

II. FUNDAMENTAL

Diawali dengan konsep tentang energi, bab ini mengulas secara singkat pengetahuan dasar radiasi surya dan landasan teori dari berbagai disiplin ilmu yang berhubungan erat dengan proses termal teknologi surya, terutama ilmu perpindahan panas dan ilmu tentang aliran fluida.

1. HUKUM PERTAMA - TERMODINAMIKA

Energi dapat berpindah dari satu sistem menuju sistem yang lain melalui bentuk kerja ataupun panas. Kerja adalah modus perpindahan energi yang dapat diamati atau diukur efeknya secara makroskopik. Perpindahan energi yang tidak dapat diamati dalam bentuk kerja makroskopik disebut perpindahan energi sebagai panas.

Energi suatu sistem adalah konstan. Apabila energi suatu sistem bertambah, energi yang lain harus berkurang dengan jumlah yang sama. Masukan energi total ke dalam suatu sistem harus tepat menjadi pertambahan energi pada sistem itu. Peristiwa ini disebut sebagai keseimbangan energi yang dijabarkan dengan persamaan

$$W + Q = \Delta E \quad (2-1)$$

dimana W dan Q menyatakan besar perpindahan energi dalam bentuk kerja dan panas ke dalam massa atur atau suatu sistem dan ΔE adalah pertambahan energi di dalam massa atur yaitu selisih energi akhir dengan energi awal.

Persamaan keseimbangan energi di atas adalah pernyataan matematik dari hukum pertama termodinamika yang berlaku untuk massa atur. Sesuai dengan hukum pertama termodinamika yaitu zat mempunyai energi, dan bahwa energi itu adalah kekal.

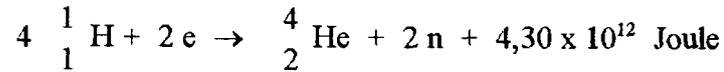
2. RADIASI SURYA

2.1 Struktur Fisik Matahari

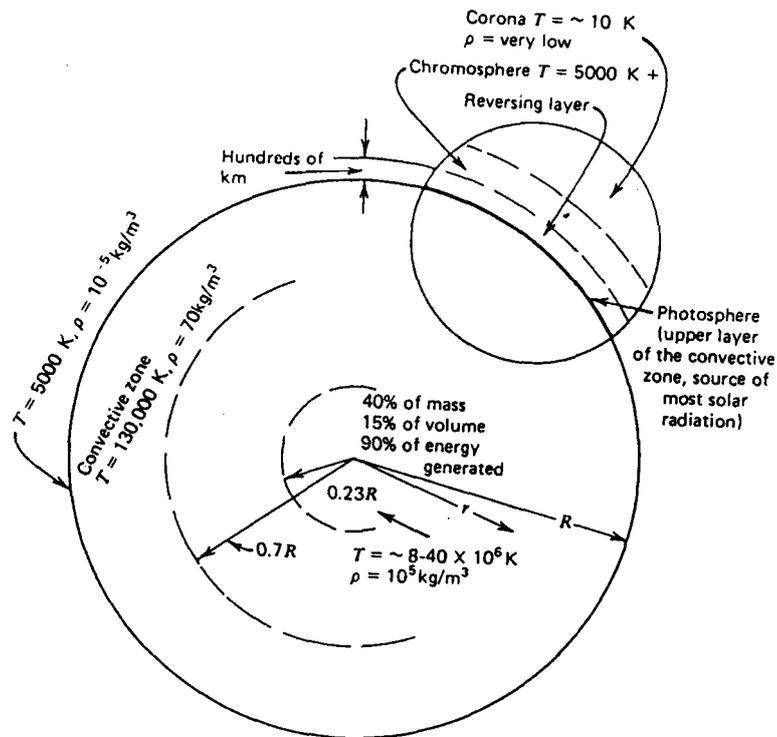
Matahari adalah sebuah bola gas yang amat panas dengan garis tengah 1,39 juta kilometer dan berjarak rata-rata 150 juta kilometer dari bumi. Massa matahari sangat besar, yaitu 2×10^{30} kg, tetapi massa jenis rata-ratanya hanya 1400 kg/m^3 . Matahari berputar pada porosnya kira-kira sekali pada tiap empat minggu. Namun matahari bukanlah suatu benda padat, sehingga kecepatan rotasi matahari tidak sama pada tiap bagiannya. Pada daerah ekuator, periode rotasinya 27 hari, dan bagian kutub kira-kira 30 hari.

Sebenarnya matahari adalah sebuah reaktor fusi berkelanjutan dengan unsur-unsur pokok gas sebagai 'isi tungku' yang ditahan oleh gaya gravitasi yang kuat. Reaksi fusi terjadi di dalam inti matahari dimana empat atom

Hidrogen bergabung membentuk inti atom Helium disertai pelepasan energi yang sangat besar, dinyatakan dengan persamaan reaksi fusi.



Struktur matahari secara skematik diperlihatkan pada Gambar 2-1



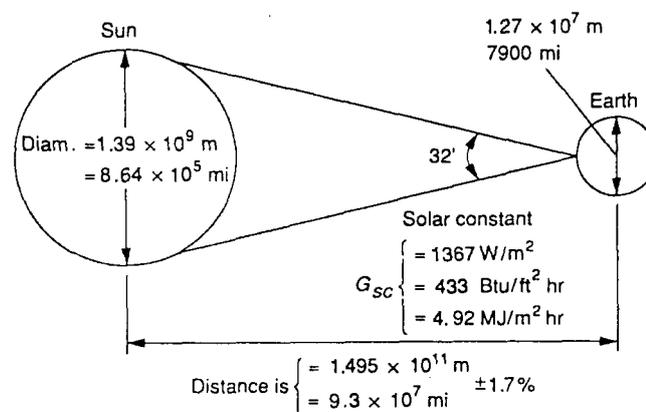
Gambar 2-1 Struktur matahari.

Temperatur di dalam daerah sentral matahari yaitu pada $0 - 0,23 R$ (R adalah radius matahari) bervariasi antara 8 juta sampai 40 juta Kelvin. Pada daerah pusat ini, yang mengandung 40% massa matahari, diperkirakan menghasilkan 90% energinya. Pada jarak $0,7 R$ dari pusat, mulai terjadi proses konveksi, dan temperaturnya turun sampai kira-kira 130.000 K , disertai juga dengan penurunan densitas sampai 70 kg/m^3 . Suatu daerah yang berada pada $0,7 - 1,0 R$ adalah zona konvektif. Dalam daerah ini

penurunan temperatur berlanjut sampai kira-kira 5000 K dengan densitas sebesar 10^{-5} kg/m^3 . Bagian luar dari zona konvektif adalah photospher yang merupakan sumber radiasi surya terbanyak. Bagian yang lebih luar lagi yaitu lapisan setinggi 10.000 kilometer yang disebut kromosfer. Bagian paling luar dari matahari adalah korona, suatu daerah dengan kepadatan yang sangat rendah tetapi temperaturnya sangat tinggi yaitu satu juta Kelvin.

2.2 Konstanta Matahari

Jarak antara matahari dan bumi bervariasi sekitar 1,7 %. Perbedaan jarak ini disebabkan oleh orbit bumi yang eksentrik.



Gambar 2-2 Hubungan ruang matahari-bumi.

Namun ada suatu harga yang disebut sebagai satu satuan astronomi yang menyatakan jarak rata-rata matahari dan bumi yaitu $1,495 \times 10^{11} \text{ m}$. Hubungan geometri matahari-bumi diperlihatkan pada Gambar 2-2. Dalam kaitannya dengan hubungan ruang di atas, radiasi yang dipancarkan matahari menghasilkan intensitas radiasi di luar atmosfer yang mendekati konstan. Konstanta matahari, G_{sc} adalah energi yang dipancarkan matahari tiap satuan

waktu yang diterima oleh suatu satuan luasan permukaan yang tegak lurus arah perambatan radiasi pada satu satuan astronomi, di luar atmosfer.

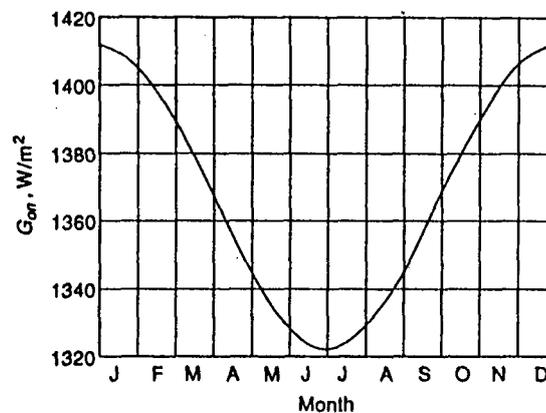
Berbagai pengukuran radiasi matahari dilakukan dengan bermacam alat ukur, diantaranya oleh Frohlich (1977) yang merekomendasikan harga G_{sc} sebesar 1373 W/m^2 dengan kemungkinan kesalahan 1 - 2%. World Radiation Center (WRC) mengambil harga sebesar 1367 W/m^2 dengan ketelitian 1%.

2.3 Variasi Radiasi Luar Angkasa

Ketidaktetapan jarak matahari dan bumi dari waktu ke waktu membawa akibat variasi fluks radiasi di luar angkasa (*extraterrestrial*) kurang lebih 3%. Ketergantungan radiasi di luar bumi ini dalam hitungan tahun dinyatakan dengan Persamaan 2-2¹ dan diperlihatkan pada Gambar 2-3.

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (2-2)$$

di mana G_{on} adalah radiasi di luar bumi yang diukur pada bidang normal terhadap radiasi pada hari ke-n dalam suatu tahun.



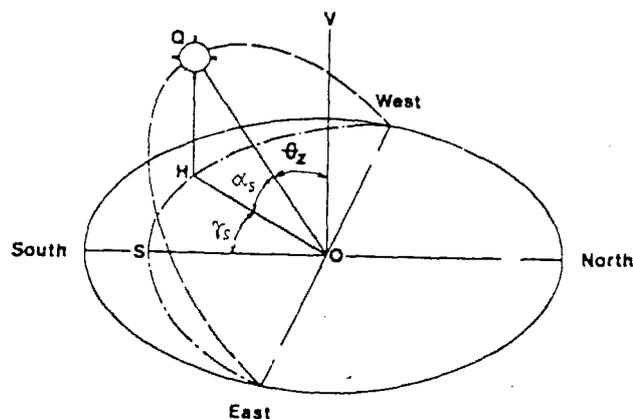
Gambar 2-3 Variasi radiasi *extraterrestrial* sepanjang tahun.

¹ J.A.Duffie & W.A.Beckmann, Solar Engineering of Thermal Processes, John Wiley & Sons, Inc, New York, 1991, hal 10.

2.4 Geometri Radiasi Surya

Jumlah radiasi yang diterima oleh suatu bidang permukaan di bumi dipengaruhi oleh geometri radiasi surya. Untuk memahami geometri radiasi surya, adalah lebih mudah untuk menganggap matahari bergerak secara semu dalam suatu sistem koordinat dimana bumi dianggap sebagai titik tetap.

Posisi matahari dapat ditentukan oleh dua sudut seperti ditunjukkan pada Gambar 2-4. Sudut yang pertama adalah sudut ketinggian matahari, α_s (*solar altitude angle*), yaitu sudut yang diukur antara sinar radiasi datang dengan proyeksi sinar radiasi datang terhadap bidang horisontal. Yang kedua yaitu sudut azimuth matahari, γ_s (*solar azimuth angle*) dan diukur pada bidang horisontal antara garis Selatan dan proyeksi sinar radiasi pada bidang horisontal. Tanda positif untuk arah Barat dan negatif untuk arah Timur. Selain itu ada yang disebut sebagai sudut zenit, θ_z yaitu sudut antara sinar radiasi datang dengan normal bidang horisontal (komplemen dari sudut ketinggian matahari).



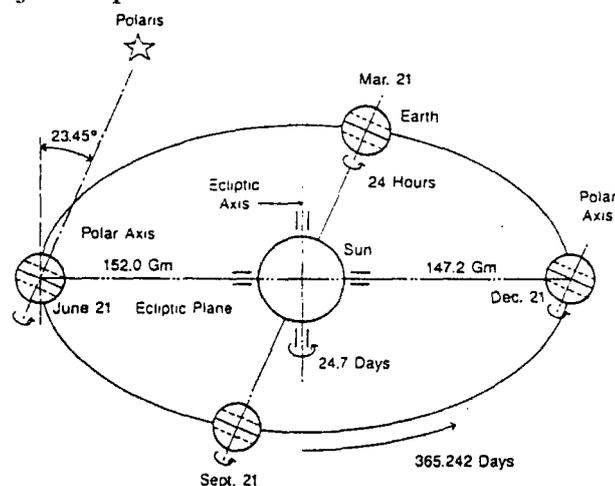
Gambar 2-4 Lintasan matahari pada koordinat bumi.

Bumi dalam peredarannya mengitari matahari, berotasi pada sumbunya yang condong sebesar $23,45^\circ$ terhadap bidang ekliptika. Kemiringan sumbu putar bumi ini menyebabkan variasi sudut antara garis bumi-matahari terhadap bidang ekuator bumi setiap harinya. Sudut ini disebut sebagai sudut deklinasi matahari, δ (*solar declination*). Sudut deklinasi adalah fungsi sinus dari urutan hari dalam satu tahun dapat dihitung dengan persamaan berikut²

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right) \quad (2-3)$$

dimana n adalah nomor urut tanggal dalam satu tahun, dimulai $n = 1$ pada tanggal 1 Januari dan seterusnya.

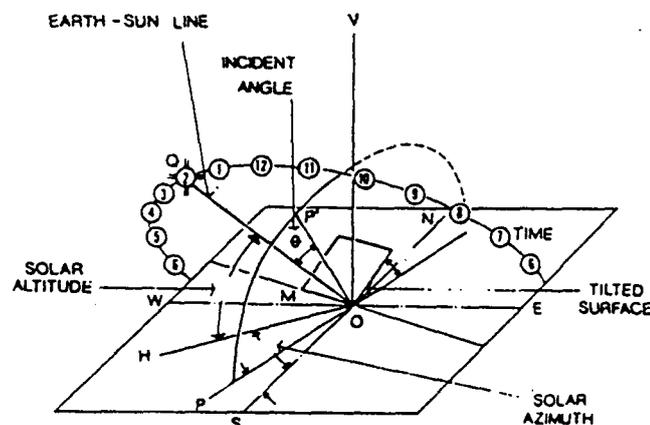
Perubahan sudut deklinasi dalam tiap harinya membawa pada perubahan musim dengan variasi distribusi radiasi surya di atas permukaan bumi dan variasi banyaknya jam pada siang maupun malam. Perubahan deklinasi sepanjang tahun dapat diikuti menurut peredaran bumi mengitari matahari seperti ditunjukkan pada Gambar 2-5.



Gambar 2-5 Pergerakan bumi terhadap matahari sepanjang tahun.

Posisi atau letak suatu tempat di bumi juga menjadi suatu faktor yang mempengaruhi penerimaan radiasi di tempat tersebut. Letak suatu daerah di bumi ditentukan oleh sudut lintang, ϕ (*latitude*), dengan tanda positif untuk belahan bumi bagian Utara dan negatif untuk belahan bumi bagian Selatan.

Untuk suatu bidang permukaan penerima radiasi yang dimiringkan sebesar β terhadap bidang horisontal terdapat istilah sudut insiden, θ (*incident angle*). Sudut insiden seperti diperlihatkan pada Gambar 2-6, diukur antara sinar datang dan garis normal bidang permukaan penerima radiasi yang dimiringkan. Apabila permukaan horisontal maka sudut insiden adalah sama dengan sudut zenit.



Gambar 2-6 Sudut insiden pada suatu permukaan.

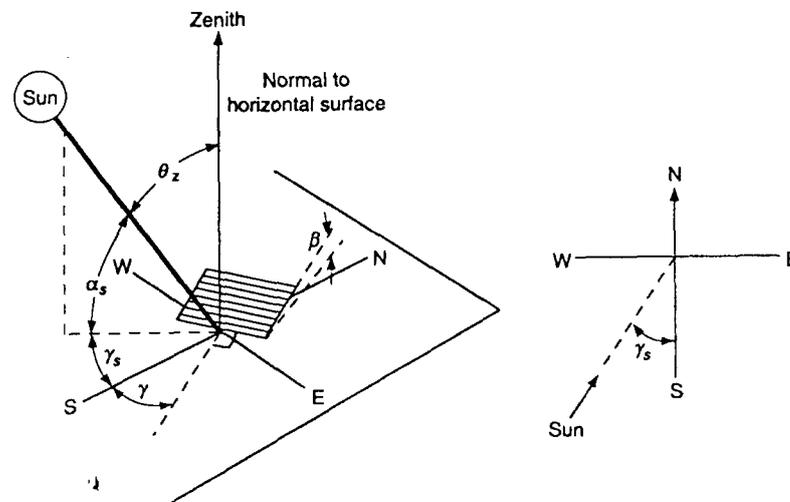
Dalam teknologi surya sudut insiden adalah penting karena menentukan intensitas komponen radiasi langsung yang menimpa suatu permukaan dan kemampuan suatu permukaan untuk menyerap, meneruskan, atau memantulkan sinar matahari.

Sudut jam matahari, ω (*hour angle*) adalah sudut pergeseran matahari, setara dengan 15° kali banyaknya jam dihitung dari tengah hari lokal. Jadi

pada jam 12 siang waktu matahari adalah nol. Pada arah Timur yaitu pagi hari sudut jam matahari positif, siang hari berharga negatif.

Untuk menghitung sudut insiden, perlu diketahui juga sudut azimuth permukaan, γ (surface azimuth angle), yaitu ukuran penyimpangan arah normal proyeksi suatu bidang penerima radiasi pada bidang horisontal terhadap garis arah Selatan. Sudut ini berharga negatif untuk arah Timur, nol pada arah Selatan, dan positif pada arah Barat.

Gambar 2-7 menunjukkan beberapa sudut dalam geometri radiasi surya.



Gambar 2-7 Geometri radiasi surya.

Berdasarkan pengetahuan beberapa sudut-sudut di atas maka arah radiasi langsung dapat dihitung dengan persamaan berikut³

$$\begin{aligned}
 \cos \theta = & \sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma \\
 & + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \\
 & + \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma \cos \omega \\
 & + \cos \delta \sin \beta \sin \gamma \sin \omega
 \end{aligned} \tag{2-4}$$

Untuk suatu permukaan horisontal dimana sudut datang adalah sudut zenit matahari, θ_z , maka $\beta = 0$ sehingga persamaan menjadi

$$\cos \theta_z = \cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (2-5)$$

Persamaan ini dapat dinyatakan juga dalam bentuk ω_s , yaitu sudut jam matahari terbit pada saat $\theta_z = 90^\circ$.

$$\cos \omega_s = - \frac{\sin \phi \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta} = - \tan \phi \tan \delta \quad (2-6)$$

Persamaan di atas dapat digunakan untuk mendapatkan jumlah jam pancaran matahari dalam sehari

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1} \omega_s \quad (2-7)$$

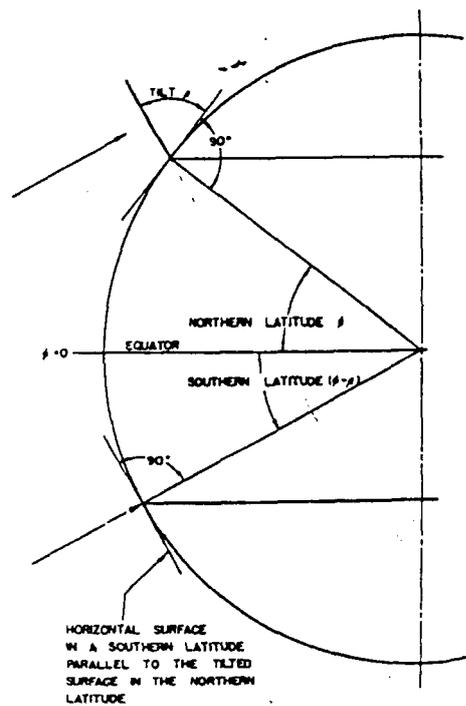
Sudut kemiringan optimum kolektor bervariasi sesuai letak di mana kolektor itu dioperasikan. Faktor musim juga perlu diperhatikan pada saat penggunaan kolektor. Gambar 2-8 menunjukkan hubungan sudut antara kolektor yang dimiringkan pada belahan bumi Utara dan kolektor horisontal pada belahan bumi Selatan.

Suatu kolektor yang dimiringkan sebesar sudut β pada posisi lintang ϕ mempunyai efek penerimaan radiasi beam yang sama dengan kolektor horisontal pada posisi lintang $(\phi - \beta)$.

2.5 Radiasi Luar Angkasa Pada Permukaan Horisontal

Radiasi surya di luar atmosfer yang menimpa suatu bidang horisontal di suatu tempat pada suatu waktu dinyatakan dengan persamaan

$$G_o = G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \cos \theta_z \quad (2-8)$$



Gambar 2-8 Hubungan sudut antara dua kolektor pada posisi lintang yang berbeda.

dimana G_{sc} adalah konstanta matahari dan n menyatakan urutan hari, G_o dinyatakan dalam satuan Watt per meter persegi.

Dengan mensubstitusikan persamaan (2-5) ke dalam persamaan di atas, maka diperoleh

$$G_o = G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] (\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta) \quad (2-9)$$

Acapkali diperlukan perhitungan radiasi surya harian, maka persamaan (2-9) dapat diintegrasikan berdasarkan waktu dari matahari terbit hingga terbenam. Radiasi surya harian, H_o dinyatakan dalam satuan Joule per meter persegi menurut persamaan

$$H_o = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \times \left(\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{\pi \omega_s}{180} \sin \phi \sin \delta \right) \quad (2-10)$$

dimana sudut jam matahari terbit, ω_s dinyatakan dalam derajat.

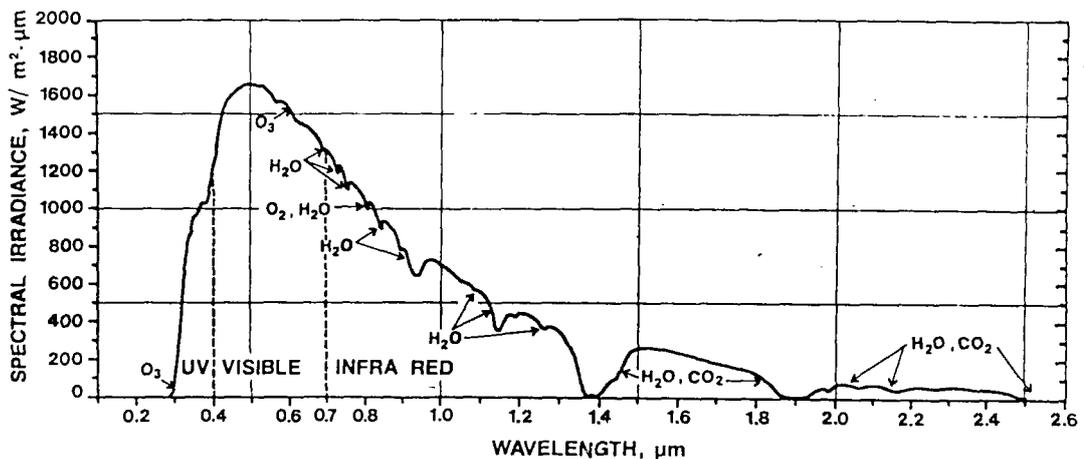
Persamaan (2-9) dapat juga diintegrasikan berdasarkan selang sudut jam matahari sehingga diperoleh persamaan radiasi *extraterrestrial* pada permukaan horisontal untuk periode jam

$$I_o = \frac{12 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left[1 + 0,033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \times \left(\cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180} + \sin \phi \sin \delta \right) \quad (2-11)$$

dimana ω_1 dan ω_2 menyatakan selang waktu (sudut jam matahari) tertentu.

2.6 Penyebaran Spektrum Radiasi Luar Angkasa

Energi total dalam spektrum matahari dapat didistribusikan menurut daerah-daerah panjang gelombang (*spectral distribution*). Gambar 2-9 menampilkan penyebaran energi berdasarkan daerah panjang gelombang.



Gambar 2-9 Distribusi spektral radiasi surya pada permukaan laut.

Bagian spektrum ultra ungu yaitu di bawah $0,4 \mu\text{m}$ terdiri dari 8,73 % energi total. Spektrum cahaya tampak, antara $0,40$ hingga $0,70 \mu\text{m}$ mengandung 38,15% energi dan sisanya sebesar 53,12% energi berada pada daerah spektrum infra merah.

2.7 Radiasi Surya Pada Permukaan Bumi

Radiasi surya yang sampai pada permukaan bumi telah mengalami perubahan intensitas akibat penghamburan antara lain oleh molekul-molekul udara, nitrogen dan oksigen, aerosol, uap air dan debu dan partikel-partikel lain. Penghamburan radiasi ini menyebabkan langit tampak berwarna biru pada hari cerah.

Beberapa radiasi yang sudah mengalami penghamburan ini mencapai permukaan bumi dikenal sebagai radiasi difus. Radiasi difus biasanya juga disebut sebagai radiasi langit. Apabila radiasi surya tidak mengalami penghamburan oleh atmosfer, maka radiasi sampai ke permukaan bumi sebagai radiasi langsung (*beam radiation*).

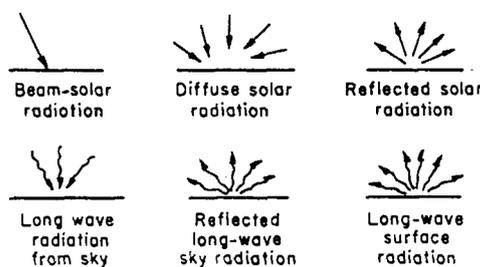
Pelemahan radiasi juga disebabkan oleh penyerapan atmosfer oleh molekul-molekul Ozon, air dan karbondioksida. Penyerapan radiasi oleh molekul Ozon di luar atmosfer terjadi pada daerah panjang gelombang ultra violet dan panjang gelombang radiasi di bawah $0,29 \mu\text{m}$. Uap air memegang peranan penting dalam penyerapan spektrum radiasi inframerah. Banyaknya pelemahan radiasi ditentukan oleh panjang lintasan atmosfer yang dilalui sinar dan komposisi atmosfer. Panjang lintasan atmosfer dinyatakan dalam massa udara (*air mass*) yaitu rasio massa atmosfer dalam lintasan bumi-matahari

yang sesungguhnya terhadap massa yang berada dalam lintasan dimana matahari tepat di atas permukaan laut. Rasio massa udara dirumuskan ⁴

$$m = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (2-12)$$

Jadi pada permukaan laut apabila matahari berada tepat pada zenit nilai $m=1$.

Secara umum radiasi termal dapat dibedakan menurut daerah panjang gelombangnya yaitu radiasi surya atau radiasi gelombang pendek dan radiasi gelombang panjang. Radiasi gelombang pendek berasal atau dipancarkan dari matahari dan berada pada daerah panjang gelombang 0,3-3,0 μm . Radiasi gelombang panjang berasal dari suatu sumber pada temperatur mendekati temperatur ambien dengan daerah panjang gelombang lebih dari 3 μm . Radiasi gelombang panjang bisa dipancarkan oleh atmosfer, kolektor atau benda lain pada temperatur normal. Apabila radiasi dipancarkan dari bumi maka disebut radiasi terrestrial. Gambar 2-10 menunjukkan sifat radiasi yang sampai ke permukaan bumi.



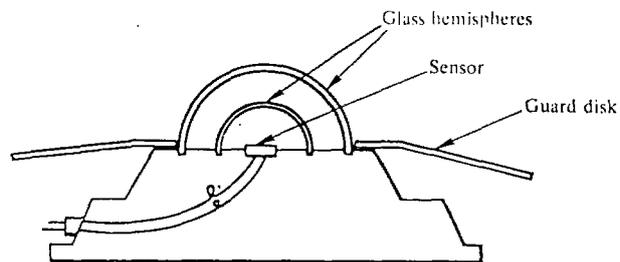
The radiant energy fluxes of importance in solar thermal processes. Short-wave solar radiation is shown by \rightarrow . Long-wave radiation is shown by \rightsquigarrow .

Gambar 2-10 Sifat radiasi yang penting dalam proses termal surya.

2.8 Instrumen Pengukur Radiasi Surya

Besarnya energi radiasi yang tersedia pada suatu tempat tertentu perlu diketahui untuk perancangan teknik suatu sistem surya. Oleh karena itu perlu adanya data pengukuran jumlah radiasi pada suatu tempat.

Untuk mengukur jumlah radiasi pada suatu tempat umumnya digunakan instrumen pengukur radiasi yang disebut *pyranometer*. Instrumen ini dapat mengukur radiasi total (*beam* dan *diffuse*), biasanya pada permukaan horisontal. Pyranometer diperlihatkan pada Gambar 2-11.



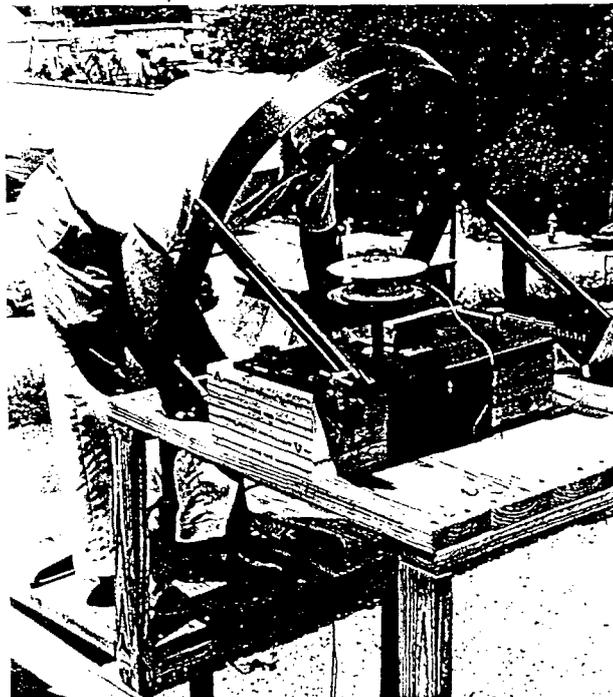
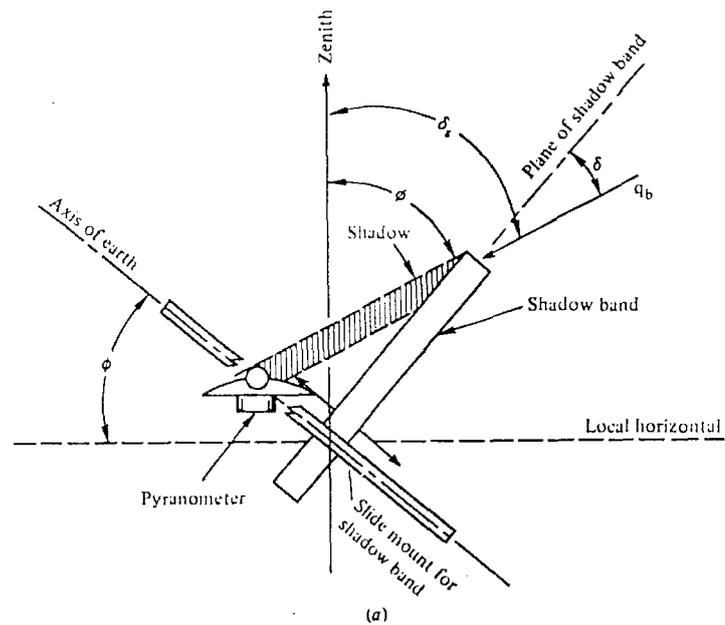
(a)



(b)

Gambar 2-11 (a) Skematik. (b) Pyranometer surya dibuat oleh Laboratorium Eppley.

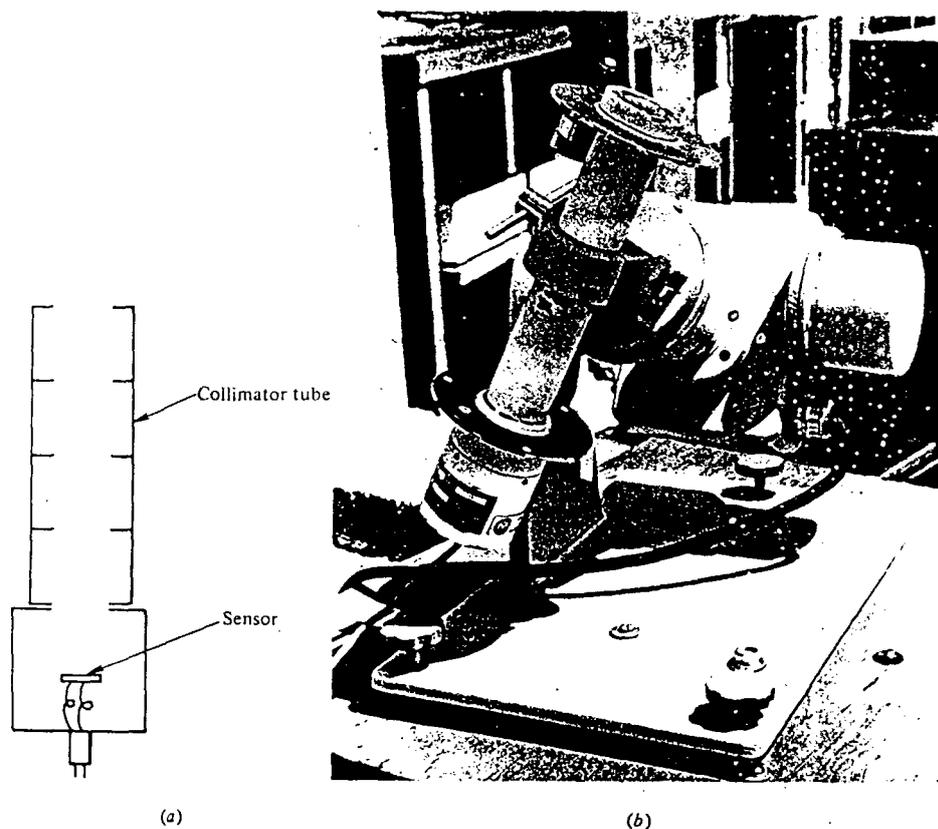
Pyranometer dapat dilengkapi dengan suatu cincin atau piringan yang disebut *shading ring* untuk mengukur radiasi difus. Gambar 2-12 memperlihatkan pyranometer yang dilengkapi dengan cincin untuk menghalangi radiasi langsung.



Gambar 2-12 (a) Skematik. (b) Pyranometer dengan cincin.

Instrumen pengukur radiasi yang kedua adalah *pyrheliometer*, yang digunakan untuk mengukur radiasi *beam*. Pyrheliometer ditunjukkan pada Gambar 2-13.

Pyranometer biasanya disebut juga sebagai *solarimeter*, sedangkan *actinometer* adalah istilah yang sama dengan *pyrheliometer*.



Gambar 2-13 (a) Skematik. (b) Pyrheliometer buatan Laboratorium Eppley.

2.9 Indeks Kecerahan Langit

Radiasi yang datang pada permukaan bumi sudah mengalami penyusutan energi akibat pengaruh atmosfer bumi. Radiasi yang diterima oleh suatu permukaan horisontal dapat dibandingkan dengan radiasi extraterrestrial dalam suatu fraksi yang dinamakan indeks kecerahan langit.

Suatu indeks kecerahan langit⁵, k_T adalah perbandingan energi radiasi yang diterima oleh suatu permukaan horisontal tiap jam dengan energi radiasi ekstraterrestrial tiap jam,

$$k_T = \frac{I}{I_0} \quad (2-13)$$

Indeks kecerahan langit dapat juga dinyatakan berdasarkan radiasi harian, K_T yaitu rasio energi radiasi pada hari tertentu terhadap energi radiasi ekstraterrestrial pada hari tersebut.

$$K_T = \frac{H}{H_0} \quad (2-14)$$

Untuk perhitungan energi radiasi rata-rata bulanan, indeks kecerahan langit dinyatakan oleh \bar{K}_T yaitu fraksi radiasi rata-rata bulanan terhadap radiasi ekstraterrestrial rata-rata bulanan.

$$\bar{K}_T = \frac{\bar{H}}{\bar{H}_0} \quad (2-15)$$

Harga I , H , dan \bar{H} diperoleh dari pengukuran radiasi surya total pada permukaan horisontal, dengan menggunakan pyranometer. Sedangkan I_0 , H_0 , dan \bar{H}_0 dapat dihitung dengan persamaan pada bagian 2.5.

2.10 Komponen Radiasi Langsung Dan Radiasi Difus

Komponen radiasi difus pada suatu bidang horisontal dapat diperkirakan dengan adanya data indeks kecerahan langit. Orgill dan Hollands (1977) telah

⁵ Ibid hal 77

menggunakan data-data stasiun di Kanada yang mengkorelasikan I_d / I dengan indeks kecerahan langit tiap jam. Korelasi ini dinyatakan dengan

$$\frac{I_d}{I} = \begin{cases} 1,0 - 0,249 k_T & \text{untuk } k_T < 0,35 \\ 1,557 - 1,84 k_T & \text{untuk } 0,35 < k_T < 0,75 \\ 0,177 & \text{untuk } k_T > 0,75 \end{cases} \quad (2-16)$$

Untuk radiasi harian, fraksi radiasi difus dapat dinyatakan dengan sebagai fungsi K_T . Berdasarkan penelitian di stasiun Amerika Serikat, Collares-Pereira dan Rabl membuat korelasi H_d / H .

$$\begin{aligned} H_d / H &= 0,99 && \text{untuk } K_T \leq 0,17 \\ H_d / H &= 1,188 - 2,272 K_T + 9,473 K_T^2 \\ &\quad - 21,865 K_T^3 + 14,648 K_T^4 && \text{untuk } 0,17 < K_T < 0,75 \quad (2-17) \\ H_d / H &= -0,54 K_T + 0,632 && \text{untuk } 0,75 < K_T < 0,80 \\ H_d / H &= 0,2 && \text{untuk } K_T \geq 0,80 \end{aligned}$$

Fraksi radiasi difus bulanan juga dapat diplot sebagai fungsi indeks kecerahan langit rata-rata bulanan. Collares-Pereira dan Rabl menemukan ketergantungan musim pada hubungan ini yang dinyatakan oleh sudut jam matahari terbit. Persamaan fraksi radiasi difus bulanan dinyatakan,

$$\begin{aligned} \frac{\overline{H_d}}{\overline{H}} &= 0,775 + 0,00606 (\overline{\omega_s} - 90) \\ &\quad - [0,505 + 0,0045 (\overline{\omega_s} - 90)] \cos [115 \overline{K_T} - 103] \quad (2-18) \end{aligned}$$

2.11 Radiasi Total Pada Permukaan Miring Tetap

Permukaan pengumpul radiasi surya plat datar menyerap baik radiasi langsung maupun radiasi difus. Radiasi yang datang pada suatu permukaan miring dapat diperkirakan dengan suatu faktor geometrik R , yang menyatakan perbandingan radiasi total yang jatuh pada suatu permukaan miring terhadap radiasi yang diterima apabila permukaan tersebut pada posisi horisontal.

$$R = \frac{I_T}{I} \quad (2-19)$$

Faktor geometrik R dapat diimplementasikan pada komponen radiasi langsung ataupun difus:

$$R_b = \frac{I_{bT}}{I_b} \quad (2-20a)$$

dan

$$R_d = \frac{I_{dT}}{I_d} \quad (2-20b)$$

sehingga faktor geometrik R dapat dinyatakan dalam

$$R = \frac{I_b}{I} R_b + \frac{I_d}{I} R_d \quad (2-21)$$

Indeks b , d , dan T secara berturut-turut menyatakan komponen radiasi langsung, komponen difus, dan posisi miring. Dalam hubungannya dengan geometri radiasi surya, R_b dapat ditetapkan dengan persamaan⁶:

$$R_b = \frac{\cos \theta}{\cos \theta_z} \quad (2-22)$$

⁶

Ibid hal 25

Penentuan faktor R_d adalah berdasarkan keadaan langit. Apabila langit cerah maka $R_d = R_b$, apabila langit berawan secara merata maka $R_d = 1$.

Liu dan Jordan (1963) mengembangkan suatu model radiasi total pada permukaan miring yang terdiri atas tiga komponen: radiasi langsung, radiasi difus dan radiasi yang dipantulkan secara difus dari tanah. Jadi radiasi surya total pada permukaan yang membentuk sudut β adalah⁷

$$I_T = I_b R_b + I_d \left(\frac{1 + \cos \beta}{2} \right) + (I_b + I_d) \rho \left(\frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (2-23)$$

Permukaan dengan kemiringan β terhadap bidang horisontal mempunyai 'view factor' terhadap langit sebesar $(1 + \cos \beta)/2$ dan terhadap tanah $(1 - \cos \beta)/2$. Faktor pantulan, ρ dari tanah ditetapkan sebesar 0,2 bila tidak ada salju, dan 0,7 bila terdapat salju.

7

Ibid hal 95

3. PERPINDAHAN PANAS KONDUKSI

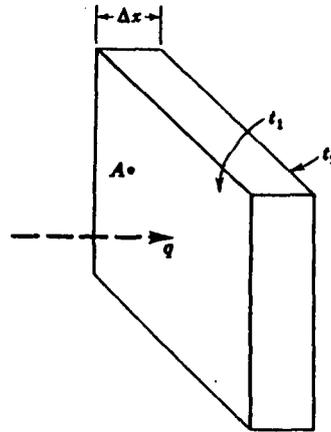
Desain sistem termal energi matahari mempunyai hubungan erat dengan prinsip-prinsip dasar perpindahan panas. Selama dijumpai adanya perbedaan temperatur, maka akan terjadi perpindahan energi dari daerah bertemperatur tinggi ke daerah bertemperatur rendah. Energi yang dipindahkan ini disebut sebagai *panas* dalam istilah termodinamika.

Bila termodinamika membahas mengenai keseimbangan sistem maka ilmu perpindahan panas melengkapi hukum pertama termodinamika yang menjelaskan mekanisme perpindahan panas. Dalam studi perpindahan panas, dapat diketahui laju perpindahan panas dan waktu yang diperlukan suatu sistem untuk mencapai keseimbangan. Ada tiga modus perpindahan panas yaitu konduksi, konveksi dan radiasi.

3.1 Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas konduksi adalah istilah yang dipakai untuk mekanisme pertukaran energi dalam dari satu bagian benda ke bagian benda yang lain oleh pertukaran energi kinetik dari gerakan molekul-molekul benda. Aliran energi terjadi dari molekul-molekul berenergi tinggi ke molekul-molekul dengan energi yang lebih rendah atau dengan kata lain dari daerah bertemperatur tinggi ke daerah bertemperatur rendah. Ciri khas modus perpindahan panas konduksi adalah terjadi dalam batasan suatu benda atau melintasi batas benda menuju benda lain yang saling bersentuhan tanpa adanya perpindahan massa.

Modus perpindahan panas konduksi umumnya terjadi pada benda solid, secara sederhana diilustrasikan pada Gambar 2-14.



Gambar 2-14 Modus perpindahan panas konduksi.

Suatu bahan plat dengan luas permukaan A dan ketebalan Δx , salah satu sisinya berada pada temperatur t_1 dan sisi yang lain berada pada temperatur yang lebih rendah yaitu t_2 . Menurut konsep dasar termodinamika akan terjadi aliran energi q melalui plat tanpa memperhatikan pengaruh dari sisi samping. Percobaan membuktikan bahwa laju aliran energi (energi yang dipindahkan per satuan waktu) adalah berbanding lurus dengan luas permukaan A dan beda temperatur, namun berbanding terbalik dengan Δx .

Kesebandingan ini dapat dinyatakan

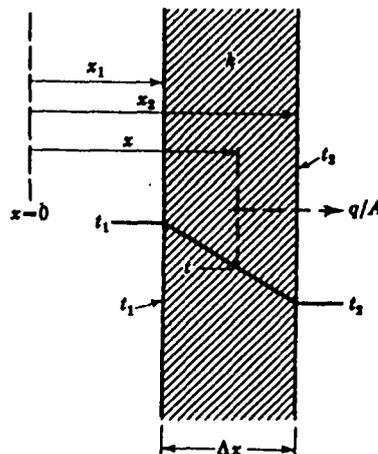
$$q \propto A \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

Laju aliran energi yang sebenarnya juga bergantung kepada suatu konstanta kesebandingan k yang disebut sebagai konduktivitas termal bahan plat, dipengaruhi oleh komposisi bahan.

$$q = -k A \frac{\Delta t}{\Delta x}$$

Tanda negatif di depan konduktivitas sebagai konsekuensi dari Hukum II Termodinamika bahwa panas dipindahkan pada arah penurunan temperatur.

Bidang dinding atau plat sebagai media konduksi mempunyai suatu ketebalan tertentu dimana panas konduksi merambat dalam satu dimensi. Idealisasi keadaan yang dapat diambil yaitu konduktivitas bahan dinding adalah konstan dan setiap permukaan normal terhadap x berada pada temperatur *uniform*. Gambar 2-15 menunjukkan distribusi temperatur sepanjang arah aliran energi pada bidang dinding dengan ketebalan Δx dan konduktivitas bahan konstan.



Gambar 2-15 Distribusi temperatur pada arah aliran konduksi.

Sesuai dengan ilustrasi pada Gambar 2-15, maka persamaan laju panas konduksi dapat diturunkan dengan Hukum Fourier

$$q = -k A \frac{t_2 - t_1}{x_2 - x_1} = k A \frac{t_1 - t_2}{\Delta x} \quad (2-24)$$

Persamaan laju konduksi di atas adalah dalam keadaan tunak (*steady state*) dimana temperatur pada suatu titik yang tetap tidak berubah menurut waktu.

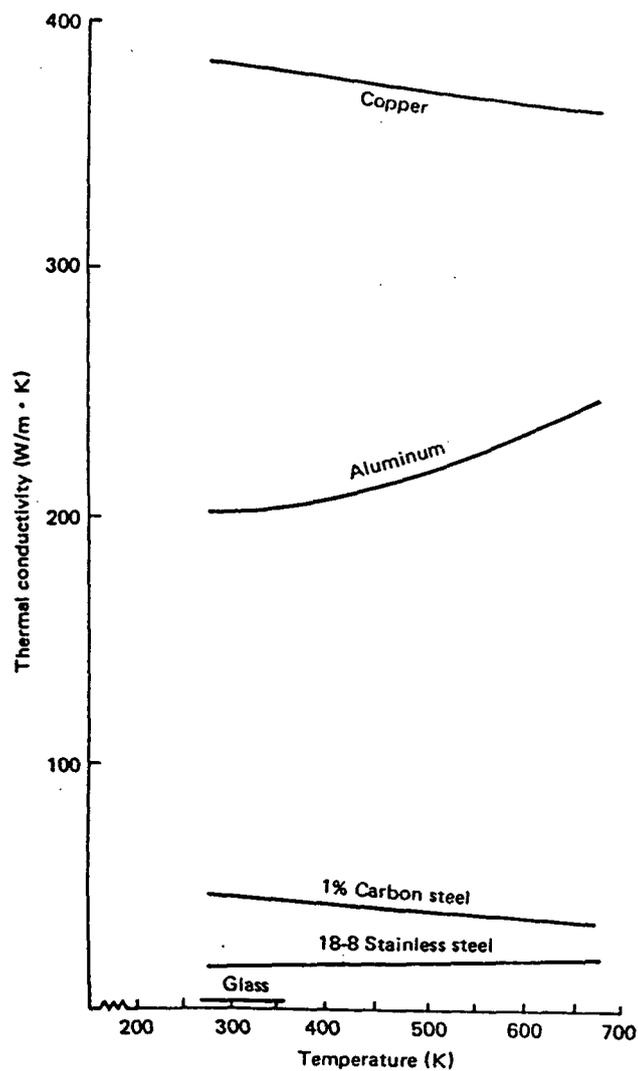
3.2 Konduktivitas Termal dan Tahanan Termal

Konduktivitas termal adalah suatu nilai tetapan pada bahan yang menentukan kemampuan bahan tersebut menyerap dan menghantarkan panas. Bahan dengan nilai konduktivitas termal yang tinggi dapat mengalirkan panas lebih cepat, sesuai dengan persamaan laju konduksi.

Secara mikroskopis, mekanisme konduksi dapat dijelaskan dengan teori kinetik. Bila suatu substansi menyerap panas maka kecepatan rata-rata molekul-molekul substansi tersebut akan meningkat. Molekul-molekul berenergi tinggi itu menumbuk molekul-molekul disampingnya dan mengakibatkan gerakan yang keras. Benturan molekul-molekul ini memindahkan energi kinetik, yang pada pandangan makroskopis dilihat sebagai perpindahan panas.

Pada benda solid, energi panas dipindahkan oleh elektron-elektron bebas dan getaran dalam struktur geometris dari molekul-molekul. Jumlah elektron bebas yang bergerak dalam struktur molekul inilah yang menentukan baik tidaknya suatu bahan sebagai konduktor panas sekaligus konduktor listrik. Bahan-bahan tembaga, aluminium dan perak adalah beberapa contoh penghantar panas yang baik. Sebaliknya bahan-bahan dari plastik, kaca adalah penghantar panas yang buruk yang digunakan sebagai penyekat atau penghambat panas (*thermal insulator*).

Konduktivitas termal suatu bahan bervariasi dengan temperatur, namun dalam praktek, harga konduktivitas dapat diambil tetap pada suatu temperatur rata-rata. Gambar 2-16 menampilkan grafik konduktivitas termal beberapa benda solid terhadap temperatur.



Gambar 2-16 Konduktivitas termal beberapa bahan solid.

Kadang besaran konduktansi termal, C juga dipakai untuk menyatakan kapasitas penghantaran panas suatu sistem, yaitu konduktivitas termal bahan dibagi ketebalan bahan, dirumuskan $C = k/\Delta x$.

Suatu sistem termal dapat dianalogikan dengan sistem listrik dimana selama terdapat beda temperatur akan terjadi aliran panas dari temperatur yang lebih tinggi ke temperatur yang lebih rendah. Dalam sistem termal tentunya juga ada istilah tahanan termal, R yang dalam modus konduksi didefinisikan sebagai kebalikan dari besaran konduktansi, $R = 1/C$ selengkapnya $R = \Delta x/k$. Jadi bahan yang konduktivitasnya rendah tentunya memiliki tahanan panas yang besar. Persamaan fluks laju panas konduksi akhirnya dapat disederhanakan menjadi

$$\frac{q}{A} = \frac{\Delta T}{R} \quad (2-25)$$

4. PERPINDAHAN PANAS KONVEKSI

Konveksi adalah mekanisme perpindahan panas yang terjadi dalam suatu fluida disertai dengan pergerakan fluida itu sendiri. Proses konveksi sebenarnya terdiri dari dua mekanisme, yaitu proses perpindahan energi secara random dari satu partikel fluida ke partikel fluida yang lain, ini tidak lain adalah modus konduksi, dan perpindahan energi oleh gerakan fluida secara makroskopis dari satu titik dalam ruang ke titik yang lain.

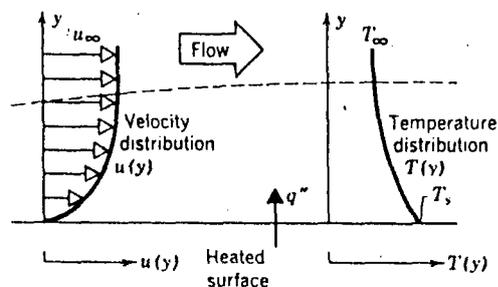
Pergerakan fluida ini disebabkan oleh perbedaan densitas yang bisa ditimbulkan oleh perbedaan temperatur massa fluida, proses ini disebut sebagai konveksi alamiah atau konveksi bebas. Salah satu contoh yang sederhana dari konveksi bebas ini adalah perpindahan panas antara dinding atau atap rumah dengan udara di sekelilingnya dalam kondisi udara tenang. Apabila pergerakan fluida sengaja dibuat

oleh suatu peralatan mekanis seperti fan atau pompa maka dinamakan konveksi paksa.

Berhubung konveksi panas melibatkan aliran fluida, maka proses konveksi dapat dijelaskan dengan prinsip-prinsip mekanika fluida.

4.1 Konsep *Boundary Layer*

Perpindahan panas konveksi dapat dijelaskan pada suatu kasus sederhana dimana fluida mengalir pada suatu permukaan bidang solid seperti ti diperlihatkan pada Gambar 2-17. Sebagai akibat dari interaksi antara aliran fluida dengan permukaan bidang maka terjadi variasi kecepatan fluida dari nol pada permukaan sampai harga tertentu pada suatu jarak dari permukaan.



Gambar 2-17 *Boundary layer* pada konveksi.

Variasi kecepatan pada arah normal aliran fluida tidak lain adalah pengaruh kekentalan fluida (*viscous effect*) pada batas permukaan. Gradien kecepatan ini terjadi pada suatu daerah berupa lapisan yang sangat tipis dimana efek kekentalan adalah signifikan, daerah ini dinamakan lapisan batas kecepatan (*velocity boundary layer*). Daerah di luar lapisan batas ini, efek kekentalan dapat diabaikan dan fluida mengalir pada kecepatan bebas (*free stream*). Limit lapisan batas ini tidak dapat ditentukan secara tepat, biasanya diambil

pada suatu jarak dari permukaan dimana kecepatan fluida sama dengan kecepatan aliran bebas.

Seperti yang dilukiskan pada Gambar 2-17, permukaan berada pada temperatur yang lebih tinggi daripada fluida, sehingga terjadi aliran konveksi antara permukaan dan fluida. Perbedaan temperatur antara permukaan dan fluida ini menyebabkan adanya variasi temperatur pada suatu daerah permukaan hingga T_{∞} pada jarak tertentu dari permukaan. Daerah ini disebut lapisan batas termal (*thermal boundary layer*). Temperatur fluida mencapai temperatur uniform pada daerah diluar lapisan batas termal.

Seperti telah diketahui bahwa konveksi panas terjadi oleh gerakan acak molekul dan gerakan curah fluida. Gerakan molekul acak ini terjadi pada daerah dekat permukaan dimana kecepatan fluida adalah sangat rendah yaitu pada $y = 0$. Sedangkan gerakan curah fluida terjadi bersamaan dengan berkembangnya lapisan batas pada arah aliran fluida.

4.2 Hukum Newton tentang Pendinginan

Laju panas konveksi dapat dinyatakan dengan Hukum Newton tentang pendinginan

$$\frac{q}{A} = h(T_s - T_f) \quad (2-26)$$

Konstanta kesebandingan h disebut sebagai koefisien perpindahan panas konveksi atau koefisien film atau konduktansi termal seperti pada konduksi.

Koefisien perpindahan panas konveksi ini tergantung pada kondisi *boundary*

layer, merupakan fungsi yang kompleks dari komposisi fluida, geometri permukaan solid dan sifat gerakan fluida yang melalui permukaan.

4.3 Parameter-Parameter Tak Berdimensi

Dalam perancangan suatu sistem energi surya terutama kolektor surya plat datar, perpindahan panas konveksi memegang peranan yang penting pada pemindahan panas dari plat pengumpul ke fluida kerja, aliran panas dari plat pengumpul ke penutup kolektor dan kehilangan panas dari penutup kolektor. Untuk menghitung laju aliran panas konveksi, tentunya juga harus menghitung koefisien perpindahan panas konveksinya.

Perhitungan koefisien perpindahan panas konveksi didasarkan pada parameter-parameter tak berdimensi⁸, antara lain seperti bilangan Nusselt, Nu, bilangan Raleigh, Ra, dan bilangan Reynolds. Hubungan antara bilangan Nusselt dan koefisien konveksi adalah

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (2-27)$$

dimana L adalah panjang karakteristik dan k adalah konduktivitas panas fluida. Dalam konveksi bebas, bilangan Nusselt merupakan fungsi dari bilangan Raleigh yang memuat besaran-besaran berikut: konstanta gravitasi g, koefisien volumetris ekspansi β' , selisih temperatur ΔT , viskositas kinematis ν , dan difusitas termal α .

$$Ra = \frac{g \beta' \Delta T L^3}{\nu \alpha} \quad (2-28)$$

Bilangan Reynolds untuk kolektor surya plat datar pemanas udara dinyatakan persamaan berikut⁹

$$Re = \frac{2 \dot{m}}{W\mu} \quad (2-29)$$

dengan \dot{m} adalah laju aliran massa fluida, W lebar kolektor, dan μ adalah viskositas fluida. Parameter-parameter tak berdimensi ini ditentukan oleh suatu kondisi yang dinyatakan dengan korelasi-korelasi yang didapat dari data-data percobaan.

4.4 Konveksi Bebas Antara Dua Plat Paralel

Konveksi bebas antara dua plat paralel telah diteliti melalui percobaan yang dilakukan oleh Hollands et.al. (1976). Berdasarkan hasil percobaan diperoleh korelasi antara bilangan Nusselt dan bilangan Raleigh pada dua plat sejajar dengan batas kemiringan β antara 0 sampai 75°, dinyatakan dalam persamaan (2-30)

$$Nu = 1 + 1,44 \left[1 - \frac{1708 (\sin 1,8\beta)^{1,6}}{Ra \cos \beta} \right] \left[1 - \frac{1708}{Ra \cos \beta} \right]^+ + \left[\left(\frac{Ra \cos \beta}{5830} \right)^{1/3} - 1 \right]^+$$

Tanda eksponen + artinya bahwa hanya harga positif dalam tanda kurung yang dipakai, bila hasilnya negatif maka harganya dianggap nol. Dalam kasus ini, panjang karakteristik adalah jarak antara kedua plat.

⁹

Ibid hal 173

4.5 Konveksi Pada Aliran Dalam

Pada kolektor surya pemanas udara, udara dilewatkan sekaligus dipanaskan dalam suatu saluran (*passage*) yang berada di antara dua plat datar. Dalam kasus ini, udara menerima panas konveksi paksa. Untuk menghitung koefisien perpindahan panas konveksi ini, Kays dan Crawford (1980) menetapkan korelasi bilangan Nusselt dengan bilangan Reynolds untuk aliran turbulen berkembang penuh dengan satu sisi dipanaskan dan sisi yang lain terinsulasi.

$$Nu = 0,0158 Re^{0,8} \quad (2-31)$$

dimana karakteristik panjang adalah dua kali spasi plat.

4.6 Konveksi Bebas Oleh Angin

Dalam perancangan kolektor surya juga diperhitungkan kehilangan panas dari permukaan penutup kolektor ke udara luar. Konveksi bebas dialami oleh permukaan penutup kolektor berdasarkan kenyataan bahwa kecepatan udara adalah sangat rendah.

Hubungan antara bilangan Nusselt dan bilangan Raleigh untuk konveksi bebas pada plat mendatar oleh udara luar diberikan oleh Lloyd dan Moran (1974)

$$Nu = 0,76 Ra^{1/4} \quad \text{untuk } 10^4 < Ra < 10^7 \quad (2-32)$$

$$Nu = 0,15 Ra^{1/3} \quad \text{untuk } 10^7 < Ra < 3 \times 10^{10} \quad (2-33)$$

Panjang karakteristik yang digunakan adalah empat kali luas dibagi keliling plat.

5. PERPINDAHAN PANAS RADIASI

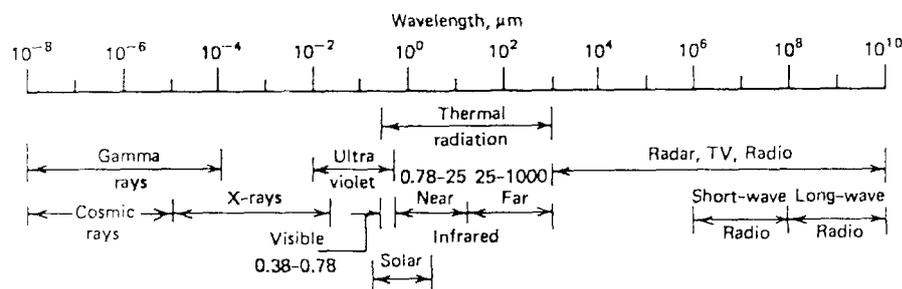
Radiasi termal adalah suatu bentuk energi elektromagnetik yang dipancarkan oleh permukaan suatu benda pada temperatur tertentu. Tidak seperti halnya pada perpindahan panas konduksi dan konveksi yang memerlukan medium untuk pemindahan energinya, pada radiasi termal energi dapat dipindahkan dari satu tempat ke tempat yang lain tanpa kehadiran suatu bentuk materi apapun sebagai medium pemindahannya. Pada kenyataannya, perpindahan energi radiasi paling efisien terjadi dalam vakum. Contoh yang paling jelas radiasi termal adalah energi matahari.

5.1 Konsep Dasar Radiasi

Radiasi termal dapat dipancarkan oleh segala benda yang ada disekitar kita. Mekanisme pancaran atau emisi ini yaitu energi yang dilepaskan oleh gerakan bolak-balik atau transisi sejumlah atom-atom, molekul-molekul, elektron-elektron pembentuk materi. Gerakan-gerakan ini didukung oleh energi dalam yang dibangkitkan pada suatu keadaan yang tereksitasi secara termal.

Dilihat dari sifat pemindahannya, radiasi dapat dipandang sebagai perambatan dari kumpulan partikel-partikel yang disebut sebagai foton-foton atau quanta. Di samping itu, radiasi dapat dipandang sebagai perambatan gelombang elektromagnetik. Oleh karena itu, radiasi yang dipancarkan dapat didistribusikan berdasarkan daerah panjang gelombang. Gambar 2-18

menunjukkan spektrum radiasi elektromagnetik yang dibagi dalam kumpulan panjang gelombang .



Gambar 2-18 Spektrum radiasi elektromagnetik.

Dalam energi surya, daerah panjang gelombang yang penting yaitu dari spektrum ultraungu hingga inframerah dekat, dari 0,3 sampai kira-kira 25 μm. Radiasi surya di luar atmosfer memuat energi paling banyak pada daerah 0,3 sampai 3 μm. Sampai di bumi, energi radiasi matahari paling banyak berada pada daerah 0,29 sampai 2,5 μm.

Radiasi merambat dalam vakum dengan kecepatan cahaya, diformulasikan oleh

$$C = \frac{C_0}{n} = \lambda \nu \quad (2-34)$$

dimana C_0 adalah kecepatan cahaya dalam ruang hampa dan n adalah indeks bias medium, λ adalah panjang gelombang dan ν frekuensi.

5.2 Absorptivitas, Reflektivitas, dan Transmittivitas

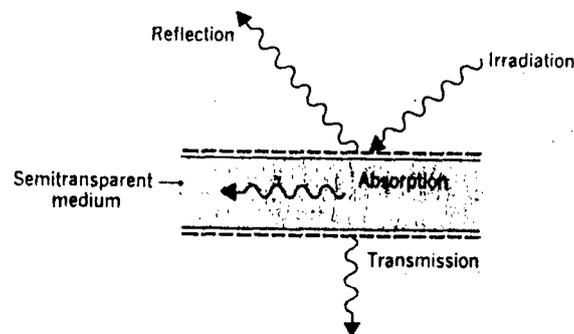
Bila seberkas radiasi menimpa suatu permukaan, sebagian radiasi akan dipantulkan dan sebagian lagi akan menembus medium tersebut. Selama

menembus medium, radiasi akan terus mengalami pengurangan. Apabila tidak ada radiasi yang diteruskan maka berarti radiasi yang menembus medium diserap seluruhnya oleh medium tersebut. Maka medium ini dikatakan buram atau medium yang tidak tembus cahaya. Sebaliknya jika tidak ada pengurangan radiasi dalam medium, maka seluruh radiasi diteruskan oleh medium, dikatakan sebagai medium transparan. Suatu sifat di antara kedua medium tadi adalah medium semitransparan di mana radiasi yang jatuh pada medium itu akan dipantulkan, diserap dan diteruskan. Fraksi radiasi yang dipantulkan disebut reflektivitas, ρ , fraksi radiasi yang diserap adalah absorptivitas, α , dan fraksi radiasi yang diteruskan adalah transmittivitas, τ . Hukum kekekalan energi untuk benda semitransparan dinyatakan

$$\rho + \alpha + \tau = 1 \quad (2-35)$$

Penampilan skematik dari suatu medium semitransparan diperlihatkan pada Gambar 2-18. Untuk suatu permukaan buram, dinyatakan

$$\rho + \alpha = 1 \quad (2-36)$$



Gambar 2-19 Sifat penerimaan radiasi oleh medium semitransparan.

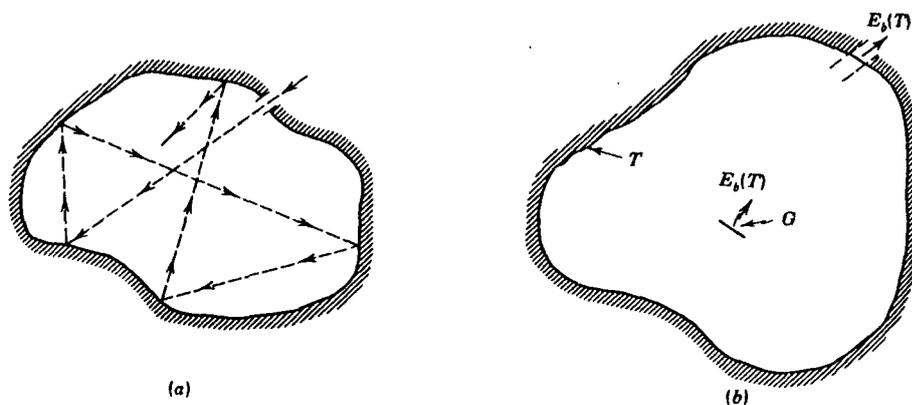
Suatu permukaan buram yang tidak memantulkan radiasi sama sekali disebut sebagai *blackbody* atau benda hitam. Suatu benda hitam dikatakan

sebagai penyerap sempurna, oleh karena itu benda hitam adalah suatu konsep ideal suatu permukaan. Persamaan energi untuk suatu benda hitam

$$\alpha = 1 \quad (2-37)$$

5.3 Konsep *Blackbody*

Blackbody adalah suatu permukaan ideal yang dipakai sebagai standar perbandingan untuk menjelaskan karakteristik radiasi dan sifat permukaan nyata. Walaupun benda hitam sesungguhnya tidak ada, beberapa material mempunyai sifat mendekati benda hitam. Suatu contoh yang mendekati perilaku benda hitam adalah sebuah lubang kecil pada suatu batasan dinding tertutup yang berada pada temperatur uniform seperti diperlihatkan pada Gambar 2-20a. Apabila seberkas sinar dari energi radiasi memasuki lubang maka sinar akan mengalami pantulan berulang-ulang disertai penyerapan radiasi pada setiap pantulan. Hanya sejumlah kecil radiasi yang dapat lolos dari lubang sehingga bidang lubang ini nampak seperti penyerap sempurna. Oleh karena itu radiasi yang keluar dari lubang ini seakan-akan seperti datang dari sebuah benda hitam.



Gambar 2-20 Konsep Blackbody.

Selain sebagai penyerap sempurna, suatu benda hitam juga dikatakan sebagai pemancar sempurna. Hal ini dapat ditunjukkan oleh Hukum Kirchoff yang diilustrasikan pada Gambar 2-20b, dimana sebuah benda kecil yang dapat dianggap sebagai benda hitam diletakkan dalam batasan dinding tertutup yang sudah dipanaskan sampai temperatur uniform. Pada saat keseimbangan termal tercapai, yaitu pada temperatur T maka energi yang dipancarkan oleh permukaan benda ini pada temperatur T , $E_b(T)$ akan sama dengan energi yang diserap, $G = E_b(T)$.

5.4 Hukum Stefan-Boltzmann

Daya pancar suatu benda hitam tergantung pada temperaturnya. Melalui percobaan, Josef Stefan pada tahun 1879 merumuskan bahwa daya pancar benda hitam sebanding dengan pangkat empat temperatur mutlaknya. Ludwig Boltzmann menggunakan prinsip termodinamika klasik dan secara analitis mendapatkan fakta yang sama. Daya emisi suatu benda hitam yang merupakan fungsi dari temperatur ini dikenal sebagai Hukum Stefan-Boltzmann

$$E_b = \sigma T^4 \quad (2-38)$$

dimana σ adalah konstanta Planck sebesar $5,6697 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$.

Persamaan di atas juga dapat dihasilkan dengan integrasi Hukum Planck berdasarkan penjumlahan semua panjang gelombang.

5.5 Emisivitas, Benda Real

Energi yang dipancarkan oleh suatu permukaan benda real adalah lebih rendah daripada energi yang dipancarkan oleh permukaan benda hitam. Sebagai suatu nilai pembandingan terdapat istilah emisivitas yaitu rasio energi yang dipancarkan pada temperatur yang sama antara benda real dan benda hitam.

$$\varepsilon(T) = \frac{E(T)}{E_b(T)} \quad (2-39)$$

Emisivitas suatu permukaan benda mempunyai batas $0 \leq \varepsilon \leq 1$ (untuk *blackbody*, $\varepsilon = 1$), sehingga daya pancar untuk permukaan benda real,

$$E = \varepsilon \sigma T^4 \quad (2-40)$$

5.6 Pertukaran Radiasi Antara Permukaan-Permukaan Kelabu

Energi yang dipancarkan oleh suatu permukaan benda dapat didekati oleh sebuah permukaan benda kelabu (*gray surface*) dimana pada benda kelabu, properti radiasi adalah tidak tergantung pada panjang gelombang.

Dalam perhitungan pertukaran energi radiasi neto antara dua benda, juga dipertimbangkan geometri benda yang disebut sebagai suatu faktor bentuk (*view factor*). Beckman (1971) menetapkan perpindahan energi neto antara dua permukaan sebagai

$$Q_1 = -Q_2 = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1 A_1} + \frac{1}{A_1 F_{12}} + \frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (2-41)$$

Untuk radiasi antara dua plat paralel dengan luas masing-masing plat sama dan *view factor* $F_{12} = 1$ dinyatakan dengan persamaan¹⁰

¹⁰

Ibid hal 157

$$\frac{Q}{A} = \frac{\sigma(T_2^4 - T_1^4)}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1} \quad (2-42)$$

Suatu keadaan khusus di mana suatu permukaan kecil dikelilingi oleh permukaan yang besar dengan rasio A_1/A_2 mendekati nol, dan *view factor* $F_{12} = 1$, maka persamaan energi radiasi menjadi

$$Q = \varepsilon_1 A_1 \sigma (T_2^4 - T_1^4) \quad (2-43)$$

Persamaan ini digunakan dalam kasus plat datar yang meradiasi ke langit seperti dijumpai pada tutup kolektor yang memancar ke sekeliling.

5.7 Koefisien Perpindahan Panas Radiasi

Persamaan laju energi radiasi adalah fungsi pangkat empat dari temperaturnya, namun persamaan ini dapat disederhanakan ke dalam persamaan linier dengan menetapkan koefisien perpindahan panas radiasi h_r .

Jadi radiasi antara dua permukaan dapat dinyatakan

$$Q = h_r A_1 (T_2 - T_1) \quad (2-44)$$

Maka koefisien perpindahan panas radiasi dirumuskan sebagai

$$h_r = \frac{\sigma(T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)}{\frac{1-\varepsilon_1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{F_{12}} + \frac{(1-\varepsilon_2)A_1}{\varepsilon_2 A_2}} \quad (2-45)$$

Apabila T_1 dan T_2 cukup dekat maka pembilang persamaan (2-45) dapat dinyatakan sebagai $4 \sigma \bar{T}^3$ dimana \bar{T} adalah temperatur rata-rata¹¹

$$4 \sigma \bar{T}^3 = \sigma(T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1) \quad (2-46)$$

¹¹ Ibid hal 159

6. MEKANIKA FLUIDA

Pada sebuah sistem perakayasaan energi matahari seperti pada kolektor surya plat datar terdapat proses mekanika fluida dimana medium (fluida kerja) seperti air atau udara mengalir melalui kolektor atau melalui pipa-pipa, ducting pendistribusi untuk selanjutnya dipakai atau ditampung sesuai dengan keperluan.

Untuk membuat fluida mampu mengalir dalam kolektor tentu dibutuhkan daya penggerak. Pada umumnya daya penggerak ini dibangkitkan oleh peralatan mekanis seperti pompa atau fan yang digerakkan oleh motor listrik.

Pada bagian ini dipaparkan sekilas konsep-konsep dasar fluida dalam hubungannya dengan perencanaan kolektor surya plat datar pemanas udara.

6.1 Tinjauan Fluida

Fluida mempunyai ciri khas yang membedakan dengan substansi lain yaitu fluida dapat mengalami deformasi secara terus menerus apabila dipengaruhi tegangan geser. Fluida dapat berbentuk gas atau cair.

Dalam mempelajari fluida, dikenal konsep *continuum* yang merupakan dasar daripada mekanika fluida klasik. Sebagai suatu kontinum, fluida yang tersusun dari molekul-molekul yang bergerak konstan dapat dipandang secara makro. Oleh karena itu, properti-properti fluida seperti densitas, temperatur dan lainnya dapat dianggap mempunyai harga tertentu pada tiap posisi dalam ruang. Sifat-sifat fluida ini lalu dinyatakan sebagai fungsi kontinu dari ruang dan waktu.

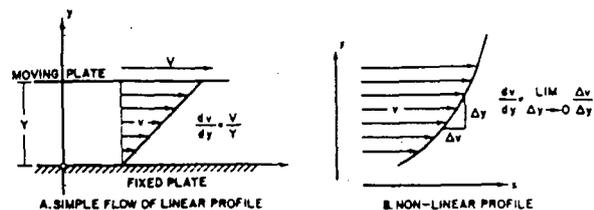
Apabila sifat fluida pada suatu posisi tertentu konstan terhadap waktu maka aliran fluida disebut sebagai *steady flow*.

6.2 Viskositas Fluida

Suatu elemen fluida yang mengalami tegangan geser akan berdeformasi dan besarnya tegangan geser ini berbanding lurus dengan laju deformasi, dv/dy . Fluida yang demikian ini disebut sebagai fluida Newtonian. Kesetaraan ini dinyatakan oleh Hukum Newton tentang kekentalan

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy} \quad (2-47)$$

di mana μ adalah faktor kesebandingan yang disebut sebagai viskositas atau kekentalan fluida. Gambar 2-21 menunjukkan pengaruh kekentalan pada aliran fluida. Viskositas menyatakan tahanan suatu fluida terhadap tegangan geser.



Gambar 2-21 Pergerakan fluida yang dipengaruhi oleh tegangan geser.

Viskositas dapat dinyatakan juga dalam istilah viskositas kinematis, ν yaitu rasio viskositas absolut terhadap densitas fluida

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2-48)$$

6.3 Klasifikasi Gerakan Fluida

6.3.1 Aliran *Viscous* dan *Inviscid*. Sifat aliran fluida dapat dibedakan berdasarkan pengaruh kekentalannya. Bila dalam aliran, efek viskos tidak begitu berpengaruh, maka aliran fluida dapat dianggap sebagai *inviscid flow*. Sebaliknya bila efek kekentalan tidak bisa diabaikan maka alirannya disebut *viscous flow*.

Pada aliran *viscous*, fluida mengalir dengan variasi kecepatan pada sumbu y mulai dari nol pada bidang sentuh fluida dengan permukaan sampai harga kecepatan fluida masuk. Profil kecepatan ini terjadi sepanjang arah aliran (sumbu x). Apabila ditarik kurva sepanjang titik-titik kecepatan fluida masuk hingga titik tertentu maka didapat dua daerah, yaitu daerah di bawah garis di mana aliran fluida dipengaruhi viskositas sehingga pada daerah ini terjadi gradiasi kecepatan fluida daerah ini dinamakan *boundary layer*, sedangkan daerah di atas garis batas adalah suatu daerah bebas pengaruh viskositas di mana kecepatan fluida uniform.

Sebenarnya semua fluida mempunyai sifat kekentalan, namun dalam kasus-kasus *external flow* di mana aliran melalui permukaan luar bodi dapat dianggap sebagai aliran *inviscid*.

6.3.2 Aliran Laminar dan Turbulen. Aliran laminar adalah aliran yang berlapis-lapis, tidak ada pencampuran partikel-partikel fluida yang berdekatan. Sebaliknya, pada aliran turbulen terjadi pencampuran partikel-partikel fluida secara random sepanjang aliran.

Bila setetes zat pewarna diinjeksikan ke dalam aliran laminar maka bentuk aliran akan berupa suatu garis. Apabila hal yang sama dilakukan pada aliran turbulen maka akan terjadi penyebaran sepanjang medan aliran

Untuk menentukan sifat laminar atau turbulen pada suatu aliran terdapat suatu parameter tak berdimensi yaitu bilangan Reynold yang dirumuskan

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2-49)$$

di mana ρ adalah densitas fluida, V kecepatan rata-rata fluida, D diameter pipa dan μ adalah viskositas fluida. Aliran fluida digolongkan sebagai laminar jika $Re < 2300$ dan turbulen bila $Re > 2300$.

6.3.3 Aliran *Incompressible* dan *Compressible*. Klasifikasi aliran fluida juga dapat ditentukan berdasarkan densitas fluida. Suatu fluida dikategorikan sebagai aliran *incompressible* apabila densitas fluida tersebut konstan sepanjang aliran. Sebaliknya aliran *compressible* adalah aliran dimana terjadi variasi densitas fluida sepanjang aliran.

Aliran gas pada kecepatan rendah dapat digolongkan sebagai aliran *incompressible* seperti dijumpai pada atmosfer, pengaturan udara dan pemanasan udara. Untuk menentukan secara pasti sifat aliran ini dipakai acuan bilangan Mach. Apabila kecepatan aliran fluida kurang dari 0,3 M maka aliran dapat dianggap *incompressible*. Bila sudah mencapai 0,3 M atau lebih maka variasi densitas tidak bisa diabaikan.

6.4 Persamaan Kontinuitas

Dalam aliran fluida sepanjang saluran berlaku hukum kekekalan massa $\int \rho v dA = \text{konstan}$ di mana v adalah kecepatan fluida tegak lurus elemen penampang aliran dA dan ρ densitas fluida. Apabila baik densitas maupun kecepatan fluida adalah konstan sepanjang penampang melintang normal terhadap aliran maka laju aliran massa adalah konstan dinyatakan

$$\rho V A = \text{konstan}$$

Untuk aliran tak mampu mampat dalam suatu sistem aliran fluida maka persamaan kontinuitas dinyatakan

$$Q = A V = \text{konstan} \quad (2-50)$$

6.5 Persamaan Bernoulli

Persamaan dasar yang sering digunakan dalam menganalisis aliran fluida adalah persamaan Bernoulli yang melibatkan prinsip kekekalan energi sepanjang aliran fluida. Dengan menerapkan Hukum II Newton tentang gerak pada partikel fluida ideal diperoleh persamaan Bernoulli berikut

$$\frac{v^2}{2g_c} + \int \frac{dP}{\rho} + \frac{gz}{g_c} = \text{konstan} \quad (2-51)$$

di mana v adalah kecepatan lokal fluida m/s, g_c konstanta tak berdimensi dalam $1\text{kg}\cdot\text{m}/(\text{N}\cdot\text{s}^2)$, P tekanan dalam Pa, ρ densitas fluida (kg/m^3), g percepatan gravitasi (m/s^2) dan ketinggian z dalam meter.

Untuk fluida *incompressible* persamaan Bernoulli di atas disederhanakan menjadi

$$\frac{v^2}{2g_c} + \frac{P}{\rho} + \frac{gz}{g_c} = \text{konstan} \quad (2-52)$$

Pada kenyataannya aliran fluida dalam suatu sistem terdapat tahanan fluida yang diperhitungkan, sehingga persamaan Bernoulli dalam suatu saluran

$$\frac{\rho V_1^2}{2g_c} + P_1 + \gamma z_1 = \frac{\rho V_2^2}{2g_c} + P_2 + \gamma z_2 + \Delta p_t \quad (2-53)$$

di mana V menyatakan kecepatan rata-rata fluida pada saluran, γ berat jenis fluida dan Δp_t adalah kerugian tekanan total antara titik 1 dan titik 2 pada sistem saluran.

6.6 Tekanan dan Head

Secara umum tekanan fluida dinyatakan dalam besaran gaya persatuan luas yaitu dalam satuan Newton per meter persegi atau identik dengan Pascal. Namun dalam bidang dinamika fluida tekanan fluida dapat juga dinyatakan dalam besaran tinggi kolom fluida, selanjutnya disebut sebagai *total head*.

Fluida yang mengalir dalam suatu sistem saluran akan mengalami sejumlah kerugian tekanan sepanjang lintasan alir. Kerugian ini disebut sebagai *pressure loss* atau *head loss* yang besarnya ditentukan oleh panjang lintasan, kekasaran permukaan saluran, kecepatan aliran fluida dan sejumlah *fitting* yang dijumpai dalam sistem.