikel dan gelombang dirumuskan dengan persamaan:

$$E = h.f = h.c / \lambda \quad (2.1)$$

dimana cahaya pada frekuensi f atau panjang gelombang λ datang dalam bentuk paket-paket foton dengan energi sebesar E ; h adalah konstanta Planck ($6,625 \times 10^{-34}$ Js) dan c adalah kecepatan cahaya (3×10^8 m/s). Sifat cahaya sebagai energi dalam paket-paket foton ini yang diterapkan pada sel surya.

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



Gambar 2. Prinsip kerja sel surya
(Syafaruddin Ch. 2010)

Ada dua hal menarik dalam kondisi panjar mundur tersebut, yaitu efek fotokonduktif dan *photovoltaic*. Fotokonduktif adalah gejala dimana apabila suhu dinaikkan, maka arus bocor pada panjar mundur juga meningkat. Kenaikan suhu yang dapat dianggap sebagai penambahan energi dapat juga diganti dengan cahaya sebagai salah satu bentuk energi. Penyerapan energi cahaya pada kondisi panjar mundur sehingga menghasilkan arus listrik pada *pn-junction* ini disebut dengan efek *photovoltaic*. Jadi, sel surya pada dasarnya adalah sebuah fotodiode yang dirancang dengan mengacu pada efek *photovoltaic* sedemikian rupa, sehingga dapat mengubah energi cahaya seefisien mungkin menjadi energi listrik (Wibeng Diputra, 2008).

2. Perkembangan Panel Photovoltaic

Pada pengembangannya, sel surya semakin banyak menggunakan bahan semikonduktor yang bervariasi dan Silikon (chip) yang banyak digunakan, diantaranya :

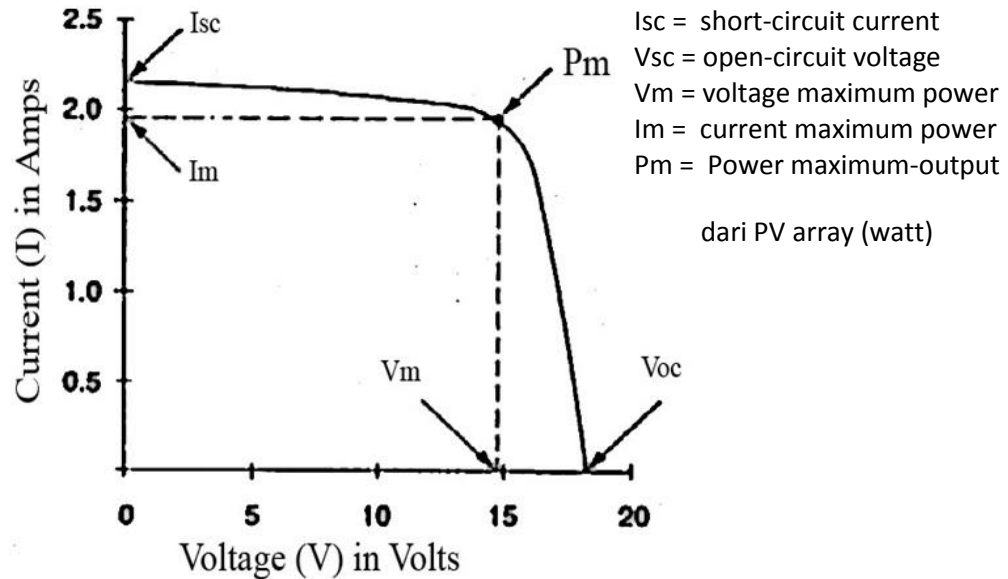
- a) *Mono-crystalline* (Si), dibuat dari silikon kristal tunggal yang didapat dari peleburan silikon dalam bentukan bujur. Sekarang Mono-crystalline dapat dibuat setebal 200 mikron, dengan nilai efisiensi sekitar 24%.
- b) *Polycrystalline/Multi-crystalline* (Si), dibuat dari peleburan silikon dalam 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.
- c) *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.

3. Konversi Energi

Dalam menghasilkan listrik, sel surya tergantung pada besaran luas bidang Silikon, dan secara konstan menghasilkan energi berkisar ± 0.5 volt maksimum 600 mV pada 2 amp⁶, dengan kekuatan radiasi solar matahari $1000 \text{ W/m}^2 = \text{''1 Sun''}$ akan menghasilkan arus listrik (I) sekitar 30 mA/cm^2 per sel surya.

Grafik I-V Curve (gambar 3) menggambarkan keadaan sebuah sel suryayang menghasilkan energi maximum jika nilai V_m dan I_m juga maximum. I_{sc} adalah arus listrik maximum pada nilai volt = nol; I_{sc} berbanding langsung dengan ketersediaan sinar matahari. V_{oc} adalah volt maximum pada nilai arus nol; V_{oc}

naik secara logaritma dengan peningkatan sinar matahari, karakter ini yang memungkinkan sel surya untuk mengisi accu.



Sumber: Strong, 1987

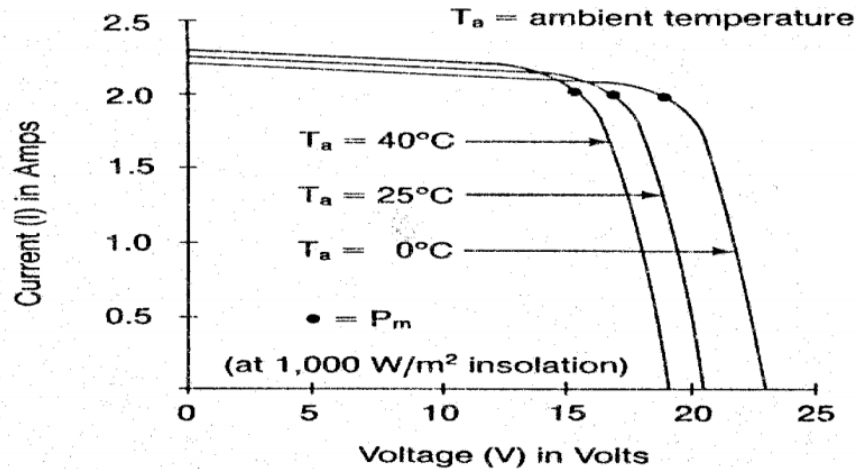
Gambar 3. Grafik kuat arus dan tegangan listrik sel surya

C. Faktor Pengoperasian Sel Surya

Agar didapatkan nilai yang maksimum, pengoperasian sel surya 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 4, setiap kenaikan temperatur sel surya 10 Celsius (dari 25°C) akan

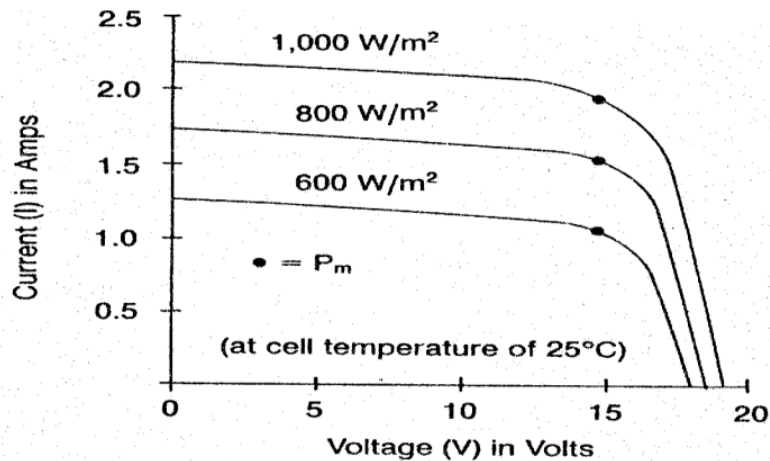
berkurang sekitar 0.4 % pada total tenaga yang dihasilkan atau akan melemah dua kali (2x) lipat untuk kenaikan temperatur sel per 10 °C.



Sumber : Strong, 1987

Gambar 4. *Effect of Cell Temperature on Voltage (V)*

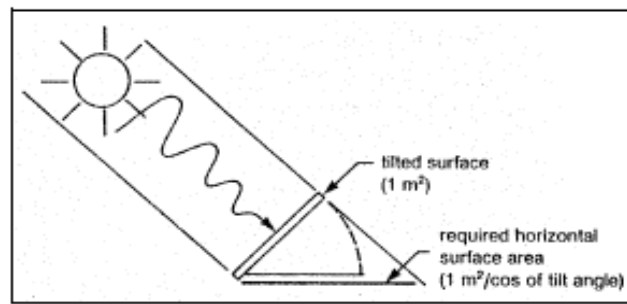
2. Radiasi solar matahari (*insolation*). Radiasi matahari di bumi dan berbagai lokasi bervariasi, dan sangat tergantung keadaan spektrum solar ke bumi. Insolation solar matahari akan banyak berpengaruh pada current (I) sedikit pada tegangan (lihat gambar 5).



Sumber : Strong 1987

Gambar 5. *Effect of Insolation Intensity on Current (I)*

3. Kecepatan angin bertiup. Kecepatan tiup angin disekitar lokasi larik sel surya dapat membantu mendinginkan permukaan temperatur kaca-kaca larik sel surya (*PV array*).
4. 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.
5. Arah orientasi atau larik sel surya. Orientasi dari rangkaian sel surya (larik) ke arah matahari secara optimum menjadi suatu yang penting agar panel surya dapat menghasilkan energi maksimum. Sudut orientasi (*tilt angle*) dari panel surya juga sangat mempengaruhi hasil energi maksimum. 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 dapat menyerap energi maksimum $\pm 1000 \text{ W/m}^2$ atau 1 kW/m^2 . Jika ketegaklurusan antara sinar matahari dengan bidang PV tidak dapat dipertahankan, maka dibutuhkan ekstra luasan bidang panel sel surya (bidang panel sel surya terhadap sun altitude yang berubah setiap jam dalam sehari).



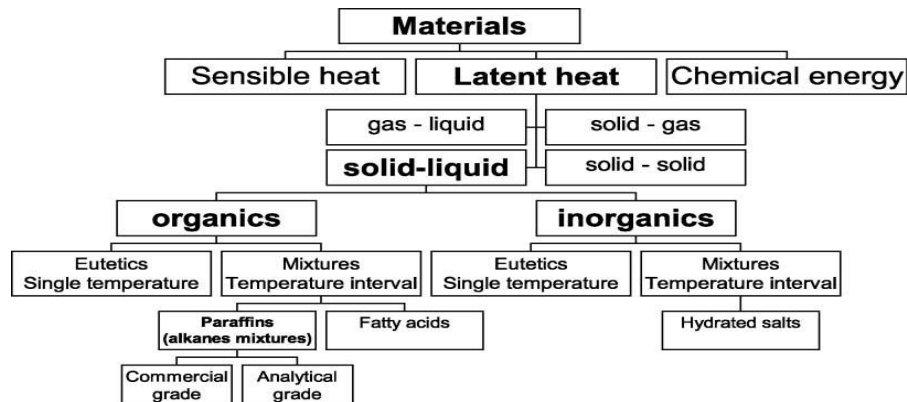
Sumber : Strong, Steven J, *The Solar Electric House*, p.66

Gambar 6. Ekstra Luasan Panel PV dalam posisi datar.

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 (Mintorogo, 2000).

D. Phase Change Material (PCM)

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



Gambar 7. Klasifikasi pemanfaatan material dalam perpindahan panas

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

Tabel 1. Beberapa PCM dengan sifat-sifat termofisikanya

	RT20	CL	CP	CaCl ₂ .6H ₂ O	SP22	CPO
Melting onset, °C	21.23	20.78	22.33	29.17	22.97	35
Melting peak, °C	25.73	24.66	26.4	29.66	24.6	30
Heat of fusion, kJ/kg	240.3	171.98	196.07	213.12	182	30.32
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	0.89
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	0.026

(M Farid Mohammed, dkk, 2004), (Ketaren, 1986)

Bahan yang akan digunakan sebagai PCMs untuk PV/PCM sistem harus memiliki kualitas tertentu atau memenuhi persyaratan (Bambang Sudarmanto, 2005):

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.

E. Passive Cooling

Salah satu fungsi PCM adalah sebagai pendingin pasif (*passive cooling*). Cara kerja pendingin pasif adalah menyeimbangkan suhu dan kelembaban secara alami dengan memanfaatkan aliran energi. Aliran energi pendingin pasif ini berupa konduksi, konveksi, dan radiasi tanpa menggunakan alat listrik. Pendingin pasif biasa digunakan untuk menjaga gedung dari panas.

Beberapa teknik *Passive Cooling* antara lain:

1. Solar Shading

Teknik solar shading menghalangi masuknya radiasi cahaya matahari ke dalam gedung sehingga tidak terjadi pemanasan udara dalam gedung dengan menggunakan jendela atau desain atap yang dapat memantulkan cahaya matahari atau bias. Menanam tanaman di sekitar gedung merupakan cara yang lebih mudah dan lebih baik. Selain mengurangi pemanasan, tanaman juga dapat menyejukkan udara dan menghasilkan oksigen. Tekstur permukaan gedung yang mempunyai sifat suhunya tidak mudah naik saat siang dan tidak mudah turun saat malam.

2. AirVentilation

Dengan menggunakan ventilasi untuk membuat aliran panas dalam ruangan. Aliran udara dalam ruangan mengkonveksi panas sehingga suhu dalam ruangan tetap terjaga.

3. *Insulation*

Insulation atau dalam bahasa Indonesia isolasi dimaksudkan untuk menjaga ruangan dari masuknya panas maupun keluarnya panas. Antara desain interior dan eksterior dipasang isolasi agar transfer panas dari dalam dan keluar gedung sedikit.

4. *Evaporative Cooling*

Udara luar didinginkan dengan menguapkan air sebelum memasuki gedung. Cara ini menggunakan prinsip bahwa panas dari udara digunakan untuk menguapkan air.

Udara panas dialirkan melewati air. Air akan menyerap panas sehingga suhu udara menjadi lebih dingin. Air yang digunakan dapat berupa kolam atau bias juga disemprotkan ke aliran udara.

5. *Earth coupling*

Teknik ini menggunakan prinsip tanah sebagai media untuk menyerap panas. Ada dua cara yaitu dengan menggunakan terowongan udara dalam tanah dan dengan menggunakan tanah sebagai media untuk menahan panas.

(M. Arif Kamal, 2012)

F. Minyak Kelapa Sawit (*Crude Palm Oil*)

Berdasarkan FAO (2000), minyak kepala sawit merupakan minyak yang didapatkan dari bagian daging buah tanaman kelapa sawit (*Elaeis guinensis jacq*) dengan kandungan minyak mencapai 56% tiap buahnya. Tanaman ini berasal dari

negara-negara Afrika Barat dan saat ini telah banyak tumbuh di negara tropis dengan curah hujan tinggi seperti Indonesia.



Gambar 8. Buah kelapa sawit

Indonesia merupakan produsen minyak sawit terbesar di dunia dengan volume produksi sebesar 20.55 juta ton pada tahun 2009 (FAOSTAT). Berdasarkan GAPKI, India merupakan importir terbesar dari crude palm oil (CPO) Indonesia diikuti oleh Uni Eropa, Cina dan Banglades. Pada tahun 2007, Indonesia dan Malaysia menguasai produksi minyak sawit dunia sebesar 87% (USDA). Minyak sawit merupakan minyak nabati yang paling banyak diperdagangkan di dunia bahkan diprediksi hingga beberapa dekade ke depan (FAPRI).

Teknologi pengolahan minyak sawit terdiri dari tahap ekstraksi, pemurnian, dan pengolahan lanjut menjadi produk pangan ataupun non pangan (Ketaren, 1996). Tahap ekstraksi meliputi proses pengepresan terhadap sabut kelapa sawit sehingga didapat minyak crude palm oil (CPO). Tahap pemurnian dari CPO dilakukan agar CPO dapat kemudian dikonsumsi menjadi minyak goreng ataupun produk turunan lainnya. Tahap pemurnian dapat dilakukan melalui proses pemisahan gum (degumming), penghilangan (refining), pemucatan (bleaching), dan deodorisasi

(deodorized). CPO yang telah mengalami proses pemurnian disebut RBDPO (refined bleached deodorized palm oil) dengan karakteristik asam lemak bebas maksimal 0.1%, bilangan peroksida maksimal 0, dan kadar air maksimal 0.1%. Proses dari CPO dapat menjadi beberapa produk antara sebelum menjadi minyak goreng, diantaranya crude palm olein (CP olein), crude palm stearin (CP stearin), refined bleached deodorized olein (RBD olein), refined bleached deodorized stearin (RBD stearin) serta RBDPO.

Menurut Birker B. dan Padley FB. (1987) minyak kelapa sawit dapat secara efektif dipisahkan menjadi olein (bagian cair 55%) dan stearin (bagian padat 45%) dengan proses fraksinasi. Hasil produksi minyak sawit sekitar 90% digunakan untuk produk-produk pangan seperti minyak goreng, minyak salad, margarin, shortening, dan lain sebagainya. Lawson (1995) menyebutkan minyak kelapa sawit juga merupakan minyak goreng yang penting di Eropa dan negara-negara Oriental.

G. Perpindahan Panas

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,

$$q = -kA \frac{(T_1 - T_2)}{\Delta x} \quad (2.2)$$

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

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

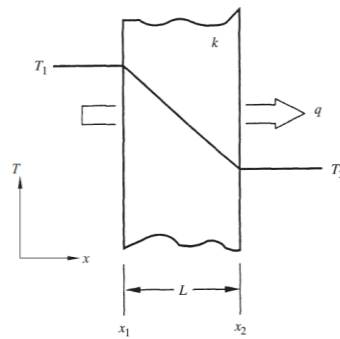
$\Delta x =$ Tebal Dinding (m)

Persamaan (2.2) membutuhkan penyisipan tanda minus 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 9), menjadi,

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

Bentuk persamaan (2.3), 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.

$$R_{cd} = \frac{T_1 - T_2}{kA} \quad (2.4)$$



Gambar 9. Perpindahan Kalor Konduksi Melalui Lempengan
(Bejan dan Kraus, 1948)

Berdasarkan rumusan persamaan (2.1) mengenai persamaan dasar konduktivitas termal, 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).

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.

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

$$Q = -\frac{k_{AA}}{\Delta x_A}(T_2 - T_1) = -\frac{k_{BA}}{\Delta x_B}(T_3 - T_2) = -\frac{k_{CA}}{\Delta x_C}(T_4 - T_3) \quad (2.5)$$

2. Perpindahan Kalor Konveksi

Proses perpindahan tenaga konveksi (*convection heat transfer*) terjadi bila sebuah fluida lewat di atas sebuah permukaan padat panas, kemudian 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.

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. Persamaan dasar untuk menghitung laju perpindahan panas konveksi yaitu,

$$q = hA (T_w - T_f) \quad (2.6)$$

Dimana : q = Laju perpindahan panas (W)

h = Koefisien perpindahan panas konveksi (W/ m².°C)

A = Luas Penampang (m²)

T_w = Temperatur Dinding (°C)

T_f = Temperatur Fluida (°C)

Di dalam sebuah geometri khusus, parameter-parameter lain yang dapat berpengaruh antara lain 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).

Perpindahan panas konveksi dapat dihitung dengan terlebih dahulu menentukan temperatur film,

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (2.7)$$

Dimana : T_s = Suhu permukaan ($^{\circ}\text{C}$)

T_∞ = Suhu fluida ($^{\circ}\text{C}$)

Dari Tabel A.4 karakteristik udara, dengan menggunakan parameter T_f ($^{\circ}\text{K}$), maka didapatkan konduktivitas termal k (W/m.K), viskositas kinematis ν (m^2/s), difusivitas termal α (m^2/s), bilangan Prandtl Pr , dan koefisien ekspansi termal $\beta = (1/T_f)$,

kemudian dari *properties* Tabel A.4 tersebut, dapat diperoleh bilangan Rayleigh menggunakan persamaan (Holman, 1983),

$$Ra_L = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L^3}{\alpha\nu} \quad (2.8)$$

Kita dapat mencari bilangan Nusselt dengan persamaan

$$Nu_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (2.9)$$

Untuk bilangan Rayleigh $\leq 10^9$, bilangan Nusselt dicari dengan persamaan

$$Nu_L = 0.68 + \frac{0.670Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{9/16}]^{4/9}} \quad (2.10)$$

$$h = \frac{Nu_L k}{L} \quad (2.11)$$

Dimana : h = Koefisien konveksi

L = Tebal plat

Dengan perkalian A sebagai luas penampang perpindahan panas, koefisien konveksi, dan perbedaan temperatur antara permukaan dan udara, perpindahan panas konveksi dapat ditulis dengan persamaan

$$q_{konv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (2.12)$$

3. 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 (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,

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2.13)$$

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.

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

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2.14)$$

Dimana : σ = Konstanta Stefan Boltzmann

$$= 5,669 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$$

$$= 0,1714 \times 10^{-8} \text{ Btu / (h. kaki}^2 \cdot \text{R}^4)$$

T = Temperatur *Absolute*

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

$$\epsilon = \frac{E}{E_b} \quad (2.15)$$

dengan E = Daya pancar benda nyata

$$E_b = \text{Daya pancar benda hitam}$$

Pada banyak bahan, emisivitas dan absorbtivitas dapat dianggap sama. Bahan ini dikelompokkan ke dalam benda kelabu (*gray bodies*), dan

$$\epsilon = \alpha \quad (2.16)$$

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 (Reynold dan Perkins, 1983).

Sifat optika permukaan, yaitu emisivitas, absorpsivitas, reflektivitas, dan transmisivitas juga mempengaruhi laju perpindahan kalor radiasi. Jika pengaruh ini dinyatakan dengan suatu faktor $F\epsilon$, maka pertukaran energi secara radiasi dapat dinyatakan dengan (Bejan dan Kraus, 1948),

$$q_{1-2} = \sigma A F_{\epsilon} F_A (T_1^4 - T_2^4) \quad (2.17)$$

untuk perbedaan temperatur, persamaan (2.10) dapat ditulis dalam bentuk,

$$q_r = h_r S (T_1 - T_2) \quad (2.18)$$

Dimana : h_r = koefisien perpindahan panas radiasi.

S = Faktor bentuk

T_1 = Suhu di dalam permukaan ($^{\circ}\text{C}$)

T_2 = Suhu di luar permukaan ($^{\circ}\text{C}$)

H. Daya Masukan dan Daya Keluaran PV

Daya yang diterima (daya input) adalah perkalian antara intensitas radiasi matahari yang diterima dengan luas area PV module dengan persamaan:

$$P_{in} = I_r \times A \quad (2.19)$$

Keterangan:

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

I_r : Intensitas radiasi matahari (watt/ m^2)

A : Luas area permukaan photovoltaic module (m^2)

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 :

$$P_{out} = V_{oc} \times I_{sc} \times FF \quad (2.20)$$

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:

$$FF = V_{oc} - \ln(V_{oc} + 0.72) / V_{oc} + 1 \quad (2.21)$$

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 (Muchammad dan Eflita Yohana, 2010).

$$\eta = \frac{Output}{Input} \times 100\% \quad (2.22)$$

Sehingga efisiensi yang dihasilkan:

$$\eta \text{ sesaat} = \frac{P}{I_r \times A} \times 100\% \quad (2.23)$$

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)