MODUL KE – 5

ALAT PENUKAR KALOR (2 SKS)

Pokok Bahasan

ANALISA ALIRAN DAN JENIS FLUIDA

PADA APK

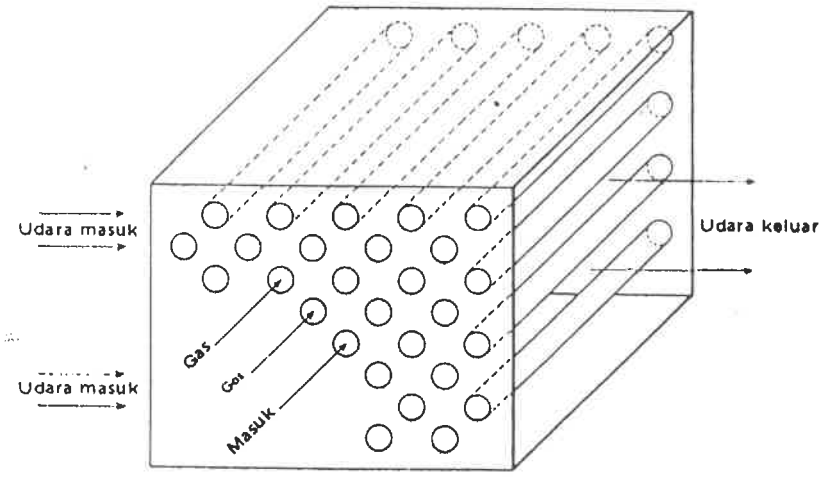
5.1. ANALISA ALIRAN FLUIDA

Sebagaimana telah diketahui pada Modul sebelumnya menyangkut analisa maupun beberapa bentuk aliran Fluida pada suatu APK (H-E).

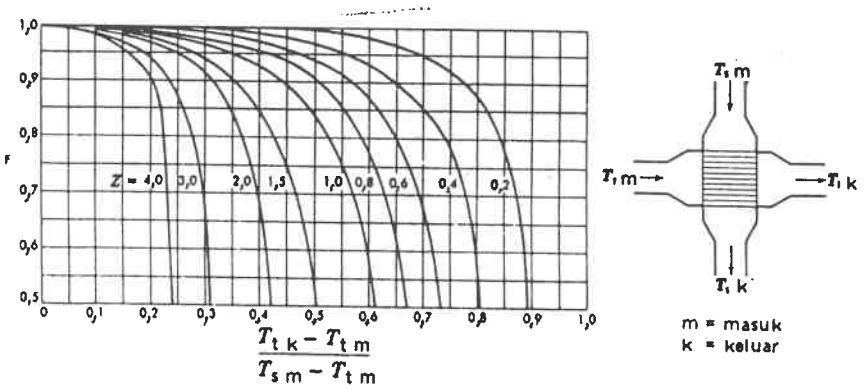
Untuk Penukar Panas yang lebih rumit seperti susunan cangkang dan pipa dengan beberapa lintas pipa atau lintas cangkang dan dalam hal penukar panas aliran lintang yang mempunyai aliran yang bercampur dan yang tak bercampur, guna memperoleh beda suhu rata-rata yang sebenarnya untuk salah satu susunan ini, LMTD yang dihitung untuk aliran lawan harus dikalikan dengan faktor koreksi yang sesuai, yakni :

$$T_{\text{rata-rata nyata}} = \text{LMTD} \cdot F$$

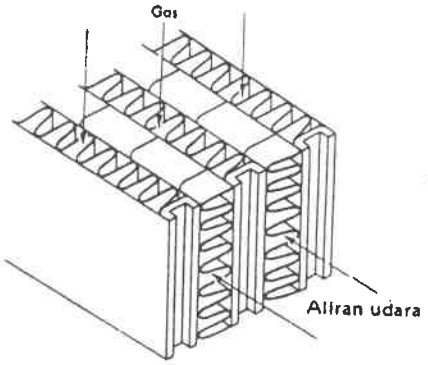
Perhatikan gambar APK aliran lintang dan gambar grafik guna memperoleh harga faktor koreksi (F) berikut :



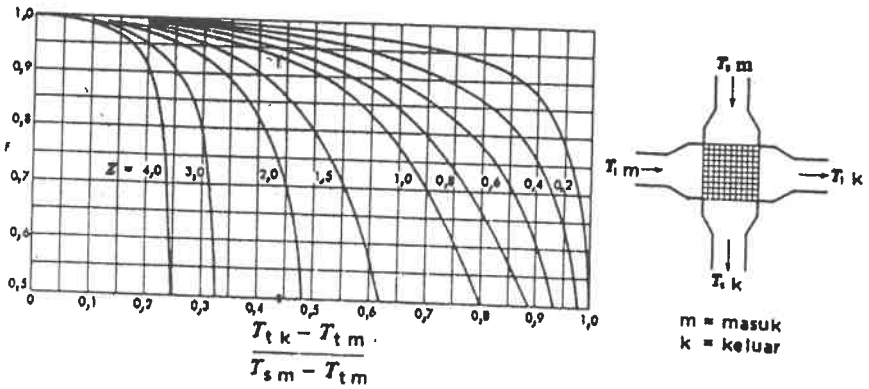
Gambar 5.1 Pemanas udara aliran-lintang yang melukiskan aliran-lintang dengan satu fluidanya bercampur dan fluida lainnya takbercampur.



Gambar 5.2 Faktor koreksi terhadap LMTD aliran-lawan untuk penukar panas aliran-lintang, fluida pada sisi cangkang bercampur, fluida lainnya takbercampur, satu lintas pipa (Dicuplik dari "Mean Temperature Difference in Design", oleh R.A. Bowman, A.C. Mueller, dan W.M. Nagel, yang diterbitkan dalam *Trans. ASME,* Tahun ke-62, 1940, dengan ijin dari penerbitnya, The American Society of Mechanical Engineers).



Gambar 5.3 Penukar panas tipe lelat datar yang melukiskan aliran-lintang dengan kedua fluidanya tak bercampur.



Gambar 5.4 Faktor koreksi terhadap LMTD aliran-lawan untuk penukar panas aliran-lintang, kedua fluida takbercampur, satu lintas pipa. (Dicuplik dari "Mean Temperature Difference in Design", oleh R.A. Bowman, A.C. Mueller, dan W.M. Nagel, yang diterbitkan dalam *Trans. ASME*, Tahun ke-62, 1940, dengan ijin dari penerbitnya, The American Society of Mechanical Engineers).

Selanjutnya harga yang ditunjukkan pada absis adalah perbandingan beda suhu tanpa dimensi, yakni :

$$P = (T\ tk - T\ tm) / (T\ sm - T\ tm)$$

Dimana indeks t menunjukkan fluida pipa dan indeks s menunjukkan fluida cangkang,

Perbandingan P memberi petunjuk tentang keefektifan pemanasan atau pendinginan, dan dapat berharga dari nol dalam hal suhu salah satu fluidanya konstan, sampai satu bila suhu masuk fluida yang lebih panas sama dengan suhu keluar fluida yang lebih dingin.

Perbandingan hasil kali aliran masa dan kapasitas panas dari kedua fluida Z sebesar :

$$Z = (mt\ .\ Cps) / (ms\ .\ Cps) = (Tsm - Tsk) / (Ttk - Ttm)$$

Dalam menerapkan faktor koreksi tidak menjadi soal apakah fluida yang lebih panas mengalir melalui cangkang atau pipa. Jika suhu salah satu fluida tetap konstan, arah aliran juga tidak menjadi soal, karena F sama dengan 1 dan LMTD dapat dipergunakan secara langsung. (frank kreith 560).

Contoh 5.1 :

Tentukan luas permukaan perp. panas yang diperlukan bagi sebuah APK yang dibangun dari pipa yang bergaris tengah-luar 1

inch guna mendinginkan 55.000 lb/h larutan etil alkohol 95 % (Cp = 0,91 Btu/lb F) dari 150 menjadi 103 F, dengan menggunakan 50.000 lb/h air yang tersedia pada 50 F. Asumsikan bahwa koef. Perp. panas keseluruhan yang didasarkan pada luas luar pipa adalah 100 Btu/h-ft2 F dan laksanakanlah perhitungan tersebut untuk masing-masing susunan sebagai berikut :

- pipa dan cangkang aliran-searah.
- Pipa dan cangkang aliran-lawan.
- Penukar panas arus-membalik dengan dua lintas cangkang dan 72 lintas pipa, alkohol mengalir melalui cangkang dan air mengalir melalui pipa-pipa.
- Aliran lintang, dengan satu aliran pipa dan satu lintas cangkang; fluida sisi cangkang bercampur.

Jawab :

Suhu-keluar air bagi keempat susunan tersebut dapat diperoleh dari keseimbangan energi keseluruhan, dengan asumsi bahwa kerugian panas ke atmosfir dapat diabaikan. Keseimbangan energi dapat dituliskan sebagaimana berikut :

$$mh \cdot Cph\ (Th\ in - Th\ out) = mc \cdot Cpc\ (Tc\ out - Tc\ in)$$

dan memasukkan data dalam pers. diatas, yakni :

$$(55.000)\ (0,91)\ (150 - 103) = (50.000)\ (1,0)\ (Tc\ k - 50)$$

dari pers. diatas kita memperoleh suhu keluar air sebesar 97 F. maka laju aliran panas dari alkohol ke air adalah ;

$$q = mh \,.\, Cp\,h\,(Th\,m - Th\,k)$$
$$= (55.000)\,(0{,}91)\,(150 - 103) = 2.350.000 \text{ Btu / h}$$

A. dari pers. sebelumnya, LMTD untuk aliran searah adalah :

$$LMTD = \frac{\Delta Ta - \Delta Tb}{\ln(\Delta Ta / \Delta Tb)} = \frac{100 - 6}{\ln(100 / 6)} = 33{,}4\ F$$

dari pers. sebelumnya bahwa,
luas permukaan perp. panas adalah :

$$A = (q) / (U)\ (LMTD) = (2.350.000)\ /\ (100)\ (33{,}4)$$
$$= 703{,}4 \text{ ft}^2$$

Panjang penukar panas untuk pipa yang bergaris tengah-luar 1 in kiranya terlalu besar, sehingga tidak dapat dipraktekkan.

B. bagi susunan aliran lawan, beda suhu rata-rata yang sesuai adalah,

150 - 97 = 53 F, karena mc . Cpc = mh . Cph

maka Luas yang diperlukan adalah :

$$A = (q) / (U)\ (LMTD) = (2.350.000) / (100)\ (5,3)$$
$$= 444\ ft^2$$

yang mana, 40 % lebih kecil dari pada Luas yang diperlukan untuk aliran searah.

C. Untuk susunan arus membalik, kita menentukan beda suhu rata-rata yang sesuai dengan menerapkan faktor koreksi yang didapat dari gambar diagram 11.3 pada beda suhu rata-rata untuk aliran Lawan.

$$P = (Tc\ k - Tc\ m) / (Th\ m - Tc\ m)$$
$$= (97 - 50) / (150 - 50) = 0,47$$

dan perbandingan kapasitas panas perjam, adalah :

$$Z = (mc\ Cpc) / (mh\ Cph) = 1$$

Dari gambar diagram 11.3 tersebut diperoleh, F = 0,97.
Sehingga luas perp. panas adalah :

$$A = (444) / (0,97) = 460\ sq\ ft.$$

Panjang penukar panas untuk 72 pipa sejajar yang bergaris tengah luar 1 in, dapat diperoleh melalui pers. berikut, yakni :

$$L = (A / 72) / (\pi \cdot D)$$
$$= (6,4) / (\pi \cdot 1/12) \approx 24,4 \text{ ft}$$

Panjang ini bukannya tidak wajar, akan tetapi jika dikehendaki untuk memperpendek penukar panasnya, maka kiranya dapat dipakai lebih banyak pipa.

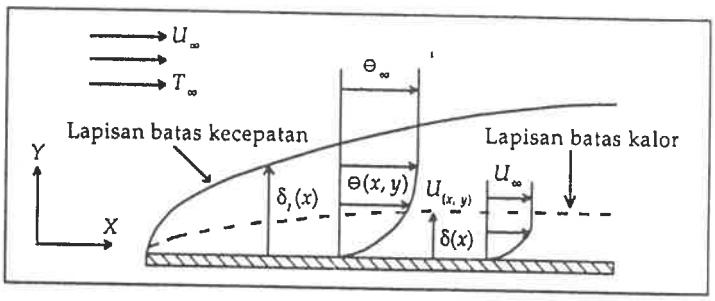
D. untuk susunan aliran Lintang (lihat gambar 11.3), maka faktor koreksi yang didapat dari gambar diagram 11.4 adalah, F = 0,88. Jadi Luas permukaan yang diperlukan adalah 504 ft^2, yang mana kurang lebih 10 persen lebih besar dari pada yang untuk penukar panas arus membalik.

5.2. ANALISA JENIS JENIS FLUIDA

5. 2.1. LOGAM CAIR DALAM ALIRAN LAMINAR

Angka Prandtl untuk logam cair sangat rendah yakni berkisar 0,01. Oleh karena itu lapisan batas kalornya jauh lebih tebal pada lapisan batas kecepatan ($\delta t >> \delta$). Hal tersebut dapat kita lihat pada gambar berikut :

Gambar 5.5
Lapisan batas kalor dan kecepatan untuk perpindahan kalor logam cair di atas plat rata (19)



Secara analisis penentuan harga koef. Perp. panas untuk kasus ini serupa dengan bagian LAPISAN BATAS KALOR yakni dengan menggunakan hasil persamaan energi integral lapisan batas, yakni :

$$\delta t = \sqrt{\frac{8 \propto x}{U\infty}}$$

Koefisien perpindahan kalor dapat dinyatakan dengan :

$$hx = \frac{-k \ (\partial T \ / \ \partial y)_w}{Tw - T} = \frac{3\,K}{2\,\partial t} = \frac{3\sqrt{2}}{8}\sqrt{\frac{U\infty}{\propto_x}}$$

Hubungan ini dapat dibuat dalam bentuk tak berdimensi sebagai berikut :

$$Nux = (h_x \cdot x) / k = 0{,}530\,(Re_x \cdot Pr)^{1/2} = 0{,}530\ Pe^{1/2}$$

Dimana : Pe = Re . Pr disebut bil. Peclet.

Dengan menggunakan persamaan berikut untuk tebal lapisan batas hydrodinamik, akan diperoleh :

$$\delta / x = (4{,}64) / Re_x^{1/2}$$

maka kita dapat menghitung, $\delta / \delta t$ yakni :

$$\frac{\partial}{\partial t} = \frac{4{,}64\sqrt{Pr}}{\sqrt{8}} = 1{,}64\sqrt{Pr}$$

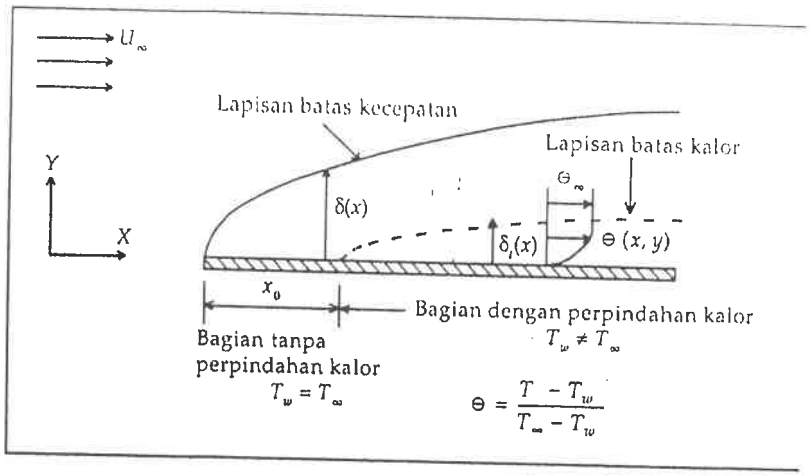
karena untuk logam cair Pr $\cong$ 0,164

yang menunjukan bahwa untuk logam cair $\delta << \delta t$

5. 2. 2. FLUIDA UMUM DALAM ALIRAN LAMINAR

Berbeda dengan logam cair; fluida yang umum seperti udara (Pr. $\cong$ 0,7). Atau air yang memiliki angka Pr > 1. Oleh karena itu lapisan batas kecepatannya, lebih tebal dari pada lapisan batas kalor. Hal tersebut dapat dilihat pada gambar berikut :

Gambar 5.6
Lapisan batas kalor dan kecepatan untuk fluida umum (19)



Penentuan harga koefisien perp. panas untuk kasus ini menghasilkan persamaan berikut :

$$Nu_x = 0{,}332\ Pr^{1/3}\ Re^{1/2}$$

Yang berlaku pada jangkauan $Re < 5\ .\ 10^5$

Untuk menghitung koefisien perpindahan kalor dengan menggunakan persamaan diatas, sifat-sifat fluida dievaluasi pada suhu film, yakni rata-rata antara suhu dinding dan suhu aliran bebas, $Tf = (Tw + T\infty)/2$

Dalam praktek biasanya kita menggunakan harga rata-rata koef. Perp. kalor sepanjang plat mulai x = 0 sampai x = L, jadi :

$$\bar{h} = \frac{1}{L}\int_0^L h(x)\,dx = 2h(x)\Big|_{x=L}$$

Dengan demikian angka Nusselt rata-rata untuk aliran laminar sepanjang plat rata adalah :

$$\overline{Nu} = 0{,}664\ \mathrm{Pr}^{1/3}\ .\ \mathrm{Re}^{1/2}$$

Berlaku untuk fluida yang berlaku angka Pr = 0,6 – 50, jadi persamaan ini tidak berlaku untuk fluida yang mempunyai angka Prandtl sangat rendah seperti logam cair, dan yang mempunyai angka Prandtl sangat tinggi seperti minyak berat atau silikon.

Churchill dan Ozoe telah mengkorelasikan sejumlah besar data yang meliputi rentang angka prandtl yang cukup luas, dan mendapatkan persamaan sebagai berikut untuk aliran laminar diatas plat rata yang isotermal yakni :

$$Nux = \frac{0{,}3387\ \mathrm{Re}^{1/2}\ .\ \mathrm{Pr}^{1/3}}{\left[1 + \left(\frac{0{,}0468}{\mathrm{Pr}}\right)^{2/3}\right]^{1/4}}$$

Dimana, Berlaku untuk Re_x . Pr > 100.

Untuk kasus fluks kalor tetap, angka 0,3387 diganti dengan 0,4637; dan 0,0468 diganti dengan 0,0207. Dan sifat-sifat fisik fluida dievaluasi pada suhu film.

Contoh 5. 2 :

Suatu plat rata bujur sangkar berukuran 20 . 20 cm^2, dijaga pada suhu tetap 120 °C. Fluida pada suhu 80 °C mengalir diatasnya dengan kecepatan 0,1 m/s. berapa kalor yang dilepas plat tersebut jika fluidanya adalah :

- **air raksa**
- **udara**
- **Minyak mesin**

Jawab :

Suhu film, Tf = (80 + 120) / 2 = 100 °C

Sifat-sifat fisik pada suhu film, sebagaimana tabel berikut :

FLUIDA	ρ (kg / m^3)	ν (m2 / s)	K(W / m °C)	Pr
AIR RAKSA	13,385	$0,0928.10^{-6}$	10,51	0.0162
UDARA	0,9945	$23,12.10^{-6}$	0,0317	0,693
M. MESIN	840	$0,203.10^{-4}$	0,137	276

<u>AIR RAKSA</u>

Bilangan Reynolds adalah :

$$Re_x = (Ux \cdot L) / \nu$$
$$= (0,1) \cdot (0,2) / 0,0928.10^{-6}$$
$$= 2,2 \cdot 10^5$$

Bilangan Peclet, adalah :

$$Pe_x = Re_x \cdot Pr = 2{,}2 \cdot 10^5 \cdot (0{,}0162)$$
$$= 3564$$

Bilangan Nusselt, adalah :

$$Nu_x = 0{,}530 \cdot Pex^{1/2}$$
$$= 0{,}530 \cdot (3564)^{1/2} = 31{,}64$$
$$hx = (Nu_x \cdot k) / L = (31{,}64 \cdot 10{,}51) / 0{,}2$$
$$= 1663$$

Nilai rata-rata koef. Perp. kalor adalah :

$$\bar{h} = 2 \cdot hx = 2 \cdot 1663 = 3326$$

sehingga perp. kalor total menjadi :

$$Q = \bar{h} \; A \; (T\omega - T\infty)$$
$$= (3326) \; (0{,}2)^2 \; (120 - 80) = 5322 \; W$$

<u>UDARA</u>

Bilangan Reynolds adalah :

$$Rex = (Ux \cdot L) / \nu$$
$$= (0{,}1) \cdot (0{,}2) / 23{,}12 \cdot 10^{-6} = 865$$

Bilangan Nusselt adalah :

$$\overline{Nu} = 0{,}664\ Pr^{1/3}\ Re^{1/2}$$
$$= 0{,}664\ (0{,}693)^{1/3}\ (865)^{1/2}$$
$$= 17{,}28$$

$$\bar{h} = \frac{\overline{Nu}}{L} k = \frac{(17{,}28)\ (0{,}0317)}{0{,}2} = 3$$

Sehingga perpindahan kalor total menjadi :

$$Q = \bar{h}\ A\ (T\omega - T\infty)$$
$$= (3)\ (0{,}2)^2\ (120 - 80) = 5\ W$$

MINYAK MESIN

Bilangan Reynolds adalah :

$$\mathbf{Rex = (Ux\ .\ L) / \nu}$$
$$\mathbf{= (0{,}1)\ .\ (0{,}2) / 0{,}203}$$
$$\mathbf{= 985}$$

karena bilangan Prandtl untuk minyak mesin cukup besar, maka kita gunakan pers. bilangan Nusselt berikut :

$$Nux = \frac{0{,}3387\,\mathrm{Re}^{1/2} \,.\, \mathrm{Pr}^{1/3}}{\left[1+\left(\frac{0{,}0468}{\mathrm{Pr}}\right)^{2/3}\right]^{1/4}}$$

$$Nux = \frac{0{,}3387\ (985)^{1/2} \,.\, (276)^{1/3}}{\left[1+\left(\frac{0{,}0468}{276}\right)^{2/3}\right]^{1/4}}$$

$$= 69{,}16$$

Atau :

hx = (Nux . k) / L = (69,16 . 0,137) / 0,2

= 47

$$\bar{h} = 2 \,.\, hx = 2 \,.\, 47 = 94$$

Sehingga perpindahan kalor total menjadi :

$$Q = \bar{h}\ A\ (T\omega - T\infty)$$
$$= (94)\ (0{,}2)^2\ (120 - 80) = 150\ W$$

Dari hasil perhitungan tampak bahwa perpindahan kalor terbesar terjadi pada fluida logam cair, hal ini disebabkan oleh

besarnya konduktivitas kalor Logam cair, sebagaimana hasil perhit. Yang dirangkum pada tabel berikut :

FLUIDA	NUx	h (W / m^2 °C)	Q (W)
AIR RAKSA	31,64	3326	5322
UDARA	17,28	3	5
MINYAK MOTOR	69,16	94	150

TUGAS :

Dari dosen pengajar