

II. LANDASAN TEORI

1. PENGERTIAN UMUM

Proses perpindahan panas diantara dua fluida yang berbeda temperatur dan dibatasi oleh dinding padat tampak banyak digunakan dalam berbagai aplikasi teknik. Peralatan yang biasa digunakan untuk melakukan perpindahan panas ini disebut sebagai Heat Exchanger.

Dengan demikian secara lengkap definisi dari Heat Exchanger adalah suatu alat yang digunakan untuk proses pertukaran panas antara dua fluida yang dibatasi oleh dinding padat dimana dua fluida tersebut mempunyai temperatur yang berbeda. Penggunaan Heat Exchanger dapat ditemukan pada sistem ruang pemanas, Air Conditioning, sistem produksi tenaga dan sistem proses kimia.

1.1. Jenis Heat Exchanger

Heat Exchanger dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa macam klasifikasi antara lain :

- a. Klasifikasi Heat Exchanger menurut aliran fluida.

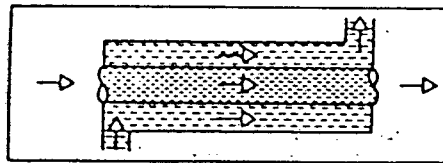
b. Klasifikasi Heat Exchanger menurut tipe konstruksinya.

a. Klasifikasi Heat Exchanger menurut aliran fluida

Menurut aliran fluidanya Heat Exchanger dibagi menjadi tiga jenis yaitu :

1. Paralel-flow

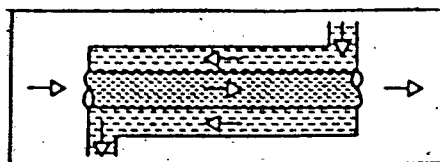
Yaitu aliran dimana fluida panas dan dingin masuk pada ujung yang sama, mengalir dengan arah yang sama dan berakhir pada ujung yang sama pula.



Gambar 2-1. Paralel flow.

2. Counterflow

Yaitu aliran dimana fluida panas dan dingin masuk pada ujung yang berlawanan arah dan berakhir pada ujung yang berlawanan arah pula.



Gambar 2-2. Counterflow.

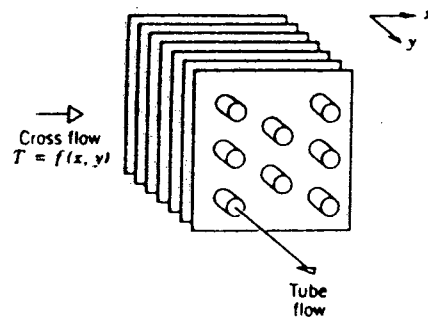
3. Cross-flow

Yaitu aliran dimana kedua fluida bergerak dalam arah melintang atau dengan sudut tegak lurus satu sama lain. Jenis ini dibagi lagi menjadi :

*) Unmixed

Yaitu aliran fluida di luar pipa tidak dapat bergerak secara bebas dalam arah normal terhadap aliran fluida di dalam pipa tetapi hanya dapat bergerak dalam arah melintang terhadap aliran fluida di dalam pipa.

Contoh penggunaan : pipa bersirip pada air conditioning.

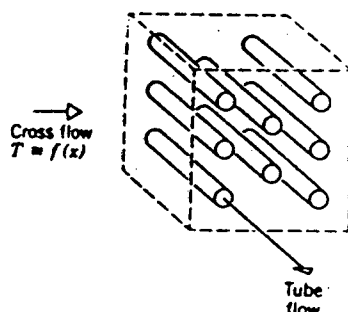


Gambar 2-3. Cross-flow unmixed.

*) Mixed

Yaitu aliran fluida di luar pipa dapat bergerak secara bebas sehingga pencampuran mungkin terjadi.

Contoh penggunaan : pipa tanpa sirip.



Gambar 2-4. Cross-flow mixed.

b. Klasifikasi Heat Exchanger menurut tipe konstruksinya

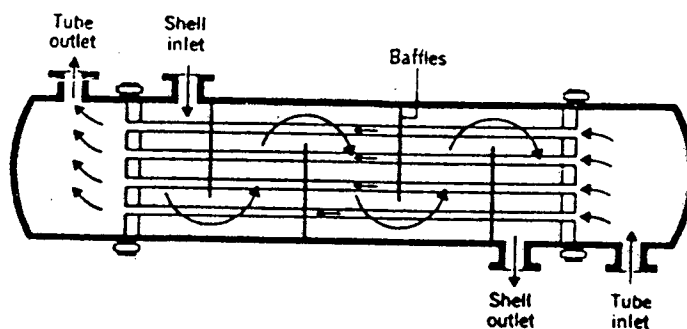
Menurut konstruksinya Heat Exchanger dibagi menjadi dua bagian besar yaitu :

1. Shell-and-tube Heat Exchanger

Klasifikasi menurut konstruksinya hanya berdasarkan pada jumlah laluan shell dan jumlah laluan tube sebagai berikut :

*) One shell pass and one tube pass

Yaitu Heat Exchanger tipe Shell-and-tube dengan satu laluan shell dan satu laluan tube.

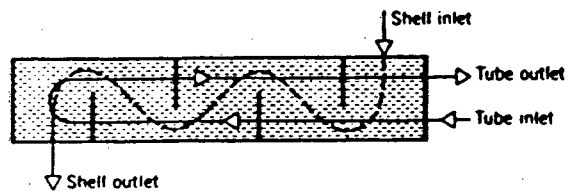


Gambar 2-5. Shell-and-tube Heat exchanger jenis one shell pass and one tube pass.

*) One shell pass and two tube passes

Yaitu Heat Exchanger tipe Shell-and-tube dengan

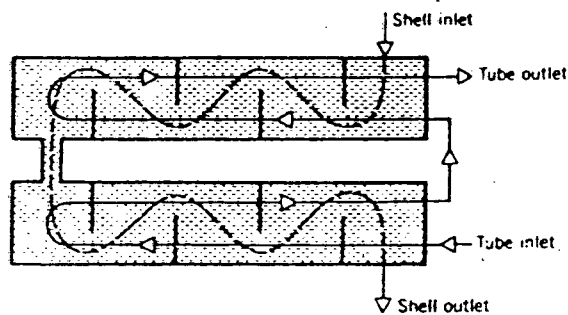
satu laluan shell dan dua laluan tube.



Gambar 2-6. Shell-and-tube Heat Exchanger jenis one shell pass and two tube passes.

*) Two shell passes and four tube passes

Yaitu Heat Exchanger tipe Shell-and-tube dengan dua laluan shell dan empat laluan tube.



Gambar 2-7. Shell-and-tube Heat Exchanger jenis two shell passes and four tube passes.

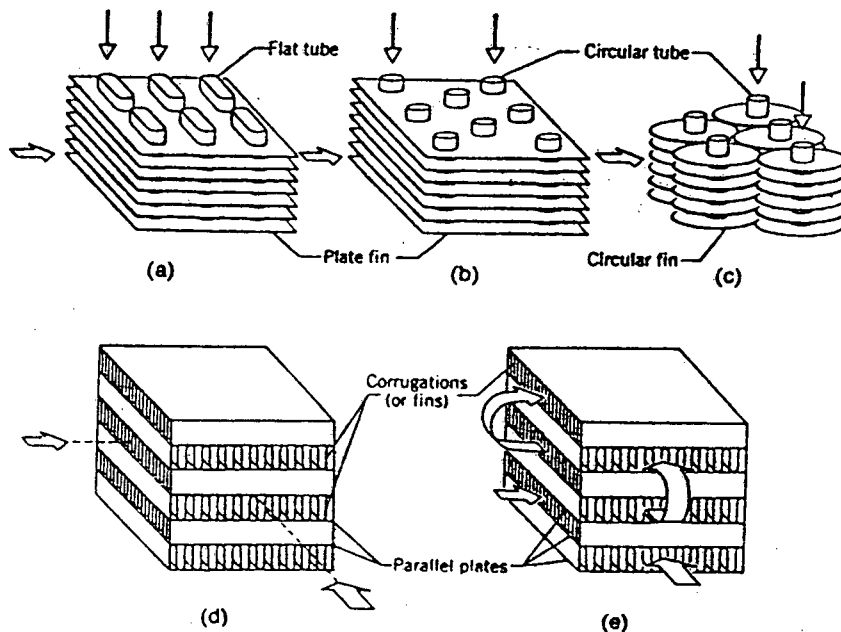
2. Compact Heat Exchanger

Yaitu Heat Exchanger yang mempunyai perpindahan panas luas permukaan per unit volume yang besar sampai dengan $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$.

Heat Exchanger jenis ini mempunyai susunan sirip-sirip dari tube yang tersusun rapat dimana tube-nya dapat berbentuk flat ataupun lingkaran sedangkan untuk fluidanya biasa dipakai gas.

Macam-macam Compact Heat Exchanger :

- *) Flat tube dengan plate fin.
- *) Circular tube dengan plate fin.
- *) Circular tube dengan circular fin.
- *) Single pass paralel plate.
- *) Multipass paralel plate.



Gambar 2-8. Compact Heat Exchanger cores. (a) Flat tube dengan plate fin. (b) Circular tube dengan plate fin. (c) Circular tube dengan circular fin. (d) Single-pass paralel plate. (e) Multipass paralel plate.

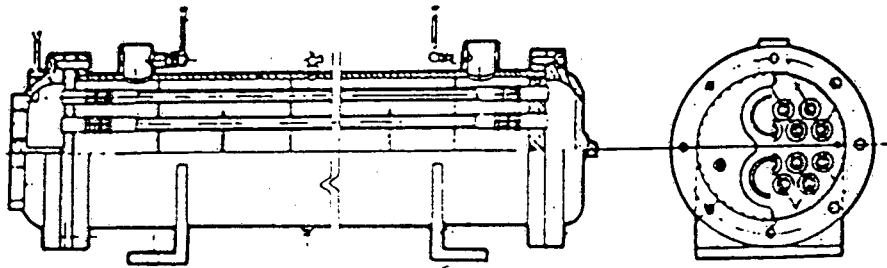
1.2. Oil Cooler = Water Type

Untuk mencegah berubahnya viskositas cairan hidrolik pada suatu sistem hidrolik maka perlu ditambahkan suatu Heat Exchanger pada sistem hidrolik tersebut. Heat Exchanger ini berfungsi untuk mendinginkan cairan hidrolik supaya kembali ketemperatur kerjanya sehingga tidak terjadi perubahan viskositas.

Heat Exchanger yang digunakan pada sistem hidro-

lik ini disebut *Oil Cooler - Water Type*, yaitu alat penukar kalor dengan menggunakan air sebagai pendingin.

Menurut konstruksinya *Oil Cooler - Water Type* ini merupakan jenis *Shell-and-tube* dengan satu laluan shell dan dua laluan tube.



Gambar 2-9. *Oil Cooler - Water Type*.

2. PERPINDAHAN KALOR KONDUKSI

Jika pada suatu benda terdapat gradien temperature, menurut pengalaman akan terjadi perpindahan energi dari bagian suhu tinggi ke bagian suhu rendah. Kita katakan bahwa energi berpindah secara konduksi dan bahwa laju perpindahan kalor itu berbanding dengan gradien suhu normal.

$$\frac{q}{A} \sim \frac{dT}{dx}$$

Jika dimasukkan konstanta proporsionalitas, maka :

$$q = -k.A. \frac{dT}{dx}$$

dimana ;

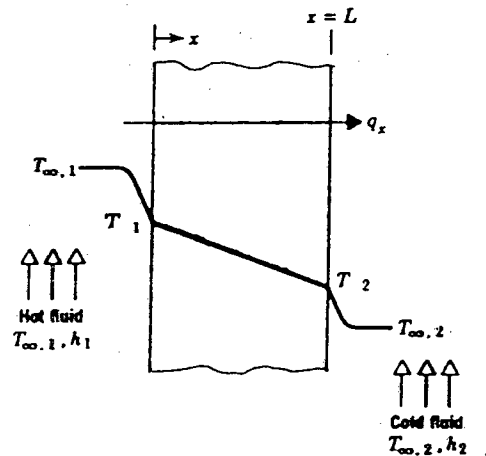
q = laju perpindahan kalor, Watt.

k = konduktivitas thermal, Watt/m K.

A = luas permukaan yang tegak lurus aliran panas, m^2 .

$\frac{dT}{dx}$ = gradien suhu ke arah perpindahan kalor,

K/m.



Gambar 2-10. Perpindahan panas konduksi pada dinding datar.

Perpindahan panas konduksi yang melalui dinding datar berdasarkan gambar 2-10 adalah :

$$q = \frac{k.A}{L} (T_1 - T_2)$$

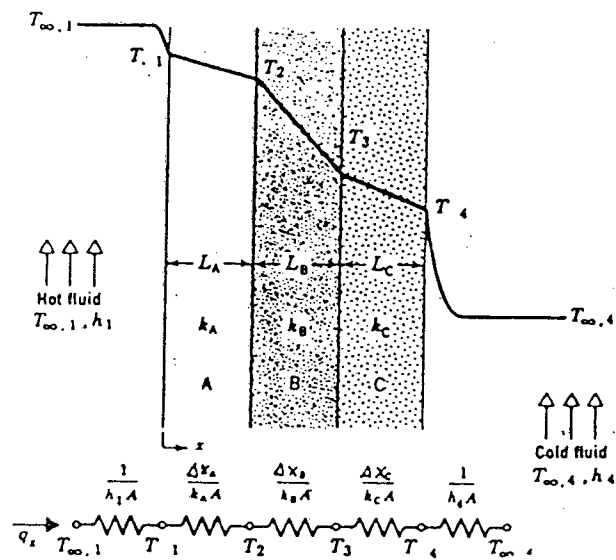
Jika dalam sistem itu terdapat lebih dari satu macam bahan, seperti dalam hal dinding lapis rangkap pada gambar 2-11, analisisnya akan menjadi sebagai berikut :

Jika gradien suhu pada ketiga bahan adalah seperti terlihat pada gambar 2-11, aliran kalor dapat dituliskan

sebagai :

$$\begin{aligned}
 q &= -k_A \cdot A \frac{T_2 - T_1}{\Delta x_A} \\
 &= -k_B \cdot A \frac{T_3 - T_2}{\Delta x_B} \\
 &= -k_C \cdot A \frac{T_4 - T_3}{\Delta x_C}
 \end{aligned}$$

Perlu diingat bahwa aliran kalor pada setiap bagian itu pasti sama.



Gambar 2-11. Perpindahan kalor satu dimensi melalui dinding komposit dan analogi listrik.

Jika ketiga persamaan ini dipecahkan serentak, maka aliran kalor itu dapat dituliskan sebagai :

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\Delta x_A}{k_A \cdot A} + \frac{\Delta x_B}{k_B \cdot A} + \frac{\Delta x_C}{k_C \cdot A}}$$

Sedangkan perpindahan panas melalui dinding silinder dengan jari-jari dalam (r_1), jari-jari luar (r_o) dan panjang (L), seperti terlihat dalam gambar 2-12. Dimana silinder ini mengalami beda suhu $\Delta T = T_1 - T_o$ dan dipertanyakan berapakah aliran kalor yang terjadi.

Untuk memperoleh jawaban dari pertanyaan di atas perlu diasumsikan bahwa aliran kalor berlangsung menurut arah radial, sehingga koordinat ruang yang diperlukan untuk menentukan sistem itu hanyalah jari-jari (r).

Hukum Fourier kita gunakan lagi dengan menyisipkan rumus yang tepat.

Luas bidang aliran kalor dalam sistem silinder ini ialah :

$$A_r = 2.\pi.r.L$$

Sehingga hukum Fourier menjadi :

$$q_r = -k.A_r \frac{dT}{dr}$$

atau,

$$q_r = -k.2.\pi.r.L \frac{dT}{dr}$$

Jika persamaan ini diintegrasikan dengan syarat batas sebagai berikut,

$$T = T_1 \text{ pada } r = r_1$$

$$T = T_o \text{ pada } r = r_o$$

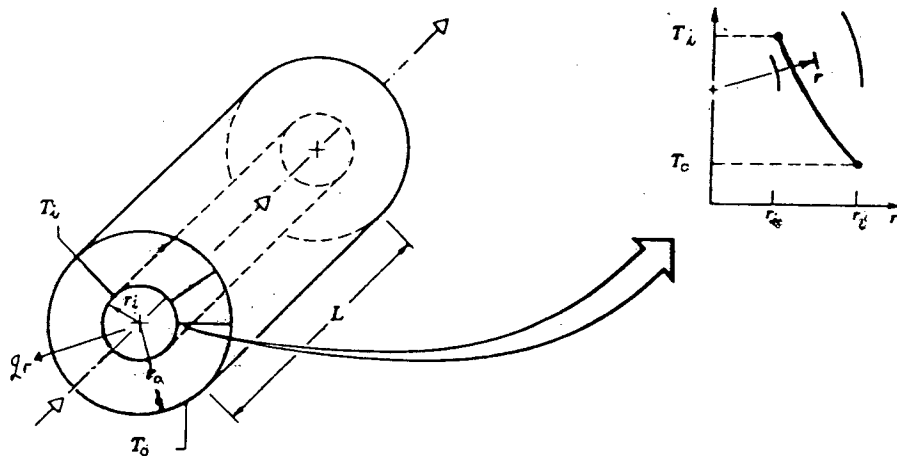
Maka :

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L}{\ln (r_o / r_i)} (T_i - T_o)$$

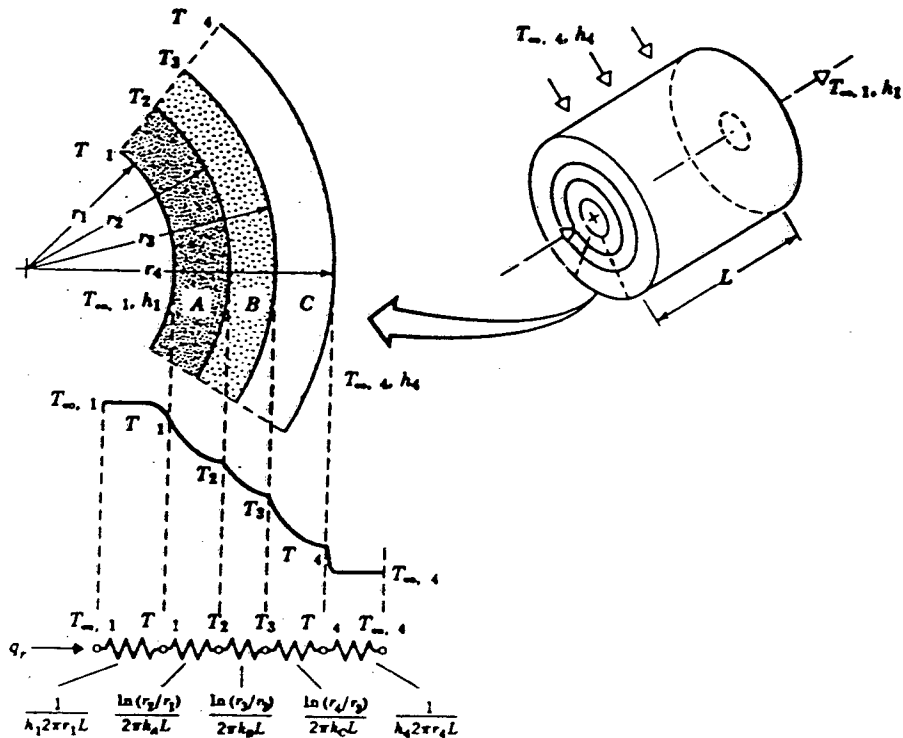
Dan tahanan thermal dalam hal ini adalah :

$$R = \frac{\ln (r_o / r_i)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L}$$

Konsep thermal dapat juga digunakan untuk dinding berlapis rangkap berbentuk silinder seperti halnya dengan dinding datar.



Gambar 2-12. Aliran kalor satu dimensi melalui silinder berlubang.



Gambar 2-13. Aliran kalor satu dimensi melalui penampang silinder dan analogi listrik.

Sedangkan untuk sistem tiga lapis seperti terlihat pada gambar 2-13, mendapatkan penyelesaian sebagai berikut :

$$q = \frac{2 \cdot \pi \cdot L \cdot (T_1 - T_4)}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{k_A} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{k_B} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{k_C}}$$

3. PERPINDAHAN KALOR KONVEKSI

Persamaan dasar laju perpindahan panas secara konveksi antara permukaan dan fluida di sekelilingnya dinyatakan dengan hukum Newton sebagai berikut :

$$q'' = h (T_s - T_\infty)$$

Dimana :

$$q'' = \text{convective heat flux, Watt/m}^2$$

T_s = temperatur permukaan, K

T_∞ = temperatur fluida, K

h = koefisien perpindahan panas konveksi,
Watt/m² K

Aliran dinding datar :

Untuk aliran pada plat atau dinding datar (external flow), maka Reynolds Number untuk sistim dinyatakan:

$$Re_{e,L} = \frac{\rho \cdot V_\infty \cdot L}{\mu}$$

Dimana :

ρ = massa jenis fluida, kg/m³

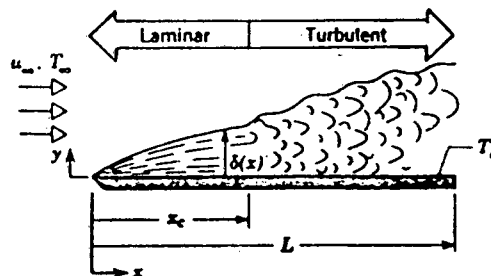
V_∞ = kecepatan fluida rata-rata, m/det

L = panjang plat dasar, m

μ = viskositas absolut fluida, N det/m²

Bentuk aliran ini terdiri dari :

- Aliran laminar, jika $Re_{e,L} < 5 \times 10^5$
- Aliran turbulen, jika $Re_{e,L} > 5 \times 10^5$
- Aliran kritis, jika $Re_{e,L} = 5 \times 10^5$



Gambar 2-14. Aliran pada plat datar.

Nusselt Number dirumuskan dengan persamaan :

- Untuk aliran laminar :

$$Nu_{L} = \frac{h.L}{k} = 0,664 \cdot Re_L^{1/2} \cdot Pr^{1/3}$$

Dengan batasan : $Pr \geq 0,6$

- Untuk aliran turbulen :

$$Nu_{L} = 0,0296 \cdot Re_L^{0,8} \cdot Pr^{1/3}$$

Dengan batasan : $0,6 < Pr < 60$

- Untuk aliran campuran :

$$Nu_{L} = (0,037 \cdot Re_L^{0,8} - 871) \cdot Pr^{1/3}$$

Dengan batasan : $0,6 < Pr < 60$

$$5 \times 10^5 < Re_L \leq 10^8$$

$$Re_{x,c} = 5 \times 10^5$$

Di mana :

h = koefisien konveksi rata-rata, $W/m^2 K$

Pr = Prandtl Number

Aliran menyeberangi silinder

Untuk aliran yang menyeberangi silinder (cylinder in cross flow), maka Reynolds Number untuk sistim ini dirumuskan :

$$Re_D = \frac{\rho \cdot V_{\infty} \cdot D}{\mu}$$

Dimana :

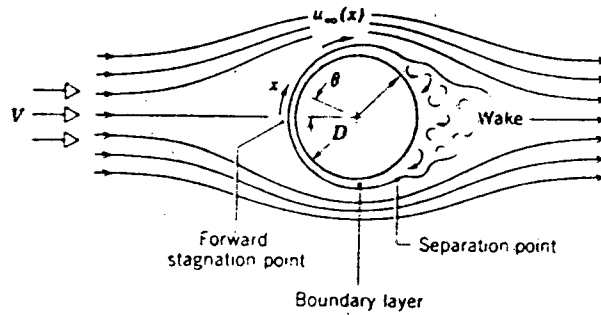
D = diameter silinder, m

ρ = massa jenis fluida, kg/m^3

V_{∞} = kecepatan fluida, m/det

μ = viscositas absolut fluida, $N \text{ det}/m^2$





Gambar 2-15. Aliran menyeberangi bagian luar silinder.

Nusselt Number untuk sistim ini dinyatakan dengan persamaan :

$$N_{u,D} = \frac{h \cdot D}{k} = 1,13 \cdot C_1 \cdot Re_D^m \cdot Pr^{1/3}$$

Dimana : C_1 dan m dapat dilihat pada tabel 7.1 (Ref. Incropera, F.P., Fundamentals of Heat Transfer).

Sedangkan untuk aliran menyeberangi kumpulan silinder maka V_{∞} yang digunakan adalah V_{max} sehingga Re_D nya disebut sebagai $Re_{D,max}$.

Nusselt Number untuk sistem ini dinyatakan dengan persamaan :

$$N_{u,D} = \frac{h \cdot D}{k} = 1,13 \cdot C_1 \cdot Re_{D,max}^m \cdot Pr^{1/3} \cdot C_2$$

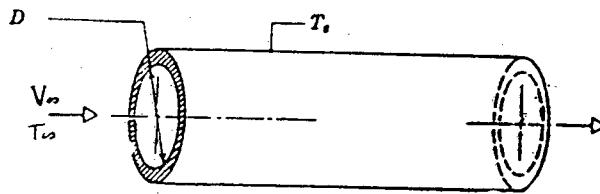
Dimana : C_1 dan m dapat dilihat pada tabel 7.5 (Ref. Incropera, F.P., Fundamentals of Heat Transfer) dan C_2 dapat dilihat pada tabel 7.6 (referensi Incropera, F.P., Fundamentals of Heat Transfer).

Aliran di dalam pipa :

$$Re_{e,D} = \frac{\rho \cdot V_{\infty} \cdot D}{\mu}$$

Bentuk aliran ini terdiri dari :

- Aliran kritis, jika $Re_{e,D} = 2.300$
- Aliran laminar, jika $Re_{e,D} < 2.300$
- Aliran turbulen, jika $Re_{e,D} > 2.300$



Gambar 2-16. Aliran dalam pipa.

Nusselt Number Untuk sistim ini dinyatakan dengan persamaan :

$$Nu_{e,D} = \frac{h \cdot D}{k} = 4,36 \quad (\text{head flux, } q'' = \text{konstant})$$

$$Nu_{e,D} = \frac{h \cdot D}{k} = 3,66 \quad (\text{temperatur surface, } T_s = \text{konstant})$$

- Untuk aliran turbulen :

$$Nu_{e,D} = 0,023 \cdot Re_{e,D}^{0,8} \cdot Pr^n$$

Di mana :

$$n = 0,4 \quad (T_s > T_{\infty})$$

$$n = 0,3 \quad (T_s < T_{\infty})$$

- Untuk aliran laminar :

$$Nu_{e,D} = 1,86 \left[\frac{Re_{e,D} \cdot Pr}{L/D} \right]^{1/3} \left[\frac{\mu}{\mu_s} \right]^{0,14}$$

Aliran melalui concentric tube annulus :

$$Re_{e,D} = \frac{\rho \cdot V_{\infty} \cdot D_h}{\mu}$$

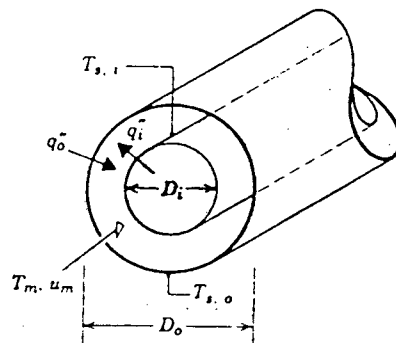
Dimana :

D_h = diameter silinder, m

ρ = massa jenis fluida, kg/m^3

V_{∞} = kecepatan fluida, m/dt

μ = viskositas absolut fluida, N dt/m²



Gambar 2-17. Aliran melalui annulus.

Bentuk aliran ini terdiri dari :

- Aliran kritis, jika $Re_{e,D} = 2.300$
- Aliran laminar, jika $Re_{e,D} < 2.300$
- Aliran turbulen, jika $Re_{e,D} > 2.300$

Nusselt Number untuk sistem ini dinyatakan dengan persamaan :

$$Nu_{e,D} = \frac{h \cdot D_h}{k}$$

- Untuk aliran turbulen :

$$Nu_{s,D} = 0,023 \cdot Re_{s,D}^{0,8} \cdot Pr^n$$

Di mana :

$$n = 0,4 \quad (T_s > T_\infty)$$

$$n = 0,3 \quad (T_s < T_\infty)$$

- Untuk aliran laminar :

$$Nu_{s,D} = 1,86 \left[\frac{Re_{s,D} \cdot Pr}{L/D} \right]^{1/3} \left[\frac{\mu}{\mu_s} \right]^{0,14}$$

Dalam hal Fully developed laminar flow dengan satu permukaan diisolasi dan permukaan yang lain dengan temperatur konstant harga Nusselt Number pada tabel 8.2 (referensi Incropera, F.P., Fundamentals of Heat Transfers).

4. KOEFFISIEN PERPINDAHAN KALOR MENYELURUH

Koeffisien perpindahan kalor menyeluruh untuk dinding datar dirumuskan :

$$U = \left[\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2} \right]^{-1}$$

Di mana :

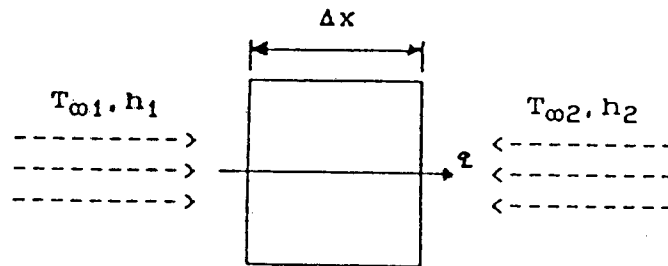
U = koeffisien perpindahan panas menyeluruh.

h_1 = koeffisien konveksi aliran fluida 1.

h_2 = koeffisien konveksi aliran fluida 2.

h = koeffisien konduksi bidang yang menbatasi fluida 1 dan fluida 2.

Δx = tebal bidang yang dilalui oleh kalor.



Gambar 2-18. Perpindahan kalor menyeluruh melalui dinding datar.

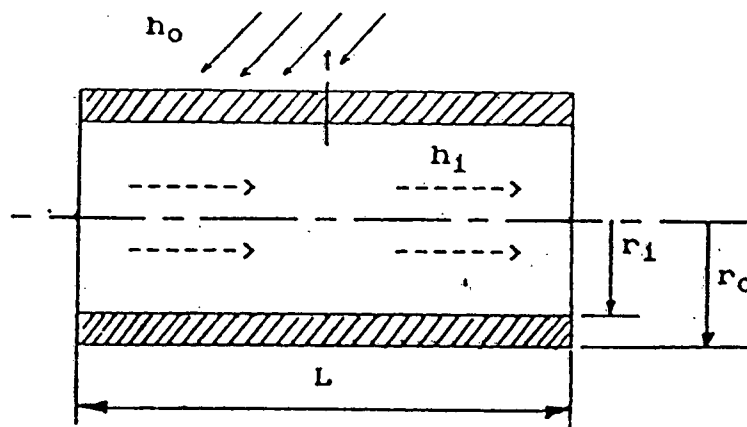
Sehingga perpindahan kalor dinyatakan :

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{\text{menyeluruh}}$$

Koeffisien perpindahan kalor menyeluruh untuk dinding silinder dinyatakan :

$$U_i = \left[\frac{1}{h_i} + \frac{A_i \cdot \ln(r_o/r_i)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} + \frac{A_i}{A_o} \frac{1}{h_o} \right]^{-1}$$

$$U_o = \left[\frac{A_o}{A_i} \frac{1}{h_i} + \frac{A_o \cdot \ln(r_o/r_i)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} + \frac{1}{h_o} \right]^{-1}$$



Gambar 2-19. Perpindahan kalor menyeluruh melalui silinder.

Sehingga perpindahan kalor dinyatakan :

$$q_r = U_1 \cdot A_1 \cdot \Delta T_{\text{menyeluruh}}$$

$$q_r = U_o \cdot A_o \cdot \Delta T_{\text{menyeluruh}}$$

Dimana :

$$A_1 = 2 \cdot \pi \cdot r_1 \cdot L$$

$$A_o = 2 \cdot \pi \cdot r_o \cdot L$$

5. FAKTOR PENGOTORAN

Setelah dipakai beberapa lama, permukaan perpindahan kalor penukar kalor mungkin dilapisi oleh berbagai endapan yang biasa terdapat dalam sistim aliran, atau permukaan ini mungkin mengalami korosi sebagai akibat interaksi antara fluida dan bahan konstruksi penukar kalor.

Dalam kedua hal di atas, lapisan ini memberikan tahanan tambahan terhadap aliran kalor dan hal ini menyebabkan menurunnya kemampuan kerja alat itu.

Pengaruh menyeluruh daripada hal tersebut di atas biasa dinyatakan dengan faktor pengotoran (fouling factor) atau tahanan pengotor, R_f , yang harus diperhitungkan bersama tahanan thermal lainnya, dalam menghitung koefisien perpindahan kalor menyeluruh.

Faktor pengotoran harus didapat dari percobaan yaitu dengan menentukan U untuk kondisi bersih dan kotor pada penukar kalor itu.

Oleh karena itu, faktor pengotoran didefinisikan seba-

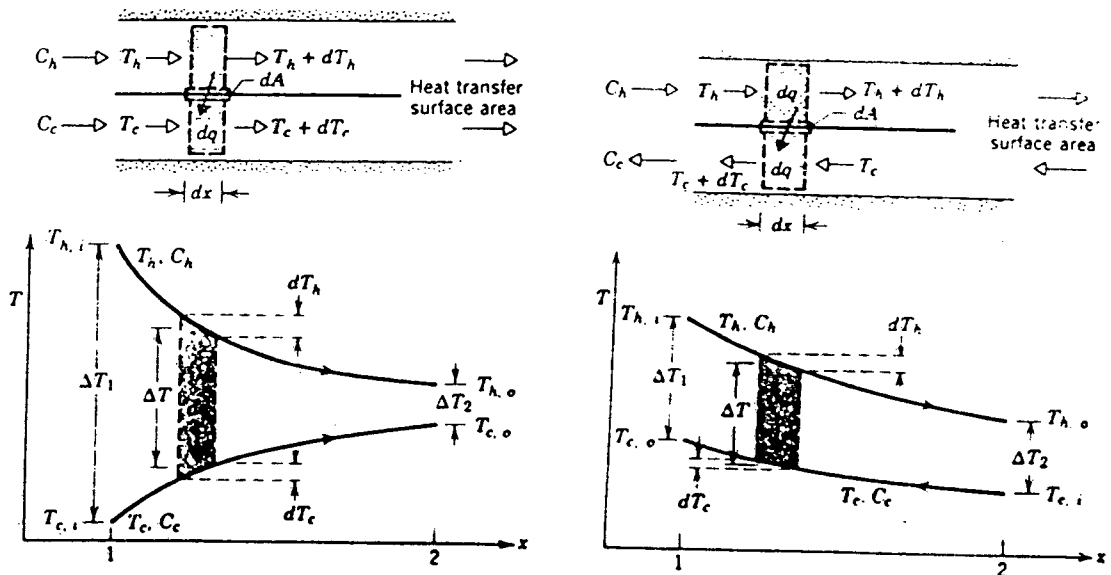
gai:

$$R_f = \frac{1}{U_{kotor}} - \frac{1}{U_{bersih}}$$

Nilai faktor pengotoran yang disarankan untuk berbagai fluida diberikan dalam tabel 11-1. Ref. Incropera, F.P., Fundamentals of Heat Transfer.

6. BEDA SUHU RATA-RATA LOG (LMTD)

Beda suhu rata-rata log atau log mean temperature deferential (LMTD) adalah beda suhu pada satu ujung penukar kalor dikurangi beda suhu pada ujung yang satu lagi dibagi dengan logaritma alamiah dari perbandingan kedua beda suhu tersebut.



Gambar 2-20. Profil suhu untuk aliran sejajar dan aliran berlawanan arah dalam penukar kalor pipa ganda.

Beda suhu rata-rata log dinyatakan dengan persamaan :

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}}$$

Di mana :

$$\left. \begin{array}{l} \Delta T_1 = T_{h1} - T_{c1} \\ \Delta T_2 = T_{h2} - T_{c2} \end{array} \right\} \text{ untuk aliran sejajar}$$

$$\left. \begin{array}{l} \Delta T_1 = T_{h1} - T_{c2} \\ \Delta T_2 = T_{h2} - T_{c1} \end{array} \right\} \text{ untuk aliran berlawanan arah}$$

Sehingga aliran kalor untuk sistim ini dinyatakan :

$$q = U_1 \cdot A_1 \cdot \Delta T_{lm}$$

$$q = U_o \cdot A_o \cdot \Delta T_{lm}$$

Sedangkan untuk sistim penukar kalor yang bukan jenis pipa ganda, perpindahan kalor dihitung dengan menerapkan faktor koreksi terhadap LMTD untuk susunan pipa ganda aliran berlawanan arah dengan suhu fluida panas dan suhu fluida dingin yang sama.

Bentuk persamaan perpindahan kalor menjadi :

$$q = U \cdot A \cdot F \cdot \Delta T_{lm}$$

Nilai faktor koreksi F dapat diperoleh dari grafik yang tergantung dari jenis alat penukar kalornya.