

# IX

## PERENCANAAN PENUKAR KALOR

### I. PERHITUNGAN PENUKAR KALOR 1 – 2 PASS, METODE KERN

Penukar kalor dengan 1 – 2 pass adalah jenis penukar kalor, di mana terdapat 1 pass aliran fluida pada shell dan 2 pass pada sisi tube. Diketahui data-data fluida sebagai berikut:

	<i>Fluida panas</i>	<i>Fluida dingin</i>
Suhu masuk ke dalam penukar kalor	$T_1$	$t_1$
Suhu ke luar dari penukar kalor	$T_2$	$t_2$
Beratnya fluida pada penukar kalor	$W$	$w$
Panas	$C$	$c$
Spesifik gravity	$s$	$s$
Viskositas	$\mu$	$\mu$
Konduktivitas termal	$k$	$k$
Faktor kotor (sebelah luar/dalam)	$R_d$	$R_d$
Penurunan tekanan ( <i>pressure drop</i> )	$\Delta P$	$\Delta P$

Urutan perhitungan dilakukan sebagai berikut:

1. Neraca Panas:  $Q = W \cdot C (T_1 - T_2)$   
 $= w \cdot c (t_1 - t_2)$  (9.1)

2. Selisih temperatur sebenarnya  $\Delta t$  adalah:

Hitung LMTD (*Logaritmik mean temperature difference*).

— Cari harga  $R = (T_1 - T_2) / (t_2 - t_1)$  (9.2)

— Cari harga  $S = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1}$  (9.3)

$$\text{Maka } \Delta t = \text{LMTD} \cdot F_t \quad (9.4)$$

Harga  $F_t$  didapat dari Gambar 8.8 merupakan korelasi R dan S.

$$a_t = (\text{ID} \times C' \times B) / P_t$$

$$a_t = (\text{ID} \times C' \times B) / (144 \times P_t) \quad (\text{ft}^2).$$

3. Tentukan temperatur kalori  $T_c$  dan  $t_c$ , gunakan Gambar 9.1 di mana didapat  $F_c$  di mana:

$$T_c = T_2 + F_c \cdot (T_1 - T_2) \quad (9.5)$$

$$t_c = t_1 + F_c \cdot (t_2 - t_1) \quad (9.6)$$

Tentukan fluida mana yang mengalir di sebelah shell dan yang masuk ke tube (*shell side and tube side*).

### Fluida yang Panas di Sebelah Shell

4. Luas aliran

$$a_t = (\text{ID} \times C' \times B) / P_t \quad (9.7)$$

Apabila semua dimensinya dalam inch, maka dibagi dengan 144 agar didapat ft, maka:

$$a_t = (\text{ID} \times C' \times B) / (144 \cdot P_t) \quad (\text{ft}^2) \quad (9.8)$$

di mana:

ID = diameter sebelah dalam tube, inch.

C' = daerah bebas antara tube dengan tubes, inch.

B = jarak antara sekat, inch.

$P_t$  = jarak antara tube, inch.

5. Tentukan kecepatan masa aliran sebelah shell =  $G_s$

$$G_s = W/a_s \quad (1\text{b/hr} \cdot \text{ft}^2) \quad (9.9)$$

W = berat fluida yang mengalir sebelah shell (1b/jam).

6. a. Tentukan besarnya diameter ekivalen shell, yang didapat dari grafik pada Gambar 9.2 atau

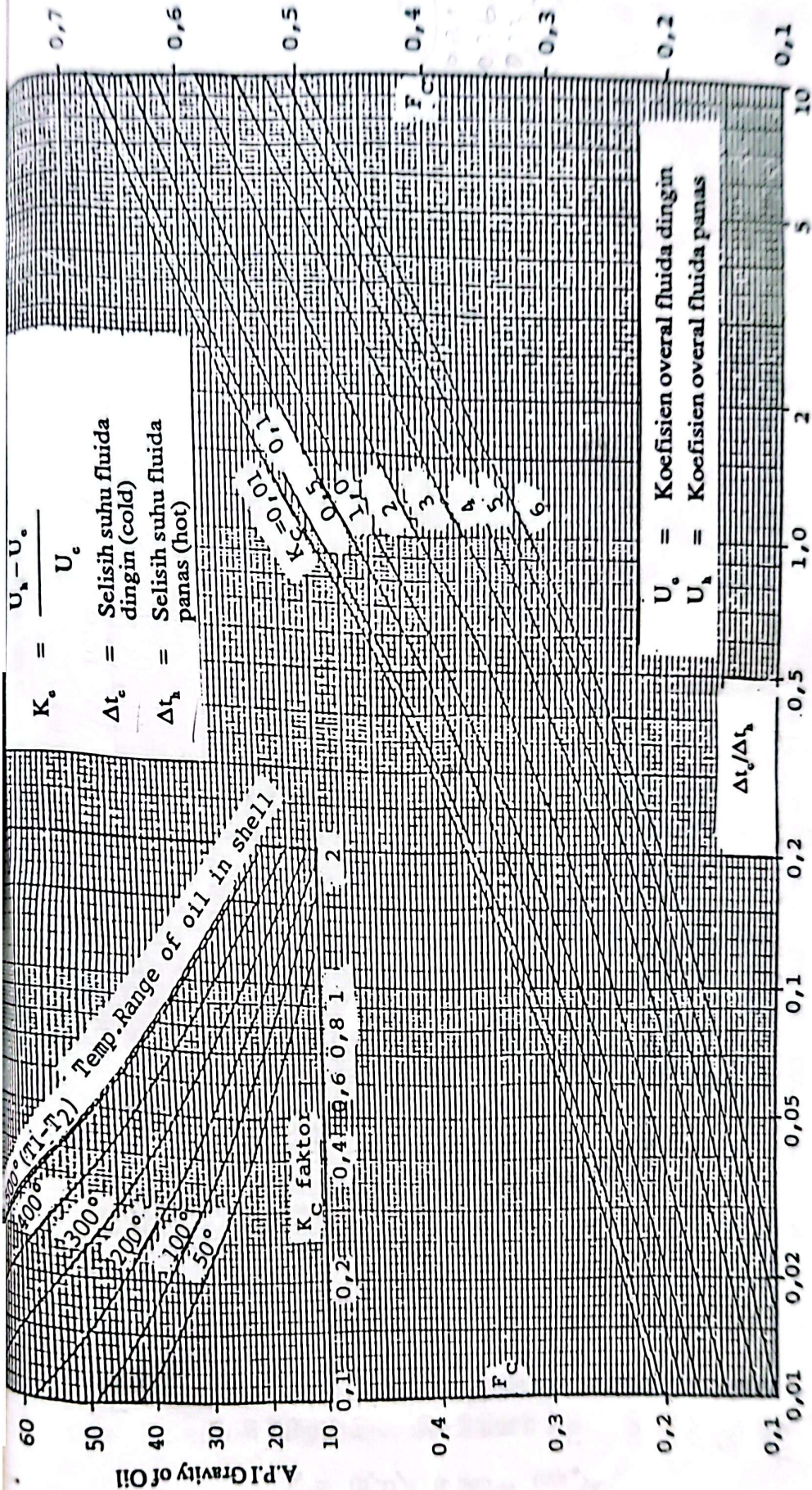
- b. Tentukan diameter ekivalen shell dengan formula:

$$D_o = 4 \times \frac{(P_t^2 - \pi) \cdot d_o^2 / 4 \text{ inch}}{\pi \cdot d_o} \quad (9.10)$$

- c. Cari besarnya viskositas,  $\mu$  pada temperatur  $T_c$  (butir 3 di atas), di mana centipoises  $\times 2,42$  1b/(ft), (hr).

- d. Bilangan Reynolds.  $N Re_s = (D_o \cdot G_s) / \mu \quad (9.11)$

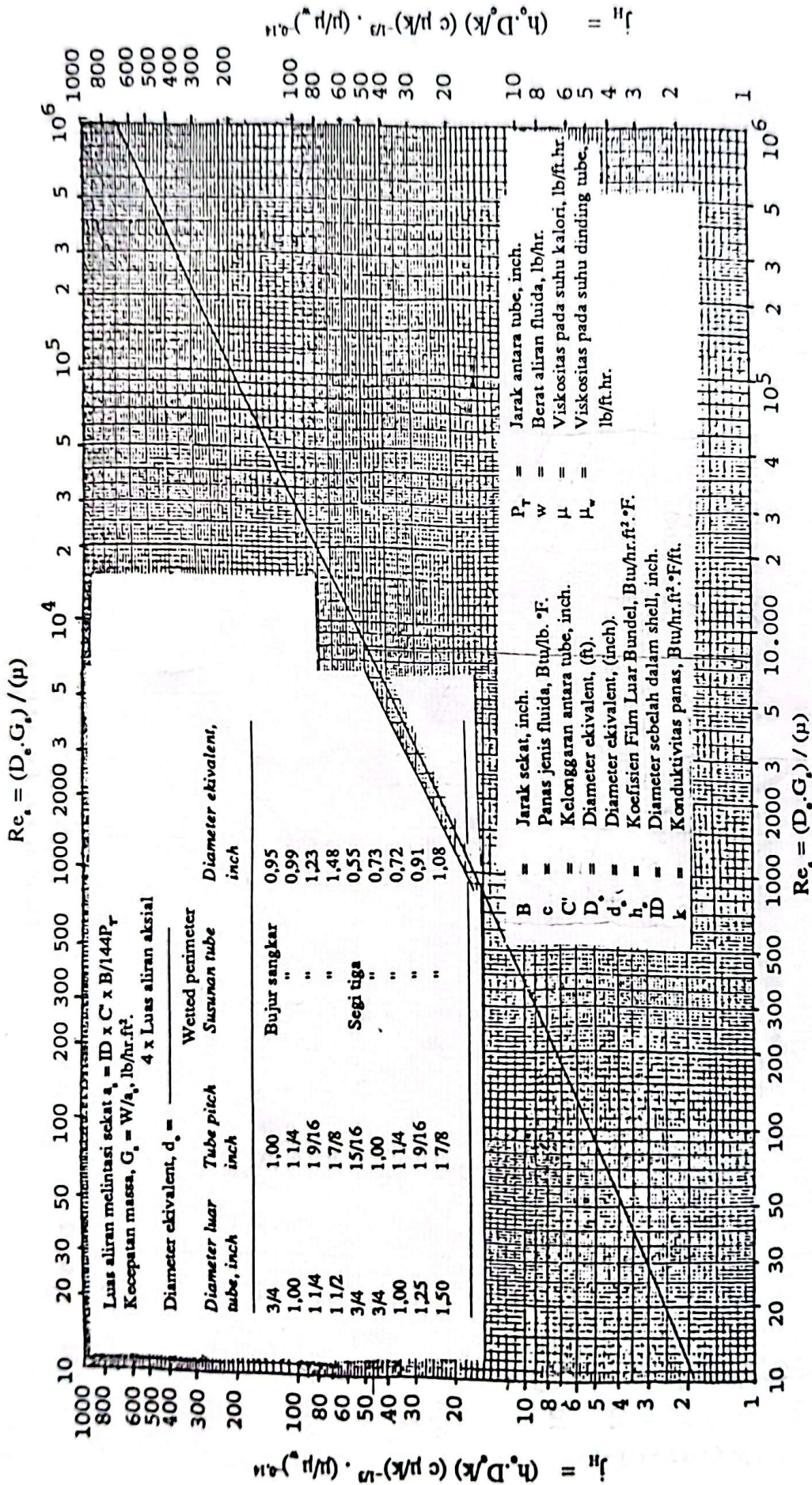
7. Tentukan faktor  $j_H$  dengan menggunakan grafik Gambar 9.2. Pada grafik tersebut terdapat hubungan antara  $NR_o$  vs  $j_H$ .



$K_c = \frac{U_c - U_o}{U_c}$   
 $\Delta t_c =$  Selisih suhu fluida dingin (cold)  
 $\Delta t_s =$  Selisih suhu fluida panas (hot)

$U_o =$  Koeffisien overal fluida dingin  
 $U_a =$  Koeffisien overal fluida panas

Gambar 9.1. Faktor  $F_c$  temperatur kalori



Gambar 9.2. Kurva perpindahan panas pada sisi sebelah shell bundel dengan menggunakan sekat coriemen yang dipotong sebesar 25%

8. a. Tentukan panas jenis suhu  $T_c$  (BTU / lb, °F) serta besarnya konduktivitas panas  $k$  (BTU/hr . ft<sup>2</sup> . °F/ft).  
 b. Hitunglah besarnya  $[c \cdot \mu \cdot k]^{1/3}$

9. Koefisien perpindahan panas pada fluida di luar tube atau dalam shell =  $h_o$  didapat sebagai berikut:

$$h_o = j_H \cdot (k/D) \cdot (c \cdot \mu/k)^{1/3} \cdot \phi_s \quad (9.12)$$

10. Temperatur dinding dari tube adalah:  $t_w$

$$t_w = t_c + \frac{h_o / \phi_s}{h_{io} / \phi_i + h_o / \phi_s} \cdot (T_c - t_c) \quad (9.13)$$

11. Tentukan viskositas fluida pada suhu dinding tube (*tube wall temperature*)

$$\mu_w \text{ dan } \phi_s = (\mu/\mu_w)^{0.14}$$

12. Koefisien koreksi adalah:

$$h_o = (h_o \cdot \phi_s) / \phi_s \quad (9.14)$$

Selanjutnya akan dihitung koefisien perpindahan keseluruhan permukaan yang bersih yaitu  $U_c$  yaitu:

$$U_c = (h_{io} \cdot h_o) / (h_{io} + h_o) \quad (9.15)$$

Namun untuk menghitung ini harus diketahui besarnya  $h_{io}$  yaitu koefisien perpindahan panas untuk fluida sebelah dalam tube.

Nilai  $h_{io}$  dipergunakan pada perhitungan nomor 10, yaitu menghitung temperatur dinding tube ( $t_w$ ). Karena itu maka setelah perhitungan nomor 9, langkah selanjutnya adalah menghitung fluida di sebelah dalam tube (*tube side*).

### **Fluida Dingin di Sebelah dalam Tube (Tube side)**

- 4a. Hitung luas laju aliran sebelah tube =  $a_t$

Data-data tube diperoleh pada Tabel 9.1

$$a_t = \frac{\text{Jumlah tube x luas aliran tiap tube (a'_t)}}{\text{Jumlah pass aliran}}$$

$$a_t = \frac{N_t \cdot a'_t}{144 \cdot n} \quad (\text{ft}^2) \quad (9.16)$$

- 5a. Kecepatan aliran massa sebelah tube

$$G_t = w/a_t \text{ (lb/hr. ft}^2\text{)} \quad (9.17)$$

w = berat aliran fluida yang mengalir melalui tube

Tabel 9.1. Data tube untuk penukar kalor dan kondensor

Tube OD, in	BWG	Wall thickness, in.	ID, in.	Flow area per tube, in. <sup>2</sup>	Surface per lin ft, ft <sup>2</sup>		Weight per lin ft, lb steel
					Outside	Inside	
1/2	12	0,109	0,282	0,0625	0,1309	0,0748	0,493
	14	0,083	0,334	0,0876		0,0874	0,403
	16	0,065	0,370	0,1076		0,0969	0,329
	18	0,049	0,402	0,127		0,1052	0,258
	20	0,035	0,430	0,145		0,1125	0,190
3/4	10	0,134	0,482	0,182	0,1963	0,1263	0,965
	11	0,120	0,510	0,204		0,1335	0,884
	12	0,109	0,532	0,223		0,1393	0,817
	13	0,095	0,560	0,247		0,1466	0,727
	14	0,083	0,584	0,268		0,1529	0,647
	15	0,072	0,606	0,289		0,1687	0,571
	16	0,065	0,620	0,302		0,1923	0,520
	17	0,058	0,634	0,314		0,1660	0,469
	18	0,049	0,652	0,334		0,1707	0,401
1	8	0,165	0,670	0,355	0,2618	0,1754	1,61
	9	0,148	0,704	0,389		0,1843	1,47
	10	0,134	0,732	0,421		0,1916	1,36
	11	0,120	0,760	0,455		0,1990	1,23
	12	0,109	0,782	0,479		0,2048	1,14
	13	0,095	0,810	0,515		0,2121	1,00
	14	0,083	0,834	0,546		0,2183	0,890
	15	0,072	0,856	0,576		0,2241	0,781
	16	0,065	0,870	0,594		0,2277	0,710
	17	0,058	0,884	0,613		0,2314	0,639
18	0,049	0,902	0,639	0,2361	0,545		
1 1/4	8	0,165	0,920	0,665	0,3271	0,2409	2,09
	9	0,148	0,954	0,714		0,2498	1,91
	10	0,134	0,982	0,757		0,2572	1,75
	11	0,120	1,01	0,800		0,2644	1,58
	12	0,109	1,03	0,836		0,2701	1,45
	13	0,095	1,06	0,884		0,2775	1,28
	14	0,083	1,08	0,923		0,2839	1,13
	15	0,072	1,11	0,960		0,2896	0,991
	16	0,065	1,12	0,985		0,2932	0,900
	17	0,058	1,13	1,01		0,2969	0,808
18	0,049	1,15	1,04	0,3015	0,688		
1 1/2	8	0,165	1,17	1,075	0,3925	0,3063	2,57
	9	0,148	1,20	1,14		0,3152	2,34
	10	0,134	1,23	1,19		0,3225	2,14
	11	0,120	1,26	1,25		0,3299	1,98
	12	0,109	1,28	1,29		0,3356	1,77
	13	0,095	1,31	1,35		0,3430	1,56
	14	0,083	1,33	1,40		0,3492	1,37
	15	0,072	1,36	1,44		0,3555	1,20
	16	0,065	1,37	1,47		0,3587	1,09
	17	0,058	1,38	1,50		0,3623	0,978
18	0,049	1,40	1,54	0,3670	0,831		

6a. Tentukan besarnya D dari Tabel 9.1

Tentukan besarnya viskositas  $\mu$ , pada suhu  $t_c$ .

Centipoises x 2.42 = lb/ft . hr.

Bilangan Reynolds  $N_{Re} = D \cdot G / \mu$

7a. Tentukan besarnya  $j_H$  dari Gambar 9.3.

8a. Pada suhu kalori  $t_c$  tentukan besarnya panas jenis  $c$ , Btu/lb. °F dan tentukan pula besarnya  $k$  (Btu/hr . ft<sup>2</sup> . °F/ft).

Tentukan besarnya  $(c \cdot \mu / k)^{1/3}$

9a. Tentukan besarnya koefisien perpindahan panas sebelah dalam tube.

$$h_i = (j_H / D) \cdot k \cdot (c \cdot \mu / k)^{1/3} \cdot \phi_t \quad (9.18)$$

10a. Dicari besarnya  $h_{io}$  yaitu:

$$h_{io} / \phi_t = h_i / \phi_t \times I.D / O.D \quad (9.19)$$

Setelah diperoleh hasil perhitungan dari  $h_{io}$  dari (10a), maka dapat dipergunakan untuk perhitungan pada (10) serta nomor 13.

11a. Besarnya temperatur dinding  $t_w$  didapat dari hasil perhitungan nomor (10).

Mendapatkan besarnya viskositas fluida pada suhu dinding tube adalah:

$$\phi_t = (\mu / \mu_w)^{0.14} \text{ atau dari Gambar 9.3}$$

12a. Koefisien koreksi  $h_{io}$  adalah:

$$h_{io} = (h_{io} \times \phi_t) / \phi_t \quad (9.20)$$

13. Koefisien perpindahan panas keseluruhan untuk permukaan yang bersih adalah:

$$U_c = (h_{io} \cdot h_o) / (h_{io} + h_o) \text{ persamaan (9.15)}$$

14. Tentukan besarnya koefisien perpindahan panas keseluruhan (*design overall coefficient*)  $U_D$  yaitu:

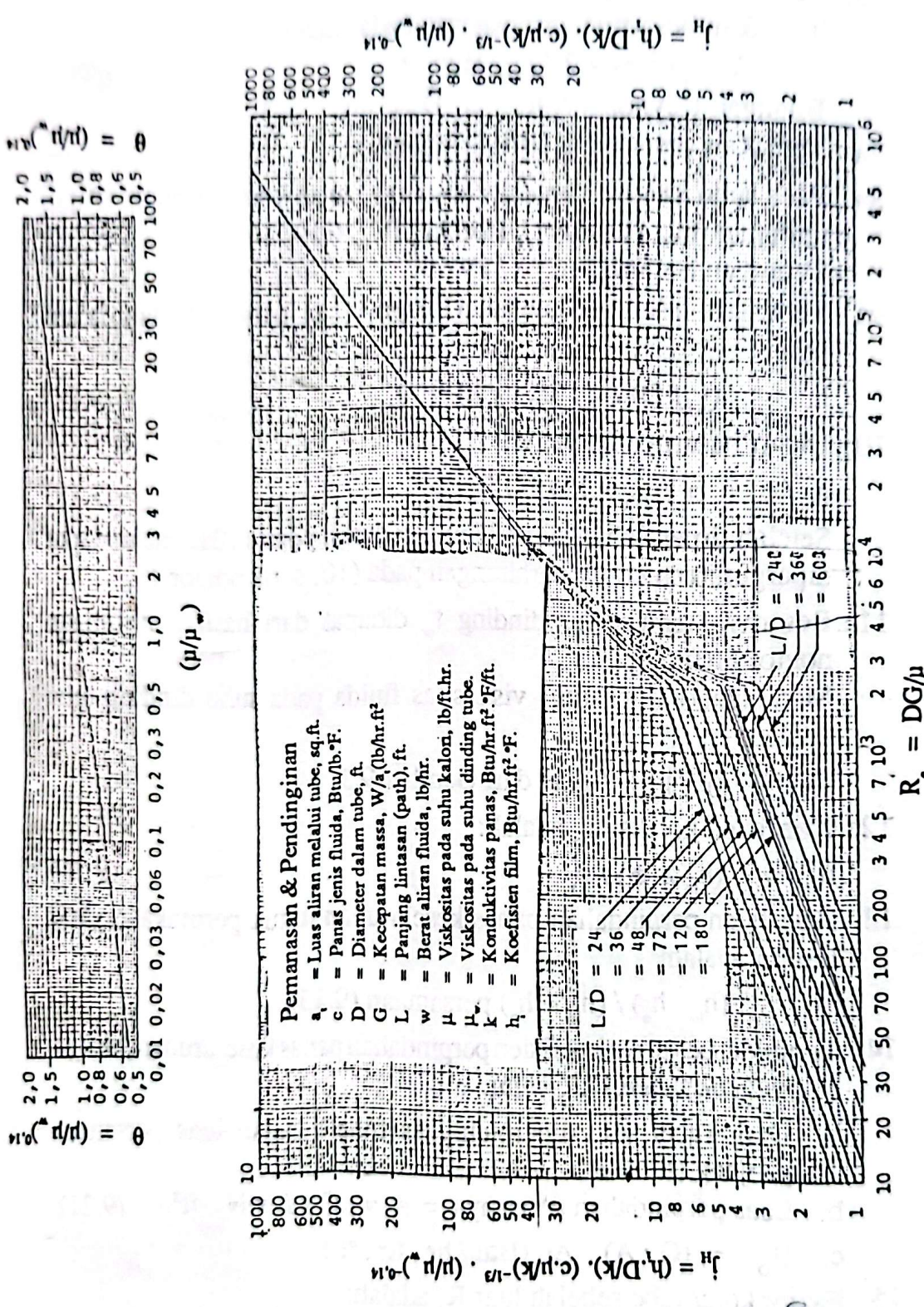
a. Dari Tabel 9.1. diperoleh luas tube sebelah luas persatuan panjang (ft) =  $a''$ .

b. Luas perpindahan panasnya =  $A = a'' \times L \times N_t \cdot \text{ft}^2 \quad (9.21)$

c.  $U_D = (Q / A) \cdot \Delta t \text{ (Btu / hr . ft}^2 \cdot \text{°F)}$

15 Faktor kotor tube sebelah luar  $R_d$  adalah:

$$R_d = \frac{U_c - U_D}{U_c \times U_D} \text{ (hr) . (ft}^2 \text{) (°F) / Btu} \quad (9.22)$$





### Perhitungan Penurunan Tekanan (*Pressure Drop*)

#### a. Perhitungan pada sisi shell.

1. Dari perhitungan bilangan Reynolds pada butir (6) diperoleh faktor gesekan pada sisi sebelah shell, Gambar 8.22.

2. Banyaknya lintasan yang melintang =

$$N + 1 = 12 \cdot L / B \quad (9.23)$$

di mana:

$N$  = banyaknya jumlah sekat sebelah shell.

$L$  = panjang tube.

$B$  = Jarak antara sekat

3. Besarnya penurunan tekanan atau *pressure drop* adalah:

$$\Delta P_s = \frac{f \cdot G_t^2 \cdot D_e \cdot (N + 1)}{5,22 \times 10^{10} \times D_e \times s \times \phi_s} \text{ psi} \quad (9.24)$$

#### b. Perhitungan pada sisi tube

1. Bilangan Reynold diperoleh dari butir 6a, dan faktor gesekan  $f$  diperoleh dari Gambar 8.20.

2. Penurunan tekanan sebelah tube adalah:

$$\Delta P_t = \frac{f \cdot G_t^2 \cdot L \cdot n}{5,22 \times 10^{10} \cdot d \cdot D_t \cdot \phi_t} \text{ psi} \quad (9.25)$$

3. Penurunan tekanan saat kembali (*return*) karena terdapat *pass* aliran.

$$\Delta P_r = \frac{4 \cdot n}{s} \frac{V^2}{2g'} \frac{62,5}{144} \text{ psi} \quad (9.26)$$

4. Besarnya penurunan tekanan total  $P_T$  adalah:

$$\Delta P_T = \Delta P_t + \Delta P_r \quad (9.27)$$

### Contoh Perhitungan Alat Penukar Kalor 1 – 2 pass

Suatu alat penukar kalor dipergunakan untuk mendinginkan kerosine, dan mempergunakan *crude oil* sebagai pendingin. Banyaknya yang didinginkan 43.800 lb/jam, 42° API meninggalkan kolom destilasi pada suhu 390 °F. Kerosine tersebut didinginkan menjadi 200 °F oleh *crude oil* sebanyak 149.000 lb/jam, 34 °API yang dialirkan dari tanki penimbunan pada suhu 100 °F menjadi 170 °F akibat pemanasan dari kerosine.

Besarnya penurunan tekanan (*pressure drop*) yang diizinkan 10 psi

dengan faktor kotor 0,003.

Shell yang dipergunakan berukuran diameter dalam (ID) = 21,25 inci, jumlah tube 158, diameter 1 Inch O.D., serta 13 BWG, panjangnya 16 ft dengan susunan 1,25 inch square pitch. Jumlah pass bundel atau tube side = 4, jarak antara sekat 5 inch.

Ditanyakan, apakah alat penukar kalor itu layak dipergunakan, bagaimana mengenai faktor pengotoran yang diperbolehkan?

*Penyelesaian*

- Diameter = 21,25 inch.
- Jarak sekat (*baffle pitch*) = 5 inch
- Jumlah pass shell = 1
- Jumlah tube yang dipergunakan = 16 ft
- Diameter luar tube = 1 inch.
- Tebal tube = 13 BWG
- Susunan tube = Bujur sangkar dengan jarak antara 1 1/4".
- Jumlah pass tube = 4

1. Neraca Panas

a. Fluida panas, Kerosine.

$$Q = W \cdot C (T_1 - T_2)$$

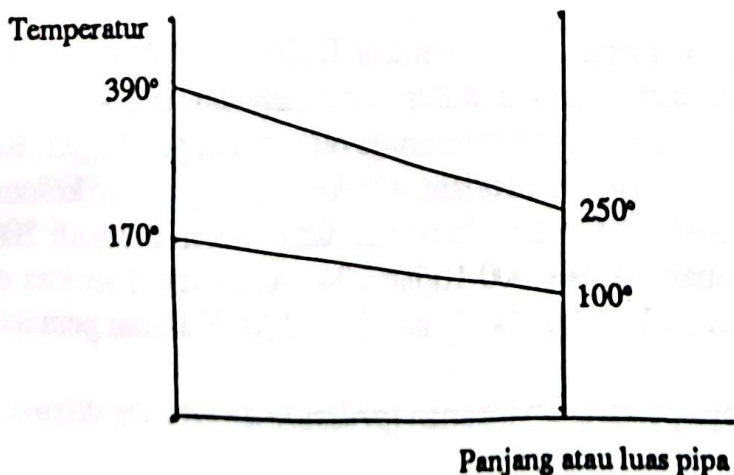
$$Q = 43.800 \times 0,605 \times 0,605 \times (390 - 200) \\ = 5.100.000 \text{ Btu/jam.}$$

b. Fluida yang dingin, crude oil.

$$Q = w \times c \times (t_2 - t_1)$$

$$Q = 149.000 \times 0,49 \times (170 - 100) \\ = 5.100.000 \text{ Btu/jam.}$$

2. Temperatur logaritmis rata-rata (LMTD) dan selisih temperatur logaritmis rata-rata yang sebenarnya ( $\Delta$ ).



	<i>Fluida panas</i>	<i>Fluida dingin</i>	<i>Selisih</i>
Temperatur atas	390	170	220
Temperatur bawah	200	100	100
Selisih	190	70	120
	$(T_1 - T_2)$	$(t_2 - t_1)$	$(\Delta t_2 - \Delta t_1)$

Dari data di atas didapat LMTD:

$$LMTD = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{2,3 \log (\Delta t_2 / \Delta t_1)} = \frac{120}{2,3 \log (220 / 100)} = 152,5 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Untuk menentukan  $D_i$  sebenarnya, dicari besarnya R dan S sehingga faktor koreksi temperatur  $F_T$  diketahui.

Dari Gambar 8.8 diperoleh bahwa  $F_T = 0,905$

$$\begin{aligned} \Delta t_c &= F_T \times LMTD \\ &= 0,905 \times 152,5 = 138 \text{ } ^\circ\text{F} \end{aligned}$$

3. Menghitung  $T_c$  dan  $t_c$ .

$$\Delta t_c / \Delta t_h = \Delta t_2 / \Delta t_1 = 100 / 220 = 0,455.$$

Dengan mengetahui  $\Delta t_c / \Delta t_h$  maka diperoleh besarnya  $K_c$  dan selanjutnya nilai  $F_c$  diperoleh dengan mempergunakan Gambar 9.1. Sehingga diperoleh:

$$K_c = 0,20 \text{ dan } F_c = 0,42$$

Maka:

$$T_c = T_2 + F_c (T_1 - T_2)$$

$$T_c = 200 + 0,42 \times (390 - 200) = 280 \text{ } ^\circ\text{F}$$

$$t_c = t_1 + F_c (t_2 - t_1)$$

$$t_c = 100 + 0,42 \times (170 - 100) = 129 \text{ } ^\circ\text{F}$$

Di sini fluida yang paling banyak alirannya sebelah tube, maka crude oil dianggap mengalir dalam tube.

Mula-mula dihitung adalah sebelah tube (*crude oil*) yaitu fluida dingin yang menjadi panas.

4. Luas laluan aliran tube =  $a_t$  di mana luas aliran per-tube ( $a_t'$ ) = 0,515 inch<sup>2</sup>, untuk tube OD = 1 inch dan 13 BWG (lihat Tabel 9.1).

$$a_t = \frac{N_t \times a_t'}{144 \times n}$$

$$a_t = (158 \times 0,0515) / (144 \times 4)$$

$$a_t = 0,141 \text{ ft}^2$$

5. Kecepatan aliran massa.

$$G_t = w / a_t$$

$$G_t = 149.000 / 0,141 = 1.060.000 \text{ lb / (jam) (ft}^2\text{)}$$

6. Bilangan Reynold.

$$Re_t = D \cdot G_t / \mu$$

Pada  $t_c = 129^\circ\text{F}$  diperoleh  $\mu = 3,6 \times 3,42 = 8,7 \text{ lb / (ft) (hr)}$ .

$$D = 0,81 / 12 = 0,0675 \text{ ft.}$$

(lihat Gambar 9.5).  $Re_t = 0,0675 \times 1,060 = 1,060.000 / 8,7 = 8.220$ .

7.  $L / D = 16 / 0,675 = 237$

Dengan menggunakan Gambar 9.3, didapat hubungan  $L/D$  dengan bilangan Reynold serta besarnya  $j_H = 31$ .

8. Pada  $t_c = 129^\circ\text{F}$  diperoleh panas jenis  $c = 0,49 \text{ Btu / (lb) (}^\circ\text{F)}$ .

Besarnya konduktivitas panas ( $k$ ), diperoleh dari Gambar 9.6 yaitu:

$$k = 0,077 \text{ Btu / (hr}^2\text{) (ft}^2\text{) (}^\circ\text{F)}$$

$$(c \cdot \mu / k)^{1/3} = (0,49 \times 8,7 / 0,77)^{1/3}$$

$$= 3,81$$

9. Koefisien perpindahan panas  $h_i$  adalah:

$$h_i = j_H (k/D) \cdot (c \mu / k)^{1/3} \cdot \phi_t$$

$$h_i$$

$$= 31 \times (0,077 / 0,675) \times 3,81 = 135$$

$$\phi_t$$

10.  $h_{io} / \phi_t = h_i / \phi_t \times ID / OD = 135 \times 0,81 / 1$

$$= 109$$

Selanjutnya dihitung aliran pada sisi shell.

#### **Fluida Panas Berada Pada Sebelah Shell (Di Luar Tube)**

4. a. Luas laluan aliran sebelah  $a_s$ .

$$a_s = ID \times C' \times B / (144 \times P)$$

$$a_s = 21,25 \times 0,25 \times 5 / (144 \times 1,25) = 0,1475 \text{ ft}^2$$

5. a. Kecepatan massa.  $G_s = W / a_s$

$$G_s = 43.800 / (0,1475) = 297.000 \text{ lb/(hr) . (ft}^2\text{)}$$

6. a. Bilangan Reynold.

$$Re_s = D_s \cdot G_s / \mu$$

Pada suhu  $280^\circ\text{F}$ .

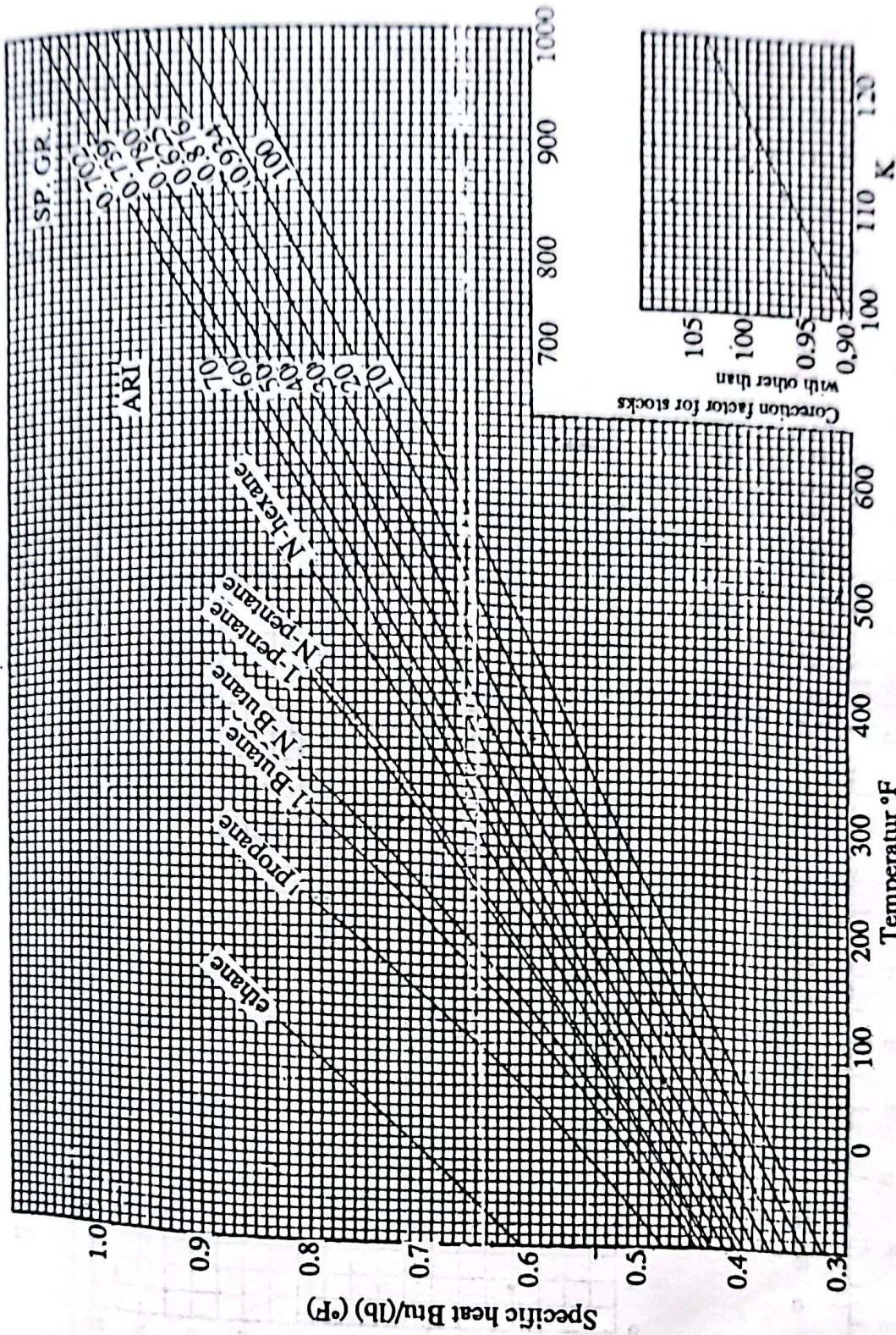
$$\mu = 0,40 \times 2,42$$

$$\mu = 0,97 \text{ lb / (ft) (hr)}$$

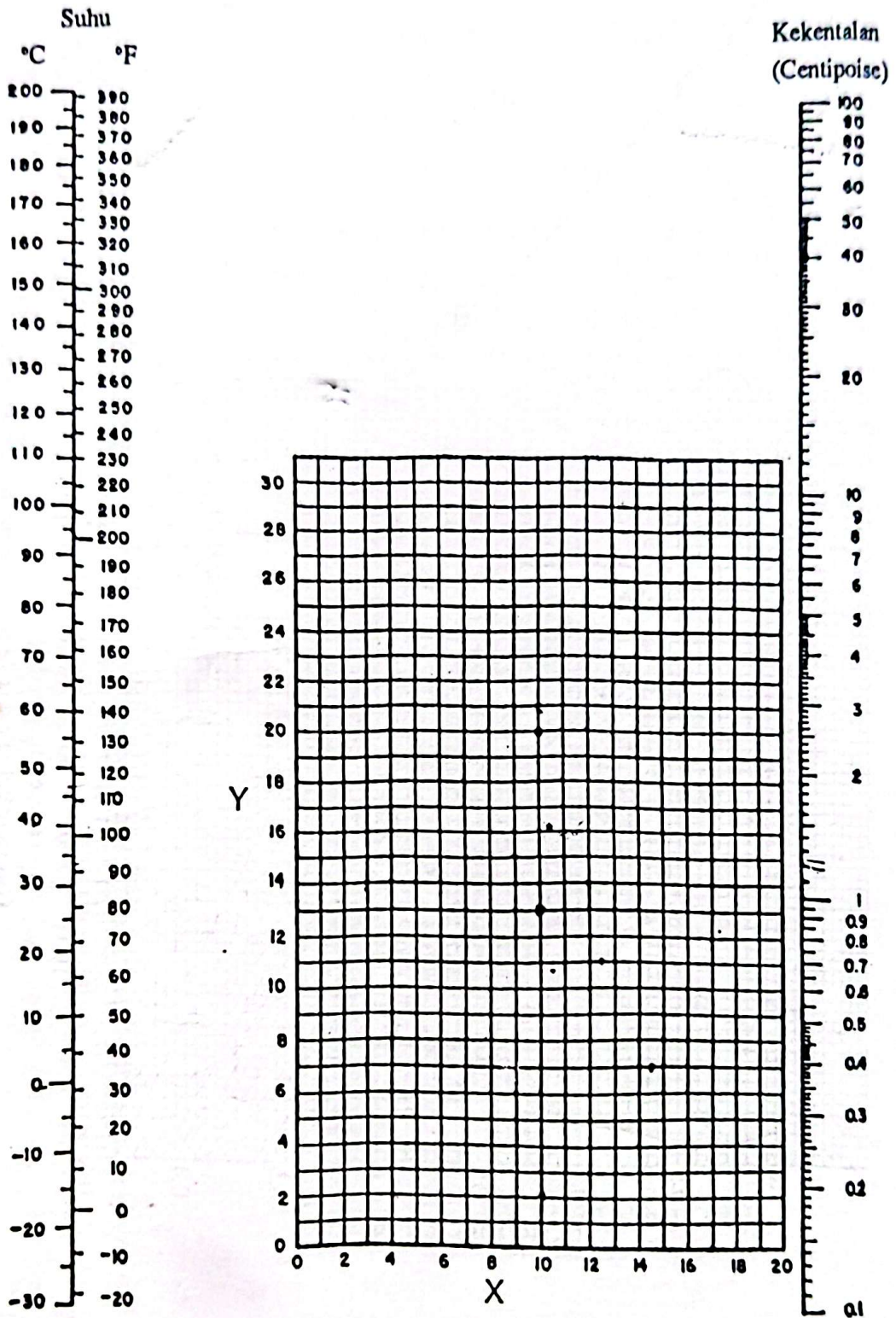
$$D_s = 0,99 / 12 = 0,0825 \text{ ft.}$$

$$Re_s = 0,0825 \times 297.000 / 0,97 = 25.300$$

(Gambar 9.5)



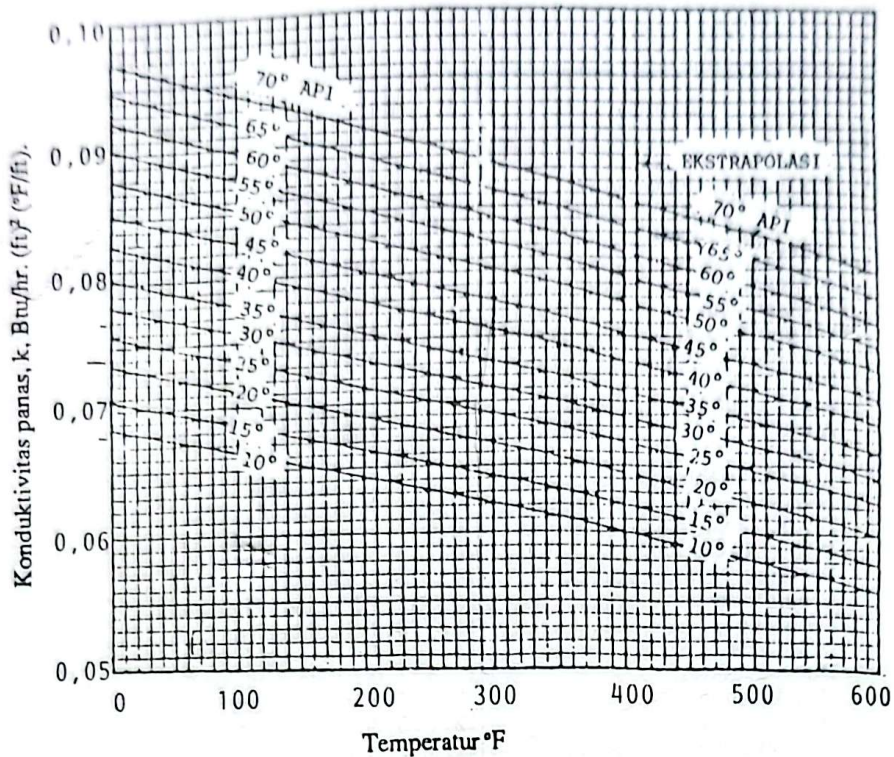
Gambar 9.4. Panas Jenis dari cairan hidrokarbon  
K = faktor karakter



Gambar 9.5. Kekentalan dari berbagai jenis cairan

Liquid	X	Y	Liquid	X	Y
Acetaldehyde	16.7	4.8	Freon-21	16.7	7.6
Acetic acid, 100%	12.1	14.2	Freon-22	17.2	4.7
Acetic acid, 70%	9.8	17.0	Freon-118	12.6	11.4
Acetic anhydride	12.7	12.8	Freon-114	14.0	8.8
Acetone, 100%	14.6	7.2	Glycerol, 100%	2.0	30.0
Acetone, 35%	7.9	15.0	Glycerol, 50%	6.9	19.0
Allyl alcohol	10.2	14.3	Heptane	14.1	8.4
Ammonia, 100%	12.0	2.0	Hexane	14.7	7.0
Ammonia, 26%	10.1	13.9	Hydrochloric acid, 31.5%	13.0	10.0
Amyl acetate	11.8	12.5	Isobutyl alcohol	7.1	18.0
Amyl alcohol	7.5	18.4	Isobutyric acid	12.2	14.4
Aniline	8.2	18.7	Isopropyl alcohol	8.2	16.0
Anisole	12.3	13.5	Mercury	18.4	10.4
Arsenic trichloride	18.9	14.5	Methanol, 100%	12.4	10.5
Benzene	12.5	10.9	Methanol, 90%	12.3	11.3
Brine, CaCl <sub>2</sub> , 25%	6.0	16.9	Methanol, 40%	7.8	15.5
Brine, NaCl, 25%	10.2	10.0	Methyl acetate	14.2	8.2
Bromine	14.2	13.2	Methyl chloride	15.0	8.3
Bromotoluene	20.0	15.9	Methyl ethyl ketone	18.9	8.3
n-Butane	15.3	3.3	Naphthalene	7.9	18.1
Isobutane	14.5	3.7	Nitric acid, 95%	12.8	13.3
Butyl acetate	12.3	11.0	Nitric acid, 60%	10.8	17.0
Butyl alcohol	8.5	17.2	Nitrobenzene	10.0	10.2
Butyric acid	12.1	15.3	Nitrotoluene	11.0	17.0
Carbon dioxide	11.6	0.3	Octane	13.7	10.0
Carbon disulfide	10.1	7.5	Octyl alcohol	6.6	21.1
Carbon tetrachloride	12.7	13.1	Pentachloroethane	10.9	17.3
Chlorobenzene	12.3	12.4	Pentane	14.0	5.2
Chloroform	14.4	10.2	Phenol	6.9	20.8
Chlorosulfonic acid	11.2	18.1	Phosphorus tribromide	13.8	16.7
Chlorotoluene, ortho	13.0	13.3	Phosphorus trichloride	16.2	10.9
Chlorotoluene, meta	13.3	12.5	Propane	15.3	1.0
Chlorotoluene, para	13.3	12.5	Propionic acid	12.8	13.8
Cresol, meta	2.6	20.8	Propyl alcohol	9.1	10.5
Cyclohexanol	2.0	24.3	Propyl bromide	14.5	9.6
Dibromoethane	12.7	15.8	Propyl chloride	14.4	7.5
Dichloroethane	13.7	12.2	Propyl iodide	14.1	11.6
Dichloromethane	14.0	8.9	Sodium	16.4	13.9
Diethyl oxalate	11.0	10.4	Sodium hydroxide, 50%	3.2	25.8
Dimethyl oxalate	12.8	15.8	Stannic chloride	13.5	12.8
Diphenyl	12.0	18.3	Sulfur dioxide	15.2	7.1
Dipropyl oxalate	10.3	17.7	Sulfuric acid, 110%	7.2	27.4
Ethyl acetate	13.7	9.1	Sulfuric acid, 98%	7.0	24.8
Ethyl alcohol, 100%	10.8	18.8	Sulfuric acid, 90%	10.2	21.3
Ethyl alcohol, 95%	9.8	14.3	Sulfuryl chloride	15.2	12.4
Ethyl alcohol, 40%	6.8	10.0	Tetrachloroethane	11.9	15.7
Ethyl benzene	18.2	11.5	Tetrachloroethylene	14.2	12.7
Ethyl bromide	14.5	8.1	Titanium tetrachloride	14.4	12.3
Ethyl chloride	14.8	6.0	Toluene	13.7	10.4
Ethyl ether	14.5	5.3	Trichloroethylene	14.8	10.5
Ethyl formate	14.2	8.4	Turpentine	11.5	14.9
Ethyl iodide	14.7	10.8	Vinyl acetate	14.0	8.8
Ethylene glycol	6.0	23.0	Water	10.2	18.0
Formic acid	10.7	15.8	Xylene, ortho	18.5	12.1
Freon-11	14.4	9.0	Xylene, meta	18.9	10.0
Freon-12	10.8	5.0	Xylene, para	18.0	10.9

\* From Perry, J. H., "Chemical Engineers' Handbook," 3d ed., McGraw-Hill Book Company, Inc., New York, 1962.



Gambar 9.6. *Konduktivitas termal cairan hidrocarbon*

7. a. Dari Gambar 9.2. didapat hubungan antara bilangan Reynold dengan  $j_H$ , diperoleh  $j_H = 93$ .

8. a. Pada  $T_c = 280$  °F diperoleh:

$$c = 0,59 \text{ Btu} / (\text{lb}) (\text{°F}) \quad (\text{lihat Gambar 9.4})$$

$$k = 0,9765 \text{ Btu} / (\text{hr}) (\text{ft}^2) (\text{°F/ft}) \quad (\text{lihat Gambar 9.6})$$

$$(c \cdot \mu / k)^{1/3} = (0.59 \times 0.97 / 0,0765)^{1/3} = 1.95$$

9. a. Koefisien perpindahan panas.

$$h_o = j_H \cdot k / D_e \cdot (c \cdot \mu / k)^{1/3} \cdot \phi_o$$

$$h_o$$

$$= 93 \times (0.0765 / 0.0825) \times 1.25 = 169$$

$$\phi_o$$

10. a. Temperatur dinding tube.

$$t_w = t_c + \frac{h_o / \phi_o}{\frac{h_{io} / \phi_t + h_o / \phi_o}{169}} (T_c - t_c)$$

$$= 129 \frac{(280 - 129)}{(109 + 169)}$$

$$t_w = 221 \text{ °F}$$

Setelah diperoleh hasil perhitungan temperatur dinding tube dengan perhitungan (10 a) maka selanjutnya diteruskan dengan menghitung sebelah tube.



11. Dari perhitungan (10 a) diperoleh suhu dinding tube = 221°F, pada suhu itu diperoleh besarnya  $\mu_w = 1,5 \times 2,42 = 3,63 \text{ lb / (ft)(hr)}$ .  
Lihat Gambar 9.5.

Selanjutnya:

$$\phi_t = (\mu / \mu_w)^{0,14} = (8,7 / 3,63)^{0,14} = 1,11$$

- a. Pada suhu  $t_w = 221 \text{ °F}$  dengan mempergunakan Gambar 9.5 diperoleh besarnya  $\mu_w = 0,56 \times 2,42 = 1,36 \text{ lb / (ft). (hr)}$ .

Selanjutnya:

$$\begin{aligned} \phi_s &= (\mu / \mu_w)^{0,14} \\ &= (0,97 / 1,36)^{0,14} = 0,96 \end{aligned} \quad \text{(Gambar 9.3)}$$

12. Koefisien perpindahan panas yang dikoreksi, yaitu:

$$h_{i_o} = \frac{h_{i_o}}{\phi_t} \cdot \phi_t$$

$$h_{i_o} = 109 \times 1,11 = 121 \text{ Btu / (hr) (ft}^2\text{) (°F)}$$

Selanjutnya dihitung lagi pada shell, yaitu:

11. a. Pada suhu  $t_w = 221 \text{ °F}$ , dengan mempergunakan Gambar 9.5, diperoleh besarnya  $\mu_w = 0,56 \times 2,42 = 1,36 \text{ lb / (ft) (hr)}$ .

Selanjutnya:

$$\phi_t = (\mu / \mu_w)^{0,14} = (0,97 / 1,36)^{0,14}$$

$$\phi_t = 0,96 \quad \text{(Gambar 9.3)}$$

12. a. Koefisien perpindahan panas yang dikoreksi:

$$h_o = \frac{h_o}{\phi_s} \cdot \phi_s$$

$$h_o = 169 \times 0,96 = 162 \text{ Btu / (hr) . (ft}^2\text{) . (°F)}$$

13. a. Koefisien perpindahan panas keseluruhan untuk permukaan yang bersih,

$$\begin{aligned} U_c &= h_{i_o} \cdot h_o / (h_{i_o} + h_o) \\ &= (121 \times 162) / (121 + 162) \end{aligned}$$

$$U_c = 69,3 \text{ Btu / (hr) (ft}^2\text{) (°F)}$$

14. Perhitungan koefisien perpindahan panas keseluruhan untuk perencanaan =  $U_D$  dilakukan sebagai berikut:

$$a'' = 0,2618 \text{ ft}^2 / \text{ft panjang} \quad \text{(lihat dari Tabel 9.1)}$$

$$A = 158 \times 16' \times 0,2618 = 662 \text{ ft}^2$$

(luas permukaan panas total)

$$U_D = Q / (A \cdot \Delta t) = 5.100.000 / (662 \times 138)$$

$$U_D = 55,8 \text{ Btu / (hr) (ft}^2\text{) (°F)}$$

15. Faktor pengotoran  $R_d$  dihitung dengan:

$$R_D = (U_c - U_D) / (U_c \cdot U_D) \text{ Lihat (9.22)}$$

$$= (69,3 - 55,8) / (69,2 \times 55,8)$$

$$R_D = 0,00348 \text{ (hr) (ft}^2 \text{) (}^\circ\text{F) / Btu.}$$

Selanjutnya akan dihitung penurunan tekanan (*pressure drop*) pada sisi sebelah shell dan tube.

### Perhitungan Pada Sisi Sebelah Tube

- Untuk bilangan Reynold  $R_{e_t} = 8.220$  (lihat hasil perhitungan butir 6 di atas).

$$\text{Koefisien gesekan } f = 0,000285 \text{ ft}^2 / \text{in}^2 \quad (\text{Gambar 8.20})$$

$$\text{Spesifikgravity } s = 0,83 \quad (\text{Gambar 9.7})$$

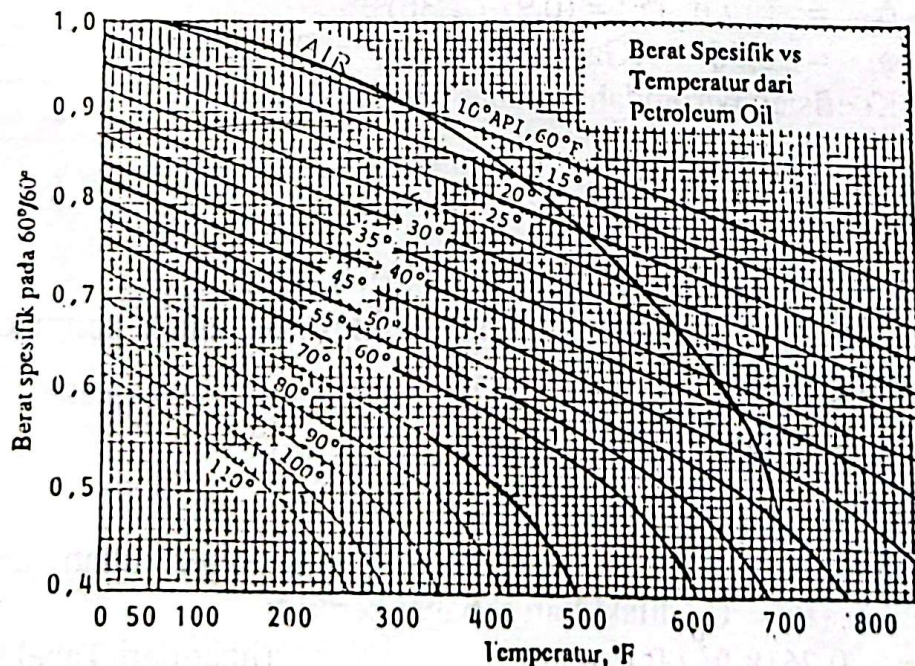
- Penurunan tekanan sebelah tube:

$$f \cdot G_t^2 \cdot L \cdot n$$

$$\Delta P_t = \frac{\quad}{5,22 \times 10^{10} \cdot D \cdot s \cdot \phi_t} \text{ psi}$$

$$0,000285 \times 1.060.000^2 \times 16 \times 4$$

$$\Delta P_t = \frac{\quad}{5,22 \times 10^{10} \times 0,0675 \times 0,83 \times 1,11} = 6,3 \text{ psi}$$



Gambar 9.7. Spesifik gravity dari hidrocarbon

- Diketahui bahwa kecepatan massa  $G_t = 1.060.000$   
Maka dengan mempergunakan Gambar 8.21, diperoleh besarnya head kecepatan (*velocity head*)  $V^2/2g'$

11. Dari perhitungan (10 a) diperoleh suhu dinding tube = 221°F, pada suhu itu diperoleh besarnya  $\mu_w = 1,5 \times 2,42 = 3,63 \text{ lb / (ft)(hr)}$ .  
Lihat Gambar 9.5.

Selanjutnya:

$$\phi_t = (\mu / \mu_w)^{0,14} = (8,7 / 3,63)^{0,14} = 1,11$$

- a. Pada suhu  $t_w = 221 \text{ °F}$  dengan mempergunakan Gambar 9.5 diperoleh besarnya  $\mu_w = 0,56 \times 2,42 = 1,36 \text{ lb / (ft). (hr)}$ .

Selanjutnya:

$$\begin{aligned} \phi_s &= (\mu / \mu_w)^{0,14} \\ &= (0,97 / 1,36)^{0,14} = 0,96 \end{aligned} \quad \text{(Gambar 9.3)}$$

12. Koefisien perpindahan panas yang dikoreksi, yaitu:

$$h_{io} = \frac{h_{io}}{\phi_t} \cdot \phi_t$$

$$h_{io} = 109 \times 1,11 = 121 \text{ Btu / (hr) (ft}^2\text{) (°F)}$$

Selanjutnya dihitung lagi pada shell, yaitu:

11. a. Pada suhu  $t_w = 221 \text{ °F}$ , dengan mempergunakan Gambar 9.5, diperoleh besarnya  $\mu_w = 0,56 \times 2,42 = 1,36 \text{ lb / (ft) (hr)}$ .

Selanjutnya:

$$\phi_t = (\mu / \mu_w)^{0,14} = (0,97 / 1,36)^{0,14}$$

$$\phi_t = 0,96 \quad \text{(Gambar 9.3)}$$

12. a. Koefisien perpindahan panas yang dikoreksi:

$$h_o = \frac{h_o}{\phi_s} \cdot \phi_s$$

$$h_o = 169 \times 0,96 = 162 \text{ Btu / (hr) . (ft}^2\text{) . (°F)}$$

13. a. Koefisien perpindahan panas keseluruhan untuk permukaan yang bersih,

$$U_c = h_{io} \cdot h_o / (h_{io} + h_o)$$

$$= (121 \times 162) / (121 + 162)$$

$$U_c = 69,3 \text{ Btu / (hr) (ft}^2\text{) (°F)}$$

14. Perhitungan koefisien perpindahan panas keseluruhan untuk perencanaan =  $U_D$  dilakukan sebagai berikut:

$$a'' = 0,2618 \text{ ft}^2 / \text{ft panjang} \quad \text{(lihat dari Tabel 9.1)}$$

$$A = 158 \times 16' \times 0,2618 = 662 \text{ ft}^2$$

(luas permukaan panas total)

$$U_D = Q / (A \cdot \Delta t) = 5.100.000 / (662 \times 138)$$

$$U_D = 55,8 \text{ Btu / (hr) (ft}^2\text{) (°F)}$$

15. Faktor pengotoran  $R_d$  dihitung dengan:

$$R_D = (U_c - U_D) / (U_c \cdot U_D) \text{ Lihat (9.22)}$$

$$= (69,3 - 55,8) / (69,2 \times 55,8)$$

$$R_D = 0,00348 \text{ (hr) (ft}^2 \text{) (}^\circ\text{F) / Btu.}$$

Selanjutnya akan dihitung penurunan tekanan (*pressure drop*) pada sisi sebelah shell dan tube.

**Perhitungan Pada Sisi Sebelah Tube**

1. Untuk bilangan Reynold  $R_{e_t} = 8.220$  (lihat hasil perhitungan butir 6 di atas).

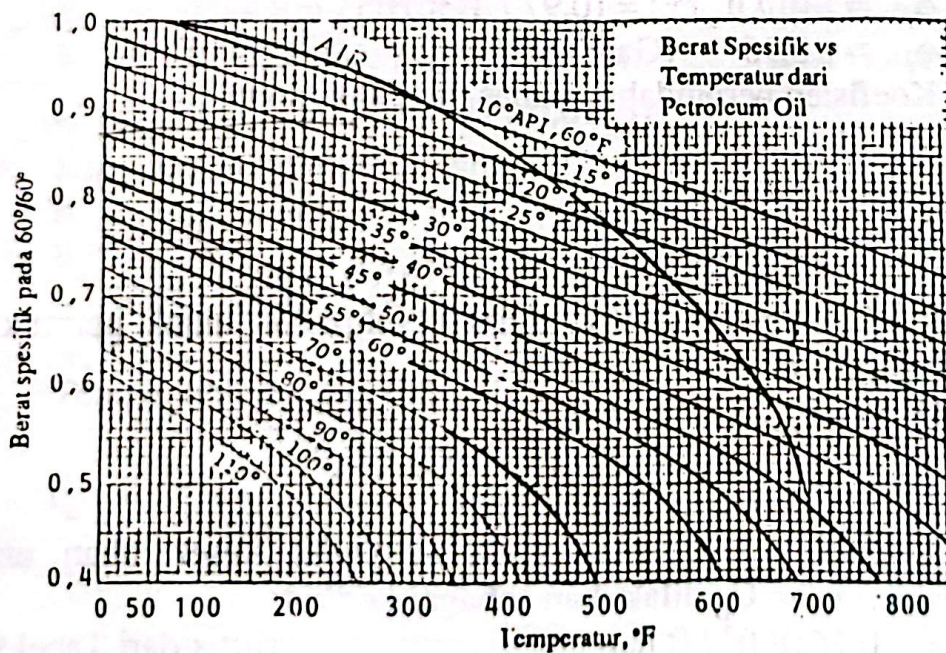
Koefisien gesekan  $f = 0.000285 \text{ ft}^2 / \text{in}^2$  (Gambar 8.20)

Spesifik gravity  $s = 0,83$  (Gambar 9.7)

2. Penurunan tekanan sebelah tube:

$$\Delta P_t = \frac{f \cdot G_t^2 \cdot L \cdot n}{5,22 \times 10^{10} \cdot D \cdot s \cdot \phi_t} \text{ psi}$$

$$\Delta P_t = \frac{0.000285 \times 1.060.000^2 \times 16 \times 4}{5,22 \times 10^{10} \times 0,0675 \times 0,83 \times 1.11} = 6,3 \text{ psi}$$



**Gambar 9.7. Spesifik gravity dari hidrocarbon**

3. Diketahui bahwa kecepatan massa  $G_t = 1.060.000$   
Maka dengan mempergunakan Gambar 8.21, diperoleh besarnya head kecepatan (velocity head)  $V^2/2g'$

$$V^2 / 2g' = 0,15$$

Penurunan tekanan pada return  $P_r$

$$\Delta P_r = \frac{4n}{2} \frac{V^2}{2g}$$

$$\Delta P_r = (4 \times 4/0,83) \times 0,15 = 2,9 \text{ psi}$$

4. Penurunan total pada sisi tube =  $\Delta P_T$

$$\Delta P_T = \Delta P_t + \Delta P_r$$

$$\Delta P_T = 6,3 + 2,9 = 9,2 \text{ psi}$$

Besarnya penurunan tekanan yang diperbolehkan = 10 psi, masih lebih besar dari perhitungan yang diperoleh. Maka dari segi penurunan tekanan pada sisi tube, penukar kalor itu layak untuk dipergunakan.

### **Perhitungan Penurunan Tekanan Pada Sisi Sebelah Shell**

1a. Untuk  $Re_s = 25.300$

Maka didapat:  $f = 0,00175 \text{ ft}^2/\text{inci}^2$  (Gambar 8.22)

Spesifik gravity  $s = 0,73$  (Gambar 9.7)

$$D_s = 21,25/12 = 1,77 \text{ ft}$$

2.a Jumlah dari lintasan yang melintang,  $N + 1 = 12 L/B$

$$N + 1 = 12 \times 16/5 = 39$$

3a. Penurunan tekanan pada sisi shell.

$$\begin{aligned} \Delta P_s &= \frac{f \cdot G_s^2 \cdot D_s \cdot (N+1)}{5,22 \times 10^{10} D_s \cdot s \cdot \phi_s} \\ &= \frac{0,00175 \times 297.000^2 \times 1,77 \times 39}{5,22 \times 10^{10} \times 0,0825 \times 0,96} \\ &= 3,5 \text{ psi} \end{aligned}$$

Besarnya penurunan tekanan yang diperbolehkan 10 psi, apabila dibandingkan dengan hasil perhitungan  $P_s = 3,5 \text{ psi}$ , maka penurunan tekanan yang terjadi jauh lebih kecil.

Hal ini berarti alat penukar kalor itu layak dipergunakan.

### **Kesimpulan**

1. Dari segi faktor pengotoran di mana  $r_d$  yang diperoleh dari perhitungan sebesar 0,00348 dan batas yang diperbolehkan. Namun karena faktor pengotoran itu berbeda kecil sekali, maka pada dasarnya alat penukar kalor itu dapat dipergunakan. Tetapi dalam pemeliharaan dilapangan, supaya betul-betul diperhatikan periode pembersihan tube.

2. Dari segi penurunan tekanan pada sisi shell dan tube, hasil perhitungan lebih kecil dari yang diizinkan, yaitu  $\Delta P_s = 3,5$  psi dan  $\Delta P_T = 9,2$  psi terhadap  $\Delta P_T$  yang diizinkan 10 psi. Hal ini berarti alat penukar kalor itu dapat dipergunakan dengan baik.

II. TEMPERATUR OPTIMAL AIR YANG KELUARDARI PENUKAR KALOR  
 Apabila dibicarakan mengenai temperatur optimal air yang ke luar dari penukar kalor, maka permasalahan yang timbul adalah menentukan keadaan optimal di antara dua kondisi berikut:

1. Menggunakan air pendingin yang besar jumlahnya tetapi permukaan pendinginan kecil, atau
2. Menggunakan air pendingin sedikit jumlahnya, tetapi permukaan yang mendinginkan besar.

Dengan mempergunakan air sebagai media pendingin, di mana dapat diperoleh jumlah air yang besar, tetapi range dari temperaturnya kecil atau sebaliknya. Hal ini mempengaruhi besarnya LMTD. Apabila diperoleh LMTD yang besar, maka konstruksi bisa lebih kecil, sehingga didapat beberapa keuntungan: (a). mengurangi investasi dan biaya tetap, (b). biaya penyusutan dan biaya pemeliharaan lebih kecil, tetapi sebaliknya biaya operasi naik, sebab membutuhkan banyak air.

Kalau  $C_T$  merupakan biaya tahunan tetap, yang diformulasikan sebagai:

$$C_T = (\text{biaya air/lb}) \cdot (1\text{b/hr}) \cdot (\text{Jumlah jam per tahun}) + (\text{biaya tetap yang dibebankan per tahun/ft}^2) \cdot (\text{ft}^2)$$

$$C_T = \frac{Q \cdot \phi \cdot C_w}{C \cdot (t - t_1)} + \frac{C_F \cdot Q}{U \cdot \text{LMTD}} \quad (9.28)$$

$$\text{LMTD} = \frac{\Delta t_2 - \Delta t_1}{\ln (\Delta t_2 / \Delta t_1)}$$

di mana:

$\phi$  = jumlah jam operasi per tahun

$C_w$  = biaya air / lb

$C_F$  = Biaya tetap yang dibebankan per tahun/ft<sup>2</sup>

Kalau LMTD tersebut disubstitusikan ke  $C_T$  didapat:

$$C_T = \frac{Q \cdot \phi \cdot C_w}{C (t_2 - t_1)} + \frac{C_F \cdot Q}{U \left[ \frac{T_1 - t_2 - \Delta t_1}{\ln (T_1 - t_2) / \Delta t_1} \right]} \quad (9.29)$$