2. TEORI DASAR

2.1. Teori Perhitungan Beban Kalor

Perpindahan kalor melalui suatu bangunan dipengaruhi oleh beberapa factor yaitu : jenis bahan yang digunakan; faktor – faktor geometris (seperti ukuran, bentuk dan orientasinya); adanya sumber – sumber kalor dalam dan faktor – faktor iklim. Dalam merancang suatu sistem, masing – masing faktor ini perlu diperhitungkan.

Perhitungan beban pendinginan (perolehan kalor) berguna untuk menentukan kapasitas pendinginan yang diperlukan dalam berbagai peralatan pemanasan dan pengkondisian udara untuk mempertahankan kondisi nyaman di dalam suatu ruangan. Oleh karena itu dalam perhitungan beban pendinginan yang dipengaruhi oleh kondisi lingkungan tempat bangunan berada harus dihitung pada keadaan ekstrim yang biasa terjadi, dalam arti perhitungan dilakukan dalam kondisi beban puncak.

Dengan pertimbangan tersebut maka digunakan metode CLTD / CLF yang telah dikembangkan oleh ASHRAE.

Perolehan kalor pada suatu bangunan secara garis besar terbagi menjadi 2 sumber kalor :

- *Eksternal* yang terdiri dari atap, dinding, kaca, partisi, langit – langit dan lantai.
- *Internal* yang terdiri dari manusia, lampu, motor listrik, alat – alat rumah tangga, udara ventilasi dan infiltrasi.

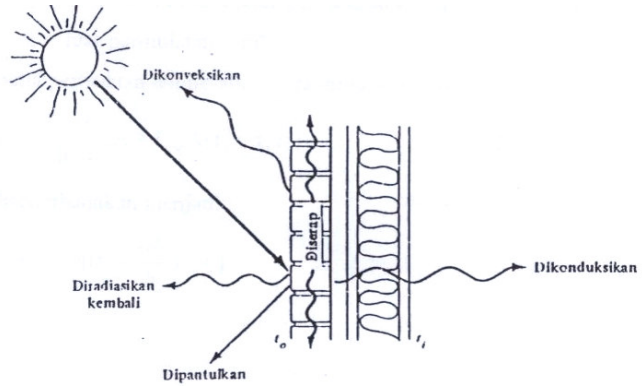
Kalor yang dihasilkan oleh sumber – sumber kalor di atas terdiri dari :

- Kalor sensibel
- Kalor laten

Kalor sensibel mengakibatkan terjadinya perubahan DB (*Dry – Bulb)* temperatur dan tidak mengubah kandungan uap air, sedangkan kalor laten dibutuhkan untuk menguapkan uap air yang terkandung dalam udara (terjadi perubahan kandungan uap air dan perubahan wujud).

2.1.1. Perolehan Kalor Melalui Dinding

Proses perolehan kalor untuk permukaan yang tidak tembus cahaya diilustrasikan seperti gambar di bawah ini :



Gambar 2.1 Beban panas matahari pada permukaan tak tembus cahaya
(Sumber : W.F. Stoeker Dan J.W. Jones. *Refrigerasi Dan Pengkondisian Udara*, 1974, Hal 74).

Sebagian dari energi matahari dipantulkan dan diserap oleh dinding. Energi yang diserap sebagian dikonveksikan dan sebagian diradiasikan kembali ke luar. Sisa energi yang diserap oleh dinding ditransmisikan ke dalam ruangan atau disimpan sementara.

Perolehan kalor yang disebabkan oleh panas matahari yang jatuh pada suatu permukaan ditentukan oleh sifat – sifat fisik permukaan tersebut yang dinyatakan dengan :

$$\tau + \rho + \alpha = 1 \qquad (2.1a)$$

Dimana :

τ = faktor transmisi

ρ = faktor penyerapan

α = faktor pemantulan

Faktor transmisi untuk dinding tidak tembus cahaya adalah nol. Sehingga persamaan 2.1a menjadi :

$$\rho + \alpha = 1 \qquad (2.1b)$$

Sehingga energi matahari yang melewati permukaan ialah :

$$q = \frac{U\alpha}{h_o} I_t A \qquad (2.2)$$

Dimana :

U = Koefisien perpindahan panas total ($W/m^2.{}^0C$)

h_o = Koefisien perpindahan panas luar ($W/m^2.{}^0C$)

I_t = Intensitas radiasi pada permukaan eksterior ($W/m^2.{}^0C$)

A = Luas permukaan (m^2)

Jika transmisi karena perbedaan temperature udara dimasukkan, maka :

$$q = \frac{U\alpha}{h_o} I_t A + UA(t_o - t_i) \qquad (2.3)$$

Persamaan 2.3 disederhanakan menjadi :

Jika $t_e = t_o + \alpha I_t / h_o$ (2.5)

Dimana :

t_e = Temperature ekivalen

maka $q = UA(t_e - t_i)$ (2.6)

temperatur ekivalen t_e disebut sol-air temperatur yaitu temperatur luar ruangan yang dinaikkan oleh suatu besaran sebagai akibat dari radiasi matahari. Untuk dinding yang tidak tembus cahaya efek penyimpangan panas oleh dinding harus diperhitungkan. Untuk mengkompensasi adanya efek penyimpanan panas oleh dinding maka perbedaan temperatur ekuivalen yang disebut *cooling load temperature differences* dikembangkan. Sehingga perolehan kalor dari dinding adalah :

$$q = U A (CLTD) \qquad (2.7)$$

Dimana :

CLTD = *Cooling load temperatur difference* (^{0}C)

A = Luasan perpindahan panas (m^2)

U = Koefisien perpindahan panas total ($W/m^2\ ^0C$)

Harga CLTD didapat dari lampiran 10. Harga ini akan dikoreksi dengan temperatur ruangan dan temperatur luar sehingga didapat harga $CLTD_{corr}$, yaitu :

$$CLTD_{corr} = (CLTD + LM) k + (25,5 - t_r) + (t_o - 29,4) \quad (2.8)$$

Dimana :

CLTD = *Cooling load temperatur difference* (^{0}C), dari lampiran 10

$CLTD_{corr}$ = Koreksi CLTD untuk dinding (^{0}C)

LM = Koreksi *Latitude Month* untuk dinding (^{0}C) , dari lampiran 11

k = Faktor koreksi untuk warna dinding, dari lampiran 10

t_r = Temperatur ruangan yang dikondisikan (^{0}C)

t_o = Temperatur luar (^{0}C)

sehingga persamaan 2.7 menjadi :

$$q = U\ A\ (CLTD_{corr}) \quad (2.9)$$

Rumus ini juga berlaku untuk perhitungan perolehan kalor dari atap.

2.1.2. Perolehan Kalor Melalui Kaca

Pada perhitungan perolehan kalor melalui kaca. Faktor transmisi tidaklah nol sehingga berlaku persamaan 2.1.

- Panas yang ditransmisikan

  Energi matahari yang melewati permukaan, q adalah :

$$q = A\ I_t\ (\tau + (U\alpha / h_o)) \quad (2.10)$$

Bentuk $I_t(\tau + U\alpha / h_o)$ untuk kaca bening satu lembar sering disebut *faktor perolehan kalor matahari* (*solar-heat gain factor*, SHGF). Untuk SHGF maksimum untuk dua buah lintang dalam hitungan bulan dan arah.

Koefisien peneduhan (*Shading coefficient*, SC) digunakan untuk menghitung harga SHGF dari kaca tipe lain atau untuk menghitung faktor peneduhan alat – alat peneduh bagian dalam.

Harga koefisien peneduhan untuk beberapa jenis kaca, baik dengan peneduhan dalam maupun tidak. Jadi besarnya energi matahari yang melewati jendela adalah:

$$q = (SHGF_{max}) (SC) A \qquad (2.11)$$

Ada satu faktor lagi yang harus dipertimbangkan, bahwa energi matahari yang masuk ke space yang dikondisikan tidak secara langsung menjadi beban pendinginan. Ada sebagian energi tersebut yang diserap dan setelah beberapa waktu baru dikonveksikan ke udara dalam space sehingga menjadi beban pendinginan.

Karena faktor tersebut maka digunakan cooling load faktor (CLF) dan harganya telah ditabelkan menurut arah dari letak jendela. Maka rumus untuk energi matahari yang ditransmisikan / diteruskan :

$$q = A\ SC\ SHGF\ CLF \qquad (2.12)$$

- Panas yang dikonduksikan

Sinar matahari yang diserap oleh kaca akan dikonduksikan sehingga menjadi beban pendinginan, rumus perhitungan beban ini :

$$q = U\ A\ (CLTD_{corr}) \qquad (2.13)$$

$CLTD_{corr}$ untuk rumus diatas adalah :

$$CLTD_{corr} = CLTD + (25{,}5 - t_r) + (t_o - 29{,}4) \qquad (2.14)$$

Dimana :

CLTD = *Cooling load temperatur difference* (^{0}C)

$CLTD_{corr}$ = Koreksi CLTD untuk kaca (^{0}C)

U = Koefisien perpindahan panas total (W/m^2 ^{0}C)

A = Luasan kaca (m^2)

q = Perolehan kalor melalui kaca (W)

tr = Temperatur ruangan yang dikondisikan (^{0}C)

to = Temperatur luar (^{0}C)

SC = *Shading Coeficient* (koefisien peneduhan)

SHGF = *Solar Heat Gain Faktor* (faktor perolehan kalor matahari,W/m^2)

CLF = *Cooling Load Faktor* (faktor beban pendinginan)

2.1.3. Perolehan Kalor Melalui Atap

Pada prinsipnya perolehan kalor melalui atap sama dengan perolehan kalor melalui dinding, maka besarnya kalor melalui atap dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut ini :

$$CLTD_{corr} = \{(CLTD + LM) k + (25,5 - t_r) + (t_o - 29,4)\} f \quad (2.15)$$

$$q = U A (CLTD_{corr}) \quad (2.16)$$

Dimana :

CLTD = *Cooling load temperatur difference* atap (^{0}C), dari lampiran 8

LM = Koreksi *Latitude Month* untuk atap (^{0}C), dari lampiran 11

k = Warna atap, dari lampiran 10

$CLTD_{corr}$ = Koreksi CLTD untuk atap (^{0}C)

U = Koefisien perpindahan panas total (W/m^2 ^{0}C)

A = Luasan atap (m^2)

q = Perolehan kalor melalui kaca (W)

tr = Temperatur ruangan yang dikondisikan (^{0}C)

to = Temperatur luar (^{0}C)

f = Bila tanpa saluran udara = 1, ada ventilasi = 0,75

2.1.4. Perolehan Kalor Melalui Partisi, Langit – langit dan Lantai

Perolehan kalor melalui partisi, langit – langit dan lantai pada dasarnya disebabkan adanya perbedaan temperatur antara 2 permukaan yaitu permukaan pada ruang yang dikondisikan dan permukaan pada daerah yang tidak dikondisikan, maka pembatas antara kedua ruangan tersebut disebut partisi (dinding, kayu, kaca dan lain – lain). Besarnya kalor yang melalui partisi, langit – langit dan lantai dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$q = U A \Delta t \quad (2.17)$$

Dimana :

U = Koefisien perpindahan panas total (W/m^2 ^{0}C)

A = Luasan langit – langit dan partisi (m^2)

Δt = Beda temperature antara ruang yang dikondisikan dengan yang tidak dikondisikan (^{0}C)

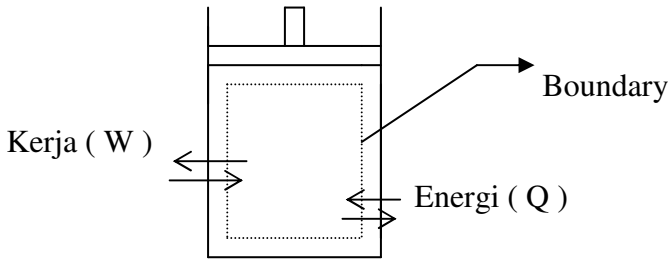
q = Perolehan kalor melalui partisi, langit – langit dan lantai (W)

2.2. HUKUM I TERMODINAMIKA

Hukum I termodinamika ini berbicara mengenai prinsip kekekalan energi, yang mengatakan bahwa energi tidak dapat diciptakan ataupun dimusnahkan, tetapi energi dapat berubah bentuk dengan jumlah yang tetap.

Sistem dalam ilmu termodinamika diartikan sebagai sebuah kumpulan materi atau bagian dalam suatu ruang yang terlindungi atau terlingkupi oleh permukaan yang tertutup dinding. Daerah yang berada di luar sistem disebut *surroundings* atau lingkungan. Sedangkan batas pemisah antara sistem dengan *surroundings* (lingkungan) disebut batas sistem (*boundary*).

2.2.1. Sistem Tertutup (*Control Massa*)



Gambar 2.2 Sistem Tertutup

(Sumber : Yunus A. *Cengel Thermodynamics An Engineering Apporoach*,1998, Hal 112).

Pada sistem ini tidak ada aliran massa, sehingga jumlah massa dalam sistem selalu tetap. Tetapi volume sistem dapat berubah – ubah.

Prinsip kekekalan energi adalah :

$$Q = W + \Delta E \qquad (2.18)$$

Dimana :

Q = Panas yang masuk ke sistem (Joule)

W = Kerja yang dilakukan sistem (Joule)

ΔE = Perubahan energi dalam sistem (Joule)

Q bernilai positif jika panas masuk ke dalam sistem, sebaliknya jika Q negatif panas keluar dari sistem. Sedangkan W bernilai jika kerja dilakukan oleh sistem, dan negatif jika kerja dilakukan pada system.

2.3. Perpindahan Panas

Perpindahan panas adalah suatu bentuk energi yang berpindah dari tempat tertentu pada suatu benda yang memiliki temperatur tinggi ke tempat lain yang memiliki temperatur yang lebih rendah. Perpindahan panas dapat dibedakan menjadi 3 yaitu : perpindahan panas secara konduksi, konveksi dan radiasi.

2.3.1. Konduksi

Pengertian dari konduksi yaitu perpindahan panas yang terjadi dari suatu bagian ke bagian lain dalam suatu benda tersebut ataupun dalam fluida diam yang mempunyai perbedaan temperatur pada beberapa bagiannya. Selain itu konduksi juga dapat terjadi antara dua benda atau lebih jika benda tersebut disatukan.

Jika pada suatu benda terdapat suatu perbedaan temperatur, maka dalam benda tersebut akan terjadi perpindahan energi dari bagian suhu yang tinggi ke bagian suhu yang lebih rendah. Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa laju perpindahan energi secara konduksi dapat dituliskan bahwa :

$$q'' = -k\frac{\Delta T}{\Delta x} \qquad (2.19)$$

Dimana :

q” = Flux panas (Watt / m^2)

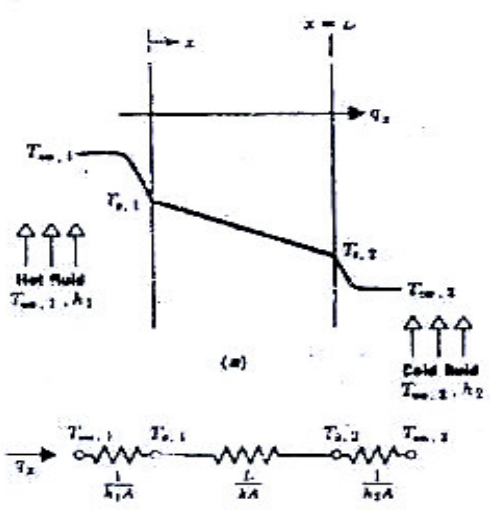
k = *Conduktivity* material (W/ m^0C)

ΔT = Perbedaan Temperatur (^0C)

Δx = Perbedaan jarak (m)

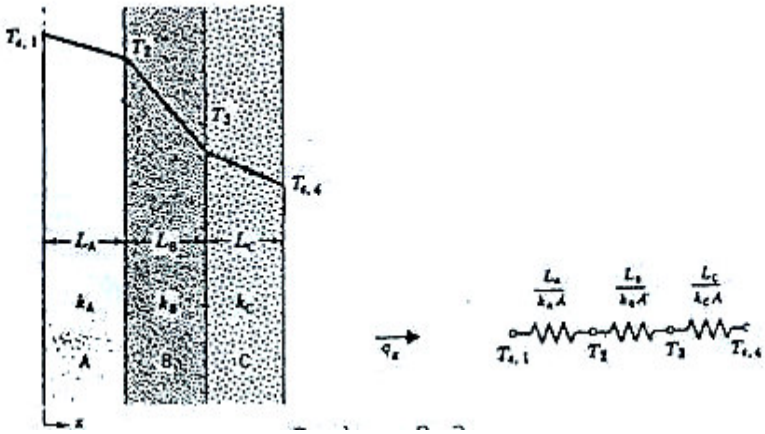
Tanda minus tersebut menunjukkan perpindahan panas yang terjadi itu menuju ke bagian yang bertemperatur lebih rendah. Perpindahan panas secara konduksi tersebut merupakan persamaan konduksi yang umum. Untuk lebih jelasnya pada proses konduksi yang terjadi secara umum ini dapat dilihat pada

distribusi temperatur yang ada pada material tersebut seperti pada gambar berikut ini.



Gambar 2.3 Perpindahan Panas Melalui Dinding

(Sumber : Frank P dan David P. De Witt. Incropera. *Fundamentals Of Heat Transfer*, 1981, Hal 67).



Gambar 2.4 Tahanan konduksi berbagai macam bahan yang disusun secara seri

(Sumber : Frank P dan David P.De Witt. Incropera. *Fundamentals Of Heat Transfer*, 1981, Hal 70)

2.3.2. Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi ini, dapat terjadi antara suatu permukaan suatu benda dengan fluida yang ada di sekeliling permukaan tersebut. persamaan dasar perpindahan panas secara konveksi dapat dinyatakan sebagai berikut :

Dimana :

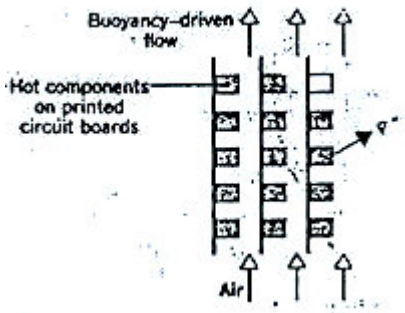
q” = Flux panas (Watt / m^2)

h = Koefisien konveksi ($W/m^2\,^0C$)

T_s = Temperatur permukaan plat (^0C)

T_∞ = Temperatur fluida / udara (^0C)

2.3.2.1. Konveksi Bebas atau Alamiah (*Natural*)



Gambar 2.5 Konveksi alami

(Sumber : Lindon C. *Thomas Heat Transfer*,1993, Hal 430)

Konveksi bebas dapat terjadi karena adanya perbedaan temperatur antara suatu benda dengan lingkungan sekitarnya dan terjadi akibat efek *buoyancy*.

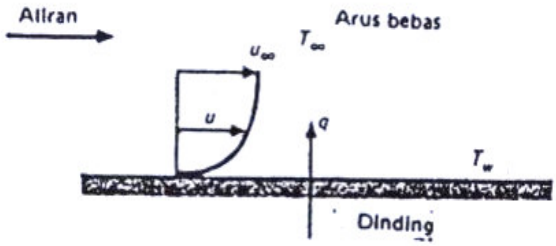
Efek *buoyancy* terjadi akibat perbedaan kepadatan fluida berkaitan dengan temperatur dimana fluida yang temperaturnya lebih tinggi mempunyai kepadatan yang lebih rendah sehingga lebih ringan jika dibandingkan benda yang mempunyai temperatur lebih rendah.

Perpindahan panas yang terjadi ini dipengaruhi oleh angka G*rasshoff* dan *Prandtl*. Perkalian dari angka *Grasshoff* dan *Prandtl* tersebut adalah angka *Rayleigh*

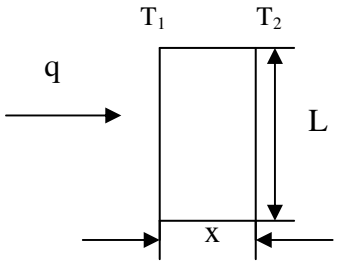
$$Ra_L = Gr_L * Pr \qquad (2.21)$$

$$Ra_L = \frac{g * \beta (Ts - Tsurr) * L^3}{\upsilon * \alpha} \qquad (2.22)$$

Setelah mendapatkan angka *Rayleigh* maka dapat ditemukan arah aliran (Laminer atau Turbulent), sehingga langkah selanjutnya adalah menghitung *Nusselt number* yang dinyatakan dengan :



Gambar 2.6 Perpindahan panas konveksi pada plat datar
(Sumber : Lindon C. *Thomas Heat Transfer*,1993, Hal 17)



Gambar 2.7 Perpindahan panas konveksi pada ruang vertikal
(Sumber : J.P.Holman. *Heat Transfer*,2001, Hal 360)

1. Untuk aliran Laminer (untuk $Ra_L < 10^9$) untuk permukaan vertikal dan horizontal.

$$\overline{Nu}_L = 0.68 + \frac{0.670 Ra_L^{1/4}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16}\right]^{4/9}} \qquad (2.23)$$

2. Untuk aliran Turbulent (untuk $Ra_L > 10^9$) untuk permukaan vertikal dan horizontal.

$$\overline{Nu}_L = \left\{ 0.825 + \frac{0.387 Ra_L^{1/6}}{\left[1 + (0.492/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2 \qquad (2.24)$$

Kemudian setelah mendapatkan *Nusselt number*, maka langkah selanjutnya yaitu menghitung *heat transfernya* (h). Dimana persamaannya adalah sebagai berikut :

$$h = \frac{\overline{Nu}_L \, k}{L} \qquad (2.25)$$

Dimana :

h = Koefisien konveksi ($W/m^{2\,0}C$)

Nu_L = *Nusselt number*

L = Tinggi permukaan bidang vertikal dan horizontal (m)

k = Konduktivitas, dari lampiran 10

2.3.3. Radiasi

Adalah perpindahan panas yang terjadi akibat pancaran gelombang elektromagnetik, maka besar perpindahan ditentukan oleh suhu permukaan masing – masing benda. Metode perpindahan panas radiasi tidak memerlukan kontak dan fluida yang mengalir diantar kedua benda.

Besar perpindahan panas tergantung dari suhu permukaan benda yang memancarkan gelombang elektromagnetik dan suhu permukaan benda yang menyerap gelombang elektromagnetik.

Rumus perpindahan panas secara radiasi dapat ditulis dalam bentuk rumus sebagai berikut :

$$q'' = e\,\sigma\,(T_s^{\,4} - T_{sur}^{\,4}) \qquad (2.26)$$

Dimana :

q” = Flux panas (Watt / m^2)

σ = Konstanta *Stefan – Boltzman* ($5.67 * 10^{-8}$ $W/m^2.{}^0C^4$)

T_s = Temperatur permukaan benda (^0C)

T_{surr} = Temperatur sekeliling benda (^0C)