

MODUL KE – 3
ALAT PENUKAR KALOR (2 SKS)

Pokok Bahasan
APK PIPA GANDA

3. 1. Tube Pada APK

Tube dapat dikatakan sebagai urat nadi APK. Didalam dan diluar tube mengalir fluida. Kedua jenis fluida itu mempunyai kapasitas, temperatur, tekanan, density, serta jenis yang berbeda. Kedua ujung dari Tube diikat pada Tube Sheet, dengan tujuan untuk mencegah bocoran fluida yang mengakibatkan fluida berkontaminasi. Khusus untuk penukar kalor dengan Tube U, tubenya dibengkokkan sesuai dengan jari-jari lengkungan yang diizinkan. Untuk mempertahankan posisi tube dan mencegah terjadinya getaran, maka tube itu ditahan (support) dengan sekat atau baffle. Jadi sekat berperan ganda, sebagai penahan tube dan pembelok arah aliran fluida. Tube juga harus mampu memindahkan panas diantara fluida dalam tube dengan diluar tube.

Beberapa persyaratan yang harus dipenuhi oleh tube sebagai bagian APK :

1. Kemampuan memindahkan panas yang tinggi,
2. Daya tahan terhadap korosi,
3. Daya tahan terhadap erosi,
4. Daya tahan terhadap panas.

Jenis bahan yang dipergunakan untuk tube, antara lain :

- Baja karbon
- Baja campuran rendah dan baja campuran tinggi
- Baja nikel dan campuran nikel
- Aluminium dan campuran aluminium
- Tembaga dan campuran tembaga, dll.

Pemilihan jenis bahan dan ukuran tube didasarkan pada :

- Besarnya aliran fluida
- Temperatur
- Tekanan
- Korosive atau tidak
- stem serta periode pemeliharaan
- Fouling atau tidak.

3. 2. DIMENSI TUBE

Tube dari diameter $\frac{3}{4}$ inch sampai 2 inch sering dipergunakan, untuk ukuran yang lebih kecil dari $\frac{3}{4}$ inch sampai 1 inch, akan menghasilkan konstruksi yang lebih kompak dan lebih murah. Alat penukar kalor berbentuk paket (package exchanger), seperti pesawat pendingin, sering dipergunakan tube berukuran $\frac{3}{4}$ inch sampai $\frac{1}{2}$ inch. Tube untuk dapur pengolahan minyak mempunyai ukuran diameter yang lebih besar, biasanya antara $3 \frac{1}{2}$ inch sampai sampai 4 inch atau lebih. Untuk menentukan tebal Tube dinyatakan dalam BWG. Semakin besar

angka BWG maka Tube semakin tipis. Misalnya BWG 12 lebih tebal dari BWG 18.

Apabila pembersihan bagian dalam tube dengan cara mekanik (mechanical cleaning) maka tube yang lebih besar diameternya lebih menguntungkan. Hal lain yang perlu dipertimbangkan untuk memilih Tube adalah panjangnya. Tidak banyak variasi ukuran panjang Tube yang tersedia dipasang. Standar ukuran panjang tube antara lain 6 ft, 8 ft, 12 ft, dan 16 ft. Untuk luas permukaan tertentu, jika dipergunakan Tube yang panjang, akan diperoleh konstruksi penukar kalor yang kecil (diameter kecil), hal ini akan menurunkan biaya penukar kalor, apalagi untuk Shell bertekanan tinggi. Sebaiknya dalam merencanakan penukar kalor yang baru, harus dipertimbangkan ukuran tube yang sudah ada, sebab dengan mempergunakan tube yang sama, akan mengurangi jumlah, jenis dan ukuran cadangan untuk pemeliharaan. Sebagai petunjuk, ukuran tube $\frac{3}{4}$ inch (19 mm) adalah diameter tube yang sering digunakan sebagai perhitungan awal.

Beberapa tabel telah diperlihatkan ukuran Tube yang direkomendasikan untuk APK, antara lain tabel 3.1 berikut :

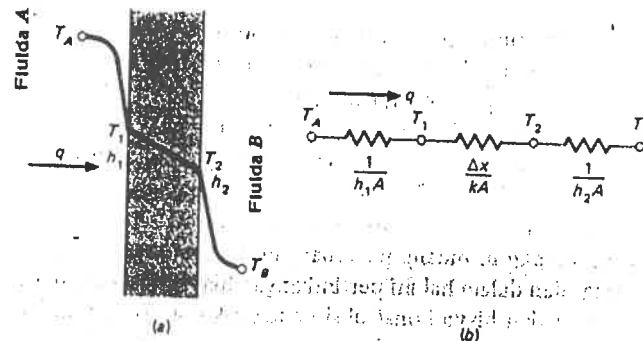
Tabel 2.1 Data untuk tube penukar kalor

Tube OD, in.	BWG	Wall thickness, in.	ID, in.	Flow area per tube, in. ²	Surface per lin. ft, ft ²		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	0,1309	0,0874	0,403
	16	0,065	0,370	0,1076	0,1309	0,0969	0,329
	18	0,049	0,402	0,127	0,1309	0,1052	0,258
	20	0,035	0,430	0,145	0,1309	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	0,1963	0,1335	0,884
	12	0,109	0,532	0,223	0,1963	0,1393	0,817
	13	0,095	0,560	0,247	0,1963	0,1466	0,727
	14	0,083	0,584	0,268	0,1963	0,1529	0,647
	15	0,072	0,606	0,289	0,1963	0,1587	0,571
	16	0,065	0,620	0,302	0,1963	0,1623	0,520
	17	0,058	0,634	0,314	0,1963	0,1660	0,469
	18	0,049	0,652	0,334	0,1963	0,1707	0,401
	1	8	0,165	0,670	0,335	0,2618	0,1754
9		0,148	0,704	0,389	0,2618	0,1843	1,47
10		0,134	0,732	0,421	0,2618	0,1916	1,38
11		0,120	0,760	0,455	0,2618	0,1990	1,23
12		0,109	0,782	0,479	0,2618	0,2048	1,14
13		0,095	0,810	0,515	0,2618	0,2121	1,00
14		0,083	0,834	0,546	0,2618	0,2183	0,890
15		0,072	0,856	0,576	0,2618	0,2241	0,781
16		0,065	0,870	0,594	0,2618	0,2277	0,710
17		0,058	0,884	0,613	0,2618	0,2314	0,639
1 1/4	8	0,165	0,920	0,665	0,3271	0,2409	2,09
	9	0,148	0,954	0,714	0,3271	0,2498	1,91
	10	0,134	0,982	0,757	0,3271	0,2572	1,75
	11	0,120	1,01	0,800	0,3271	0,2644	1,58
	12	0,109	1,03	0,836	0,3271	0,2701	1,45

Lanjutan Tabel 2.1

Tube OD, in.	BWG	Wall thickness, in.	ID, in.	Flow area per tube, in. ²	Surface per lin. ft, ft ²		Weight per lin. ft, lb steel
					Outside	Inside	
1 1/2	13	0,095	1,06	0,884	0,3271	0,2775	1,28
	14	0,083	1,08	0,923	0,3271	0,2839	1,13
	15	0,072	1,11	0,960	0,3271	0,2896	0,991
	16	0,065	1,12	0,985	0,3271	0,2932	0,900
	17	0,058	1,13	1,01	0,3271	0,2969	0,808
	18	0,049	1,15	1,04	0,3271	0,3015	0,688
	8	0,165	1,17	1,075	0,3925	0,3063	2,57
	9	0,148	1,20	1,14	0,3925	0,3152	2,34
	10	0,134	1,23	1,19	0,3925	0,3225	2,14
	11	0,120	1,26	1,25	0,3925	0,3299	1,98
	12	0,109	1,28	1,29	0,3925	0,3356	1,77
	13	0,095	1,31	1,35	0,3925	0,3430	1,56
	14	0,083	1,33	1,40	0,3925	0,3492	1,37
	15	0,072	1,36	1,44	0,3925	0,3555	1,20
	16	0,065	1,37	1,47	0,3925	0,3587	1,09
	17	0,058	1,38	1,50	0,3925	0,3623	0,978
	18	0,049	1,40	1,54	0,3925	0,3670	0,831

3.3. KOEF. PERP. KALOR MENYELURUH LURUH



Gambar 3.1 Perpindahan kalor menyeluruh melalui dinding bidang datar

Sebagaimana yang telah dijelaskan pada Modul Kuliah Perp. Panas Dasar (Perhatikan dinding datar seperti gambar 3.1 di atas), dimana pada satu sisi terdapat fluida panas A, dan pada sisi lainnya fluida B yang lebih dingin. Perpindahan kalor dinyatakan oleh :

$$q = h_1 A (T_A - T_1) = \frac{kA}{\Delta x} (T_1 - T_2) = h_2 A (T_2 - T_B) \quad (3.1)$$

Proses perpindahan kalor dapat dinyatakan dengan jaringan sebagaimana gambar 3.1.b. perpindahan kalor

menyeluruh dihitung dengan jalan membagi beda suhu menyeluruh dengan jumlah tahanan thermal, yakni :

$$q = \frac{T_A - T_b}{1/h_1 A + \Delta x/k A + 1/h_2 A} \dots (3.2)$$

Perhatikan bahwa nilai $1/h A$ digunakan disini untuk menunjukkan tahanan konveksi . aliran kalor menyeluruh sebagai hasil gabungan proses konduksi dan konveksi bisa dinyatakan dengan koefisien perpindahan kalor menyeluruh U , yang dirumuskan dalam hubungan :

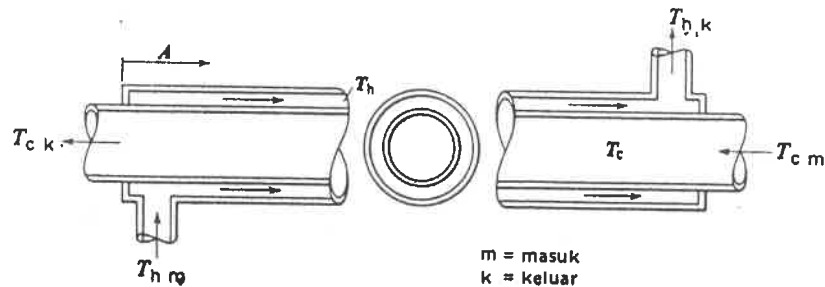
$$q = U A \Delta T_{\text{menyeluruh}} \dots (3.3)$$

Dimana A adalah luas bidang aliran kalor, dengan demikian koefisien perpindahan kalor menyeluruh, adalah :

$$U = \frac{1}{1/h_1 + \Delta x/k + 1/h_2} \dots (3.4)$$

Untuk selinder bolong yang terkena lingkungan konveksi dipermukaan bagian dalam dan luarnya, analogi tahanan listriknya adalah seperti gambar 3.2 berikut, dimana disinipun T_A dan T_B adalah suhu kedua fluida. Perhatikan bahwa dalam hal

ini luas bidang konveksi tidak sama untuk kedua fluida. Luas fluida bergantung dari diameter dalam tabung dan tebal dinding.



Gambar 3.2 Diagram sebuah penukar panas aliran-lawan pipa-didalam-pipa yang sederhana.

Dalam hal ini, perpindahan kalor menyeluruh dapat dinyatakan melalui persamaan berikut :

$$q = \frac{T_A - T_B}{1/h_i A_i + \ln(r_o/r_i)/2\pi k L + 1/h_o A_o} \quad \dots \dots \dots (3.5)$$

Sesuai dengan jaringan thermal sesuai yang ditunjukkan pada gambar 3, besaran A_i dan A_o merupakan luas permukaan luar dan dalam. Koefisien perpindahan kalor menyeluruh dapat didasarkan atas bidang dalam atau luar tabung. Sehingga diperoleh persamaan berikut :

$$U_o = \frac{1}{A_o/A_i * 1/h_i + A_o \ln(r_o/r_i)/2\pi kL + 1/h_o}$$

$$U_i = \frac{1}{1/h_i + A_i \ln(r_o/r_i)/2\pi kL + A_i/A_o * 1/h_i}$$

..... (3.6)

3.4. BEDA SUHU RATA-RATA LOG (LMTD)

Perhatikan APK pipa ganda sebagaimana gambar sebelumnya, fluidanya dapat mengalir dalam aliran sejajar maupun aliran lawan arah, dan profil suhu untuk kedua kasus itu ditunjukkan pada gambar 3.3. berikut. Kita hendak menghitung perpindahan kalor dalam susunan pipa ganda ini yakni dengan,

$$q = U A \Delta T_m \dots \dots \dots (3.6A)$$

dimana :

U = koef. Perp. kalor meny.

A = luas permukaan perpindahan kalor

ΔT_m = beda suhu rata-rata

Pemeriksaan pada gambar 3.3 menunjukkan bahwa beda suhu antara fluida panas dan fluida dingin pada waktu masuk dan pada waktu keluar tidaklah sama, dan kita perlu menentukan nilai rata-rata untuk digunakan dalam persamaan diatas. Untuk

penukar kalor *aliran sejajar* seperti pada gambar 3.3., kalor yang dipindahkan melalui unsur luas dA dapat dituliskan sebagai :

$$dq = -mh \cdot ch \cdot dTh = mc \cdot cc \cdot dTc \dots (3.7)$$

perpindahan kalor dapat pula dinyatakan sebagai :

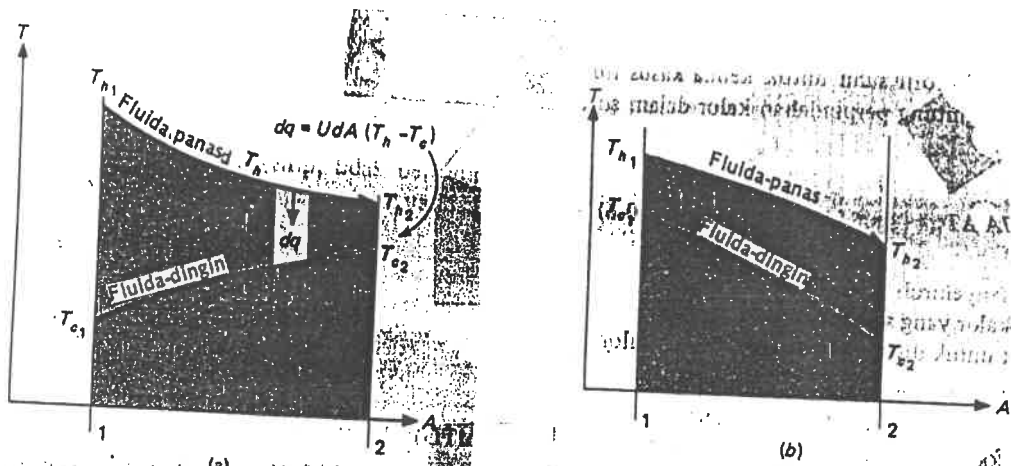
$$dq = U (Th - Tc) dA \dots (3.8)$$

dari persamaan ~~10.5~~, diperoleh :

$$dTh = (-dq) / (mh \cdot ch) \dots (3.9)$$

$$dTc = (dq) / (mc \cdot cc) \dots (3.10)$$

perhatikan gambar 3.3 tentang profil suhu aliran sejajar dan aliran lawan arah dalam penukar kalor pipa ganda berikut :



Gambar 3.3 Profil suhu untuk aliran-sejajar dan aliran-lawan-arah dalam penukar-kalor pipa-ganda.

Jadi :

$$dT_h - dT_c = d(T_h - T_c) = -dq \left[\frac{1}{m_h \cdot c_h} + \frac{1}{m_c \cdot c_c} \right] \dots (3.11)$$

jika dq diselesaikan dari persamaan 3.8 dan disulihkan ke pers. 3.11, maka akan didapat pers. :

$$\left[\frac{d(T_h - T_c)}{(T_h - T_c)} \right] = -U \left\{ \frac{1}{m_h \cdot c_h} + \frac{1}{m_c \cdot c_c} \right\} dA \dots (3.12)$$

persamaan diferensial ini dapat diintegrasikan antara kondisi satu dan kondisi dua seperti pada gambar 3.3 yang menghasilkan pers.:

$$\ln \left[\frac{(T_{h2} - T_{c2})}{(T_{h1} - T_{c1})} \right] = -U A \left[\left(\frac{1}{m_h \cdot c_h} \right) + \left(\frac{1}{m_c \cdot c_c} \right) \right] \dots (3.13)$$

kembali ke persamaan 3.7, hasil kali $(m_c \cdot c_c)$ dan $(m_h \cdot c_h)$ dapat dinyatakan dalam perp. kalor total (q) dan beda suhu menyeluruh antara fluida panas dan fluida dingin. Jadi :

$$m_h \cdot c_h = \left[\frac{q}{(T_{h1} - T_{h2})} \right] \dots (3.14)$$

$$m_c \cdot c_c = \left[\frac{q}{(T_{c2} - T_{c1})} \right] \dots (3.15)$$

Jika kedua hubungan diatas disulihkan kedalam pers. 3.13 maka :

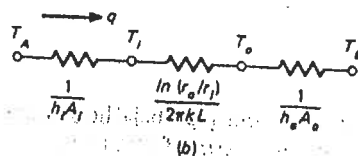
$$q = \frac{UA(Th2 - Tc2) - (Th1 - Tc1)}{\ln[(Th2 - Tc2)/(Th1 - Tc1)]} \dots \dots (3.16)$$

Jika pers. 3.16 kita bandingkan dengan pers. 3.6A terlihat bahwa beda suhu rata-rata merupakan penglompondan suku-suku dalam kurung. Jadi :

$$\Delta T_m = \frac{(Th2 - Tc2) - (Th1 - Tc1)}{\ln[(Th2 - Tc2)/(Th1 - Tc1)]}$$

Beda suhu ini disebut beda suhu rata-rata log (Log mean temperature difference) atau LMTD. Atau beda suhu pada satu ujung APK dikurangi beda suhu pada ujung yang satu lagi dibagi dengan logaritme alamiah dari pada perbandingan kedua beda suhu tersebut.

Dengan demikian, Untuk APK dengan jenis penukar kalor pipa ganda, sebagaimana berikut :



Maka besarnya perpindahan kalor pada susunan pipa ganda, adalah :

$$q = U A \Delta T_m$$

atau

$$q = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

dimana :

U = koef. Perpindahan kalor menyeluruh

A = Luas perpindahan kalor

ΔT_m = beda suhu rata – rata

m = mass flow rate

C_p = kalor spesifik fluida

Untuk menentukam nilai beda suhu rata-rata (ΔT_m), dapat digunakan persamaan berikut, yakni :

$$\Delta T_m = \frac{(Th_2 - Tc_2) - (Th_1 - Tc_1)}{\ln \left[\frac{Th_2 - Tc_2}{Th_1 - Tc_1} \right]}$$

Dimana :

Th_2 = Fluida panas masuk

Tc_2 = Fluida dingin keluar

Th_1 = fluida panas keluar

Tc_1 = fluida dingin masuk

Contoh 3.1 :

Air dengan laju (m) 68 kg/mnt, dipanaskan dari suhu 35 °C hingga 75 °C ($C_w = 4180 \text{ J/kg } ^\circ\text{C}$) dengan minyak yang mempunyai kalor spesifik 1,9 kJ/kg °C. Kedua fluida tersebut dipakai dalam *PENUKAR KALOR PIPA GANDA*, dimana minyak masuk pada suhu 110 °C dan keluar pada suhu 75 °C. Sedangkan Koef. Perpindahan kalor menyeluruh adalah 320 W/m² °C. Hitunglah luas yang diperlukan untuk penukar kalor tersebut.

Jawab

Sesuai persamaan perpindahan kalor bahwa,

$$q = U A \Delta T_m$$

$$\begin{aligned} \text{atau : } q &= \dot{m}_w C_w \Delta T_w = \dot{m}_o C_o \Delta T_o \\ &= (68) (4180) (75-35) \\ &= 11,37 \text{ mJ/mnt} = 189,5 \text{ kW} \\ &= 189.500 \text{ W} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \Delta T_m &= \frac{(110 - 75) - (75 - 35)}{\ln \left[\frac{110 - 75}{75 - 35} \right]} = \frac{35 - 40}{\ln \frac{35}{40}} = \frac{-5}{\ln} \\ &= 37,44 \text{ } ^\circ\text{C} \\ &= \frac{-5}{-0,139} = \end{aligned}$$

Jadi luas yang diperlukan untuk penukar Kalor pada APK tersebut adalah :

$$A = \frac{q}{U \Delta T_m}$$

$$A = \frac{189500 \text{ W}}{(320)(37,44)}$$
$$= 15,82 \text{ m}^2$$

Tugas :

Silahkan para pembaca sendiri yang mencoba membuktikan bahwa persamaan diatas dapat digunakan untuk menghitung LMTD untuk kondisi aliran lawan arah.