

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Proses Perpindahan Kalor

Perpindahan panas merupakan ilmu untuk meramalkan perpindahan energi dalam bentuk panas yang terjadi karena adanya perbedaan suhu di antara benda atau material. Dalam proses perpindahan energi tersebut tentu ada kecepatan perpindahan panas yang terjadi, atau yang lebih dikenal dengan laju perpindahan panas. Maka ilmu perpindahan panas juga merupakan ilmu untuk meramalkan laju perpindahan panas yang terjadi pada kondisi-kondisi tertentu. Perpindahan kalor dapat didefinisikan sebagai suatu proses berpindahny suatu energi (kalor) dari satu daerah ke daerah lain akibat adanya perbedaan temperatur pada daerah tersebut. Ada 3 bentuk mekanisme perpindahan panas yang diketahui, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi.

2.1.1 Perpindahan Kalor secara Konduksi

Perpindahan kalor secara konduksi adalah proses perpindahan kalor dimana kalor mengalir dari daerah yang bertemperatur tinggi ke daerah yang bertemperatur rendah dalam suatu medium (padat, cair atau gas) atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung sehingga terjadi pertukaran energi dan momentum.

Laju perpindahan panas yang terjadi pada perpindahan panas konduksi adalah berbanding dengan gradien suhu normal sesuai dengan persamaan berikut (persamaan dasar konduksi) :

$$q_k = -k A \frac{dT}{dx} \dots\dots\dots(1)$$

Keterangan :

q = Laju Perpindahan Panas (kj/det,W)

k = Konduktifitas Termal (W/m.°C)

A = Luas Penampang (m^2)

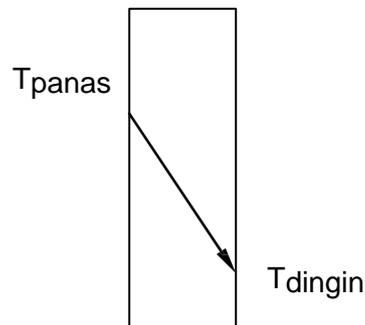
dT = Perbedaan Temperatur (°C,°F)

dX = Perbedaan Jarak (m/det)

ΔT = Perubahan Suhu (°C,°F)

dT/dx = gradient temperatur kearah perpindahan kalor

Konstanta positif "k" disebut konduktifitas atau kehantaran termal benda itu, sedangkan tanda minus disisipkan agar memenuhi hukum kedua termodinamika, yaitu bahwa kalor mengalir ke tempat yang lebih rendah dalam skala temperatur (J.P. Holman, hal: 2).



Gambar 1. Perpindahan Panas Konduksi pada Dinding
(Sumber: J.P. Holman,hal: 33)

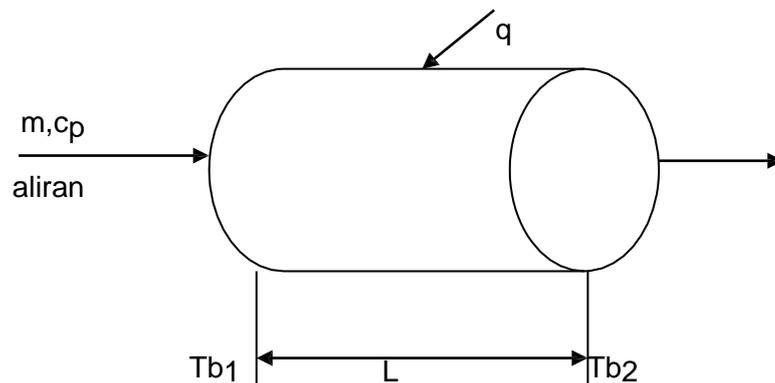
Konduktivitas Termal

Tetapan kesebandingan (k) adalah sifat fisik bahan atau material yang disebut konduktivitas termal. Persamaan di atas merupakan persamaan dasar tentang konduktivitas termal. Berdasarkan rumusan itu maka dapatlah dilaksanakan pengukuran dalam penelitian untuk menentukan konduktifitas termal berbagai bahan. Pada umumnya konduktivitas termal itu sangat

tergantung pada suhu. Konduktivitas termal berbagai bahan pada 0°C tersaji pada tabel 1.

2.1.2 Perpindahan Kalor secara Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas karena adanya gerakan/aliran/pencampuran dari bagian panas ke bagian yang dingin. Contohnya adalah kehilangan panas dari radiator mobil, pendinginan dari secangkir kopi, dll. Menurut cara menggerakkan alirannya, perpindahan panas konveksi diklasifikasikan menjadi dua, yakni konveksi bebas (*free convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*). Bila gerakan fluida disebabkan karena adanya perbedaan kerapatan karena perbedaan suhu, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi bebas (*free/natural convection*). Bila gerakan fluida disebabkan oleh gaya pemaksa/eksitasi dari luar, misalkan dengan pompa atau kipas yang menggerakkan fluida sehingga fluida mengalir di atas permukaan, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi paksa (*forced convection*).



Gambar 2. Perpindahan Panas Konveksi pada Tabung
(Sumber: J.P.Holman, hal.: 252)

Proses pemanasan atau pendinginan fluida yang mengalir di dalam saluran tertutup seperti pada gambar 2 merupakan contoh proses perpindahan panas.

Laju perpindahan panas pada beda suhu tertentu dapat dihitung dengan persamaan berikut ini:

$$q = - h A (T_w - T_\infty) \dots \dots \dots (2)$$

(J.P. Holman, 1994 hal: 11)

Keterangan :

q = Laju perpindahan panas (kj/det atau W)

H = Koefisien perpindahan panas konveksi ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

A = Luas bidang permukaan perpindahan panas (ft^2, m^2)

T_w = Temperatur dinding ($^\circ C, K$)

T_∞ = Temperatur sekeliling ($^\circ C, K$)

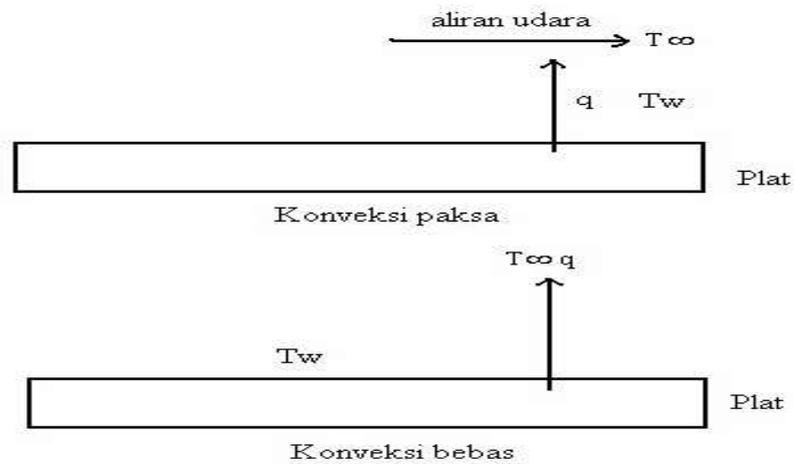
Tanda minus (-) digunakan untuk memenuhi hukum II termodinamika, sedangkan panas yang dipindahkan selalu mempunyai tanda positif (+).

Persamaan tersebut mendefinisikan tahanan panas terhadap konveksi. Koefisien pindah panas permukaan h , bukanlah suatu sifat zat, akan tetapi menyatakan besarnya laju pindah panas di daerah dekat pada permukaan itu.

Tabel 1. Konduktivitas Termal Berbagai Bahan pada 0°C

Bahan	W/m.°C	Btu/h . ft . °F
Logam		
perak (murni)	410	237
tembaga (murni)	385	223
aluminium (murni)	202	117
nikel (murni)	93	54
besi (murni)	73	42
Baja karbon, 1% C	43	25
Timbal (murni)	35	20,3
Baja karbon-nikel (18% cr, 8% ni)	16,3	9,4
Bukan Logam		
Kuarsa (sejajar sumbu)	41,6	24
Magnesit	4,15	2,4
Marmar	2,08-2,94	1,2-1,7
Batu pasir	1,83	1,06
Kaca, jendela	0,78	0,45
Kayu maple atau ek	0,17	0,096
Serbuk gergaji	0,059	0,034
Wol kaca	0,038	0,022
Zat Cair		
Air-raksa	8,21	4,74
Air	0,556	0,327
Amonia	0,540	0,312
Minyak lumas, SAE 50	0,147	0,085
Freon 12, 22FCCI	0,073	0,042
Gas		
Hidrogen	0,175	0,101
Helium	0,141	0,081
Udara	0,024	0,0139
Uap air (jenuh)	0,0206	0,0119
Karbon dioksida	0,0146	0,00844

(J.P.Holman, hal: 7)



Gambar 3. Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan konveksi paksa dalam kenyataannya sering dijumpai, karena dapat meningkatkan efisiensi pemanasan maupun pendinginan suatu fluida dengan fluida yang lain.

2.1.3 Bilangan Reynolds

Transisi dari aliran laminar menjadi turbulen terjadi apabila:

$$\frac{X.U_{\infty}}{\nu} = \frac{\rho.X.U_{\infty}}{\mu} > 5 \times 10^5 \dots\dots\dots(3)$$

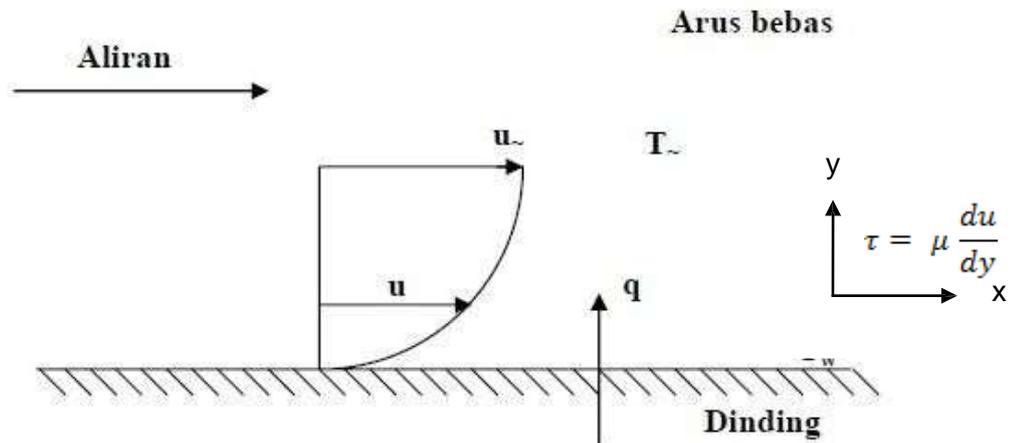
Dimana:

- U_{∞} = kecepatan aliran bebas
- x = jarak dari tepi depan
- ν = μ/ρ = viskositas kinematik

Pengelompokan khas di atas disebut bilangan Reynolds dan angka ini tak berdimensi apabila untuk semua sifat-sifat di atas digunakan perangkat satuan yang konsisten. Rumus perhitungan bilangan Reynolds yaitu:

$$Re_x = \frac{xU_{\infty}}{\nu} \dots\dots\dots(4)$$

Pada konveksi pelat rata akan mendingin lebih cepat dapat dilihat pada gambar berikut ini:



Gambar 4. Perpindahan Kalor secara Konveksi pada Suatu Pelat Rata

Keterangan :

U = Koefisien perpindahan panas ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

U_∞ = Koefisien perpindahan panas menyeluruh ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)

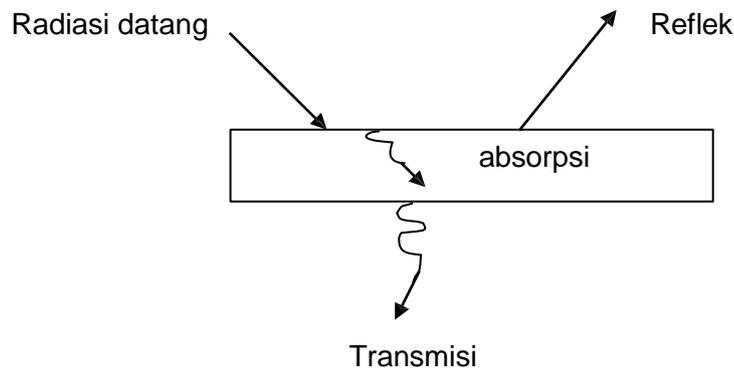
Q = Laju perpindahan panas (kj/det atau W)

T_w = Temperatur dinding ($^\circ C$, K)

T_∞ = Temperatur sekeliling ($^\circ C$, K)

2.1.4 Perpindahan Kalor secara Radiasi

Perpindahan panas radiasi adalah proses di mana panas mengalir dari benda yang bersuhu tinggi ke benda yang bersuhu rendah bila benda-benda itu terpisah di dalam ruang, bahkan jika terdapat ruang hampa di antara benda-benda tersebut.



Gambar 5. Perpindahan Panas Radiasi
(Sumber: J.P.Holman, hal: 343)

Energi radiasi dikeluarkan oleh benda karena temperatur, yang dipindahkan melalui ruang antara, dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Bila energi radiasi menimpa suatu bahan, maka sebagian radiasi dipantulkan, sebagian diserap, dan sebagian diteruskan seperti gambar 5. Sedangkan besarnya energi radiasi ditentukan dari rumus berikut ini:

$$Q_{\text{pancaran}} = \sigma AT^4 \dots \dots \dots (5)$$

dimana: Q_{pancaran} = laju perpindahan panas (W)

σ = konstanta boltzman ($5,669 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

A = luas permukaan benda (m^2)

T = suhu absolut benda ($^{\circ}\text{C}$)

2.2 Alat Penukar Panas (*Heat Exchanger*)

Alat penukar panas (*heat exchanger*) adalah suatu alat yang digunakan untuk memindahkan panas antara dua buah fluida atau lebih yang memiliki perbedaan temperatur yaitu fluida yang bertemperatur tinggi ke fluida yang bertemperatur rendah. Perpindahan panas tersebut baik secara langsung maupun secara tidak langsung. Pada kebanyakan sistem kedua fluida ini tidak mengalami kontak langsung. Kontak langsung alat penukar kalor terjadi sebagai

contoh pada gas kalor yang terfluidisasi dalam cairan dingin untuk meningkatkan temperatur cairan atau mendinginkan gas.

Alat penukar panas banyak digunakan pada berbagai instalasi industri, antara lain pada: *boiler, kondensor, cooler, cooling tower*. Sedangkan pada kendaraan kita dapat menjumpai radiator yang fungsinya pada dasarnya adalah sebagai alat penukar panas.

Tujuan perpindahan panas tersebut di dalam proses industri diantaranya adalah:

- a) Memanaskan atau mendinginkan fluida hingga mencapai temperatur tertentu yang dapat memenuhi persyaratan untuk proses selanjutnya, seperti pemanasan reaktan atau pendinginan produk dan lain-lain.
- b) Mengubah keadaan (fase) fluida: destilasi, evaporasi, kondensasi dan lain-lain.

Proses perpindahan panas tersebut dapat terjadi secara langsung maupun tidak langsung, maksudnya adalah:

- 1) Pada alat penukar kalor yang langsung, fluida yang panas akan bercampur secara langsung dengan fluida dingin (tanpa adanya pemisah) dalam suatu bejana atau ruangan tertentu. Contohnya adalah *clinker cooler* dimana antara *clinker* yang panas dengan udara pendingin berkontak langsung. Contoh yang lain adalah *cooling tower* untuk mendinginkan air pendingin kondenser pada instalasi mesin pendingin sentral atau PLTU, dimana antara air hangat yang didinginkan oleh udara sekitar saling berkontak seperti layaknya air mancur.
- 2) Pada alat penukar kalor yang tidak langsung, fluida panas tidak berhubungan langsung dengan fluida dingin. Jadi proses perpindahan panas itu

mempunyai media perantara, seperti pipa, pelat atau peralatan jenis lainnya. Untuk meningkatkan efektivitas pertukaran energi, biasanya bahan permukaan pemisah dipilih dari bahan-bahan yang memiliki konduktivitas termal yang tinggi seperti tembaga dan aluminium. Contoh dari penukar kalor seperti ini sering kita jumpai antara lain radiator mobil, evaporator AC.

Pertukaran panas secara tidak langsung terdapat dalam beberapa tipe dari penukar kalor diantaranya tipe plat, *shell and tube*, spiral, dll. Pada kebanyakan kasus penukar kalor tipe plat mempunyai efektivitas perpindahan panas yang lebih bagus.

2.3 Klasifikasi Alat Penukar Panas

2.3.1. Klasifikasi Penukar Kalor Berdasarkan Susunan Aliran Fluida

Yang dimaksud dengan susunan aliran fluida di sini adalah berapa kali fluida mengalir sepanjang penukar kalor sejak saat masuk hingga meninggalkannya serta bagaimana arah aliran relatif antara kedua fluida (apakah sejajar/*parallel*, berlawanan arah/*counter* atau bersilangan/*cross*).

a) Pertukaran Panas dengan Aliran Searah (*Co-Current/Parallel Flow*)

Yaitu apabila arah aliran dari kedua fluida di dalam penukar kalor adalah sejajar. Artinya kedua fluida masuk pada sisi yang satu dan keluar dari sisi yang lain mengalir dengan arah yang sama. Karakter penukar panas jenis ini temperatur fluida yang memberikan energi akan selalu lebih tinggi dibanding yang menerima energi sejak mulai memasuki penukar kalor hingga keluar.

$$q = \dot{m}.c.(T_1 - T_2) = \dot{m}.c.(T_4 - T_3) \dots\dots\dots(6)$$

Dimana:

q = laju perpindahan panas (*watt*)

\dot{m} = laju alir massa fluida (*kg/s*)

c = kapasitas kalor spesifik (j/kg°C)

T = suhu fluida (°C)

Dengan asumsi nilai kapasitas kalor spesifik (c_p) fluida dingin dan panas konstan, tidak ada kehilangan panas ke lingkungan serta keadaan *steady state*, maka kalor yang dipindahkan:

$$q = U \cdot A \cdot T_{LMTD} \dots\dots\dots(7)$$

Dimana :

U = koefisien perpindahan panas secara keseluruhan ($Wm^2 \cdot ^\circ C$)

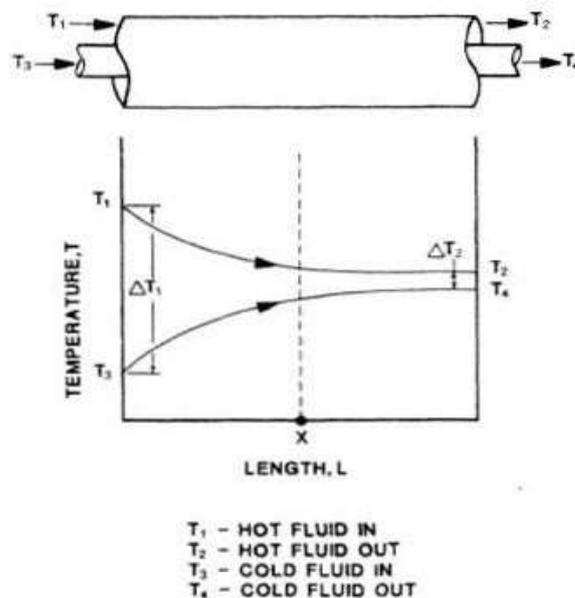
A = luas perpindahan panas (m^2)

Dan juga mempunyai nilai T_{LMTD} sebagai berikut:

$$T_{LMTD} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \dots\dots\dots(8)$$

dimana : $\Delta T_2 = T_2 - T_4$

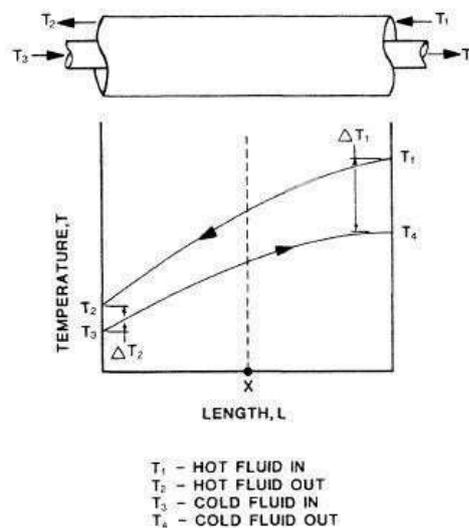
$$\Delta T_1 = T_1 - T_3$$



Gambar 6. Aliran *Parallel Flow* dan Profil Temperatur

b) Pertukaran Panas dengan Aliran Berlawanan Arah (*Counter Current/Flow*)

Yaitu bila kedua fluida mengalir dengan arah yang saling berlawanan dan keluar pada sisi yang berlawanan. Pada tipe ini masih mungkin terjadi bahwa temperatur fluida yang menerima panas (temperatur fluida dingin) saat keluar penukar kalor (T_4) lebih tinggi dibanding temperatur fluida yang memberikan kalor (temperatur fluida panas) saat meninggalkan penukar kalor.



Gambar 7. Aliran *Counter Flow* dan Profil Temperatur

Dari gambar di atas, laju perpindahan panasnya dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$q = \dot{m}_h \cdot c_h \cdot (T_1 - T_2) = \dot{m}_c \cdot c_c \cdot (T_4 - T_3) \dots \dots \dots (9)$$

Dimana:

q = laju perpindahan panas (*watt*)

\dot{m} = laju alir massa fluida (kg/s)

C = kapasitas kalor spesifik (j/kg°C)

T = suhu fluida (°C)

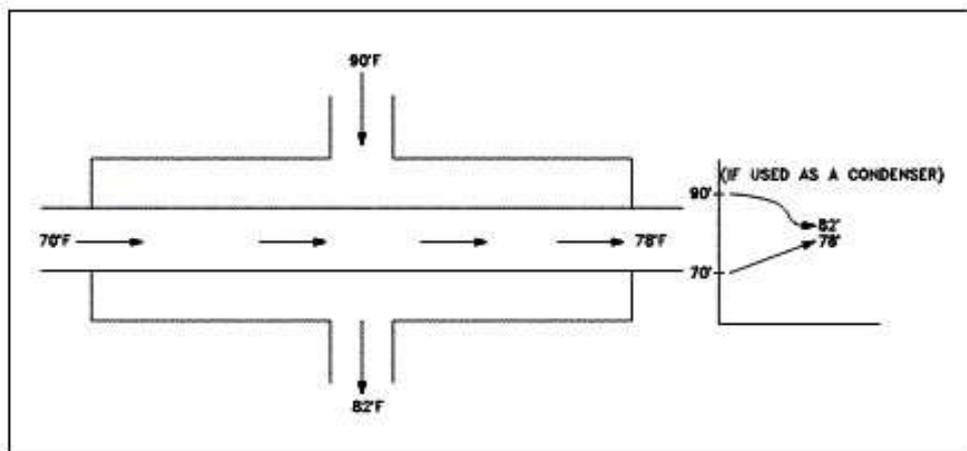
$$T_{LMTD} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \dots\dots\dots(8)$$

dimana : $\Delta T_2 = T_2 - T_4$

$$\Delta T_1 = T_1 - T_3$$

c) Pertukaran Panas dengan Aliran Silang (Cross Flow)

Artinya arah aliran kedua fluida saling bersilangan. Contoh yang sering kita lihat adalah radiator mobil dimana arah aliran air pendingin mesin yang memberikan energinya ke udara saling bersilangan. Apabila ditinjau dari efektivitas pertukaran energi, penukar kalor jenis ini berada diantara kedua jenis di atas. Dalam kasus radiator mobil, udara melewati radiator dengan temperatur rata-rata yang hampir sama dengan temperatur udara lingkungan kemudian memperoleh panas dengan laju yang berbeda di setiap posisi yang berbeda untuk kemudian bercampur lagi setelah meninggalkan radiator sehingga akan mempunyai temperatur yang hampir seragam.



Gambar 8. Aliran *Cross Flow* dan Profil Temperatur

Dan juga mempunyai nilai T_{LMTD} sebagai berikut:

$$T_{LMTD} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \dots\dots\dots(8)$$

dimana : $\Delta T_2 = T_1 - T_4$

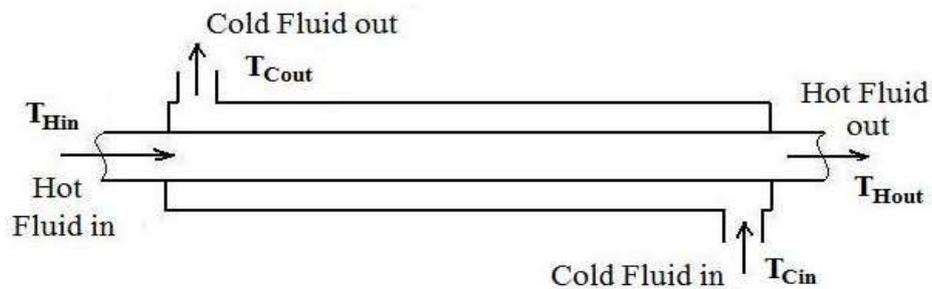
$$\Delta T_1 = T_2 - T_3$$

2.4 Alat Penukar Panas yang Umum Digunakan di Industri

Alat penukar panas yang umum digunakan di industri, yaitu:

1. *Concentric Tube Heat Exchanger (Double Pipe)*

Double pipe heat exchanger atau *consentric tube heat exchanger* yang ditunjukkan pada gambar 9 di mana suatu aliran fluida dalam pipa seperti pada gambar 9 mengalir dari titik A ke titik B, dengan *space* berbentuk U yang mengalir di dalam pipa. Cairan yang mengalir dapat berupa aliran *cocurrent* atau *counter current*. Alat pemanas ini dapat dibuat dari pipa yang panjang dan dihubungkan satu sama lain hingga membentuk U. *Double pipe heat exchanger* merupakan alat yang cocok dikondisikan untuk aliran dengan laju aliran yang kecil.



Gambar 9. Aliran *Double Pipe Heat Exchanger*



Gambar 10. *Hairpin Heat Exchanger*

Exchanger ini menyediakan *true counter current flow* dan cocok untuk *extreme temperature crossing*, tekanan tinggi dan rendah untuk kebutuhan *surface area* yang moderat (*range surface area*: 1 – 6000 ft²). *Hairpin heat exchanger* tersedia dalam:

- a) *Single tube (double pipe)* atau berbagai tabung dalam suatu *hairpin shell (multitube)*
- b) *Bare tubes, finned tube, U-Tubes*
- c) *Straight tubes*
- d) *Fixed tube sheets*

Double pipe heat exchanger sangatlah berguna karena ini bisa digunakan dan dipasang pada *pipe-fitting* dari bagian standar dan menghasilkan luas permukaan panas yang besar. Ukuran standar dari *tees* dan *return head* diberikan pada tabel 2.

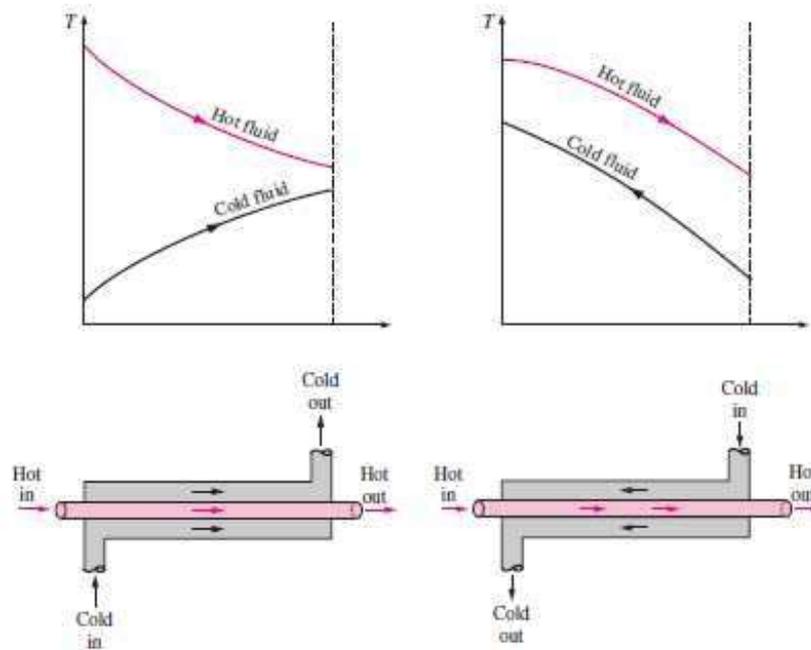
Tabel 2. *Double Pipe Exchanger Fittings*

<i>Outer Pipe, IPS</i>	<i>Inner Pipe, IPS</i>
3	1¼
2½	1¼
3	2
4	3

Double pipe exchangers biasanya dipasang dalam 12 ft, 15 ft atau 20 ft. Panjang efektif dapat membuat jarak dalam *each leg over* di mana terjadi perpindahan panas dan mengeluarkan *inner pipe* yang menonjol melewati *the exchanger section*.

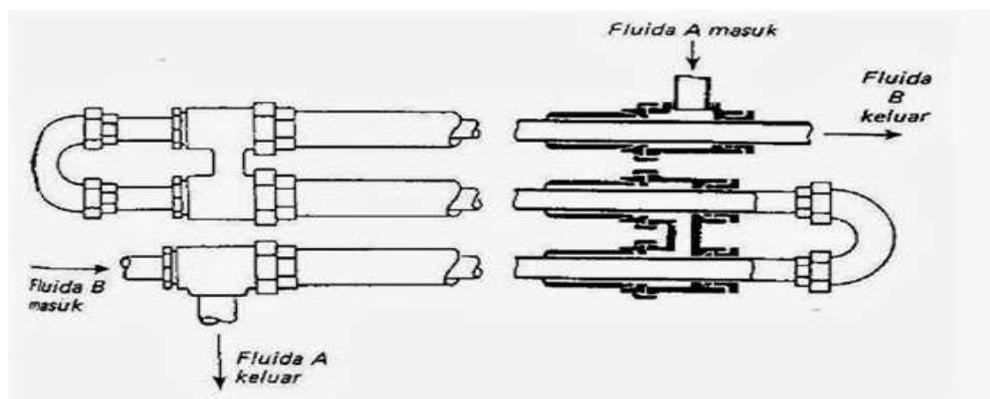
Susunan dari *concentric tube* ditunjukkan pada gambar di bawah ini. Aliran dalam *type heat exchanger* dapat bersifat *cocurrent* atau *counter current*

dimana aliran fluida panas ada pada *inner pipe* dan fluida dingin pada *annulus pipe*.



Gambar 11. *Double Pipe Heat Exchanger* Aliran Cocurrent dan Counter Current

Pada susunan *cocurrent* maka fluida di dalam *tube* sebelah dalam (*inner tubes*) maupun yang di luar *tube* (dalam *annulus*), artinya satu lintasan tanpa cabang. Sedangkan pada aliran *counter current*, di dalam *tube* sebelah dalam dan fluida di dalam *annulus* masing-masing mempunyai cabang seperti terlihat pada gambar 8 dan gambar 9.



Gambar 12. *Double-Pipe Heat Exchangers in Series*



Gambar 13. *Double-Pipe Heat Exchangers in Series–Parallel*

Keuntungan dan kerugian penggunaan *double pipe heat exchanger* yaitu:

a) Keuntungan

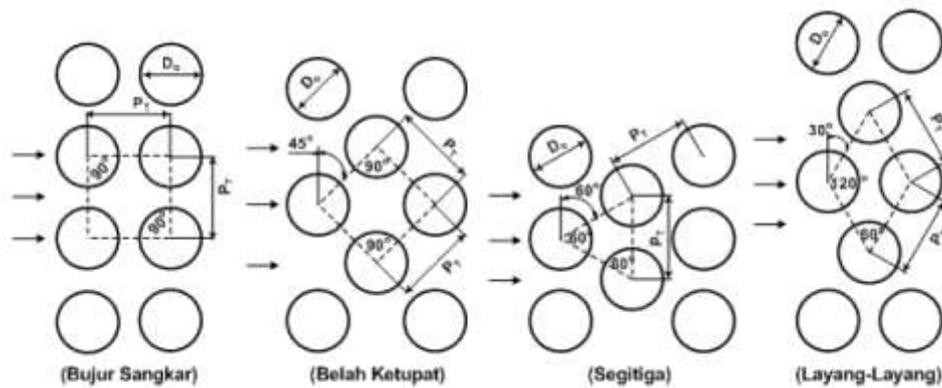
1. Penggunaan *longitudinal tinned tubes* akan mengakibatkan suatu *heat exchanger* untuk *shell sides fluids* yang mempunyai suatu *low heat transfer coefficient*.
2. *Counter current flow* mengakibatkan penurunan kebutuhan *surface area* permukaan untuk *service* yang mempunyai suatu *temperature cross*.
3. Potensi kebutuhan untuk ekspansi *joint* adalah dihapuskan dalam kaitan dengan konstruksi pipa-U.
4. Konstruksi sederhana dalam penggantian tabung dan pembersihan.

b) Kerugian

1. Bagian *hairpin* adalah desain khusus yang mana secara normal tidak dibangun untuk industri standar dimanapun selain *ASME code*.
2. Bagian *multiple hairpin* tidaklah selisih secara ekonomis bersaing dengan *single shell* dan *tube heat exchanger*.
3. Desain penutup memerlukan *gasket* khusus.

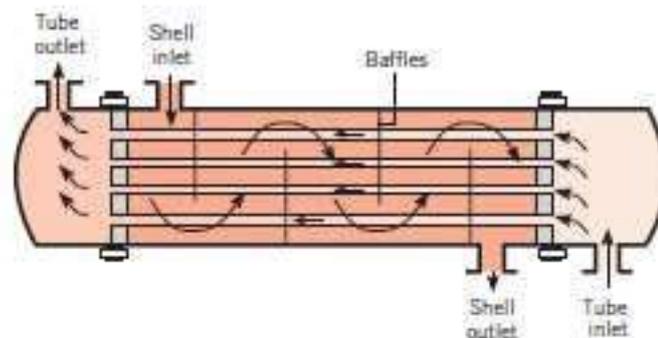
2. Shell and Tube Heat Exchanger

Shell and tube heat exchanger biasanya digunakan dalam kondisi tekanan relatif tinggi, yang terdiri dari sebuah selongsong yang di dalamnya disusun suatu *annulus* dengan rangkaian tertentu (untuk mendapatkan luas permukaan yang optimal). Fluida mengalir di selongsong maupun di *annulus* sehingga terjadi perpindahan panas antara fluida dengan dinding *annulus* misalnya *triangular pitch* (pola segitiga) dan *square pitch* (pola segi empat).



Gambar 14. Bentuk Susunan Tabung

Keuntungan *square pitch* adalah bagian dalam *tube*-nya mudah dibersihkan dan *pressure drop*-nya rendah ketika mengalir di dalamnya (fluida).



Gambar 15. Shell and Tube Heat Exchanger

Keuntungan dari *shell and tube* yaitu:

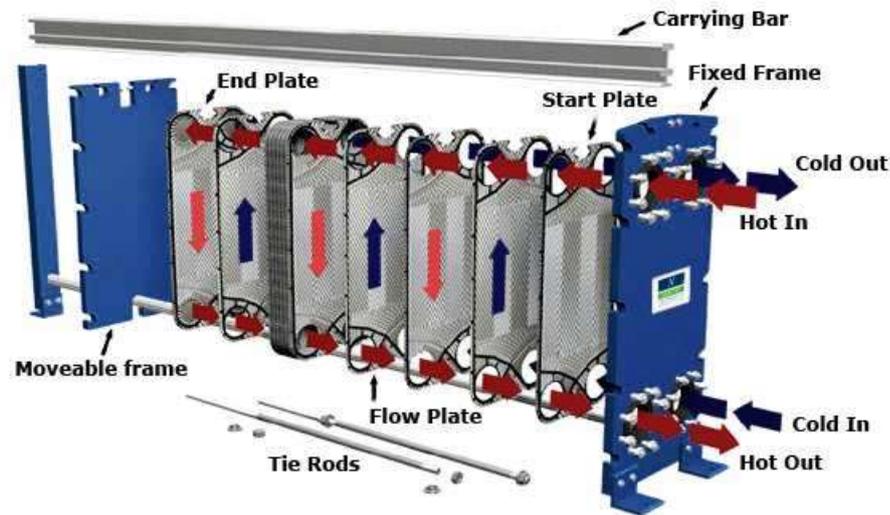
1. Konfigurasi yang dibuat akan memberikan luas permukaan yang besar dengan bentuk atau volume yang kecil.
2. Mempunyai *lay-out* mekanik yang baik, bentuknya cukup baik untuk operasi bertekanan.
3. Menggunakan teknik fabrikasi yang sudah mapan (*well-established*).
4. Dapat dibuat dengan berbagai jenis material, dimana dapat dipilih jenis material yang digunakan sesuai dengan temperatur dan tekanan operasi.
5. Mudah membersihkannya.
6. Prosedur perencanaannya sudah mapan (*well-established*).
7. Konstruksinya sederhana, pemakaian ruangan relatif kecil.
8. Pengoperasiannya tidak berbelit-belit, sangat mudah dimengerti (diketahui oleh para operator yang berlatar belakang pendidikan rendah).
9. Konstruksinya dapat dipisah-pisah satu sama lain, tidak merupakan satu kesatuan yang utuh, sehingga pengangkutannya relatif gampang.

Kerugian penggunaan *shell and tube heat exchanger* adalah semakin besar jumlah lewatan maka semakin banyak panas yang diserap tetapi semakin sulit perawatannya.

3. Plate Type Heat Exchanger

Plate type heat exchanger terdiri dari bahan konduktif tinggi seperti *stainless steel* atau tembaga. *Plate* dibuat dengan *design* khusus dimana tekstur permukaan *plate* saling berpotongan satu sama lain dan membentuk ruang sempit antara dua *plate* yang berdekatan. Jika menggabungkan *plate-plate* menjadi seperti berlapis-lapis, susunan *plate-plate* tersebut tertekan dan bersama-sama membentuk saluran alir untuk fluida. Area total untuk

perpindahan panas tergantung pada jumlah *plate* yang dipasang bersama-sama seperti gambar di bawah ini.



Gambar 16. *Plate Type Heat Exchanger* dengan Aliran *Counter Current*

4. *Jacketed Vessel with Coil and Stirrer*

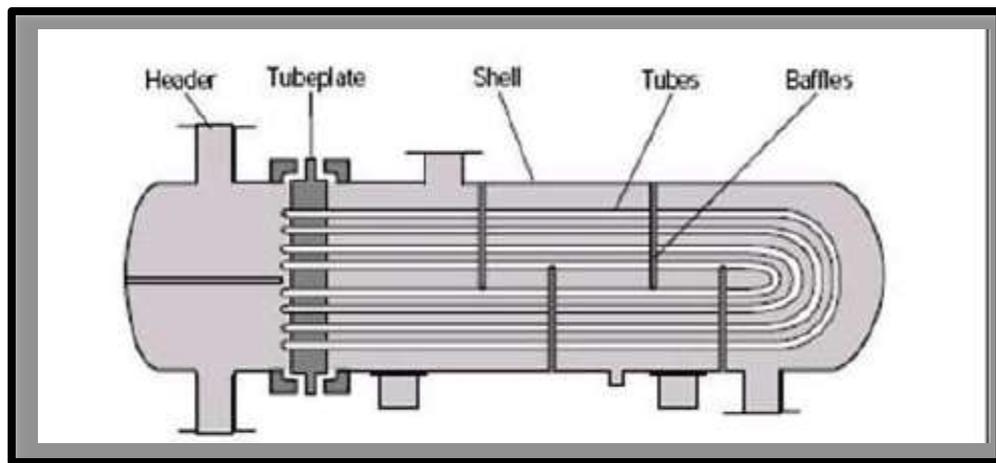
Unit ini terdiri dari bejana berselubung dengan *coil* dan pengaduk, tangki air panas, instrumen untuk pengukuran *flowrate* dan temperatur. Fluida dingin dalam *vessel* dipanaskan dengan mengalir selubung atau koil dengan fluida panas. Pengaduk dan *baffle* disediakan untuk proses pencampuran isi *vessel*. Volume isi tangki dapat divariasikan dengan pengaturan tinggi pipa *overflow*. Temperatur diukur pada *inlet* dan *outlet* fluida panas, *vessel inlet* dan isi *vessel*.



Gambar 17. Skema dari *Jacketed Vessel with Coil and Stirrer*

2.5 Heat Exchanger Tipe Shell and Tube

Tipe *heat exchanger* yang paling umum digunakan dalam industri adalah tipe *shell and tube*. *Heat exchanger* tipe *shell and tube* terdiri dari kumpulan *tube* di dalam suatu *shell*. Satu fluida mengalir di dalam *tube* sedang fluida yang lain mengalir di ruang antara *bundle tube* dan *shell*.



Gambar 18. Bagian *Heat Exchanger* Tipe U-Bend

Komponen penyusun *heat exchanger* jenis *shell and tube* adalah:

a) *Shell*

Merupakan bagian tempat untuk *tube bundle*. Antara *shell and tube bundle* terdapat fluida yang menerima atau melepaskan panas, yang dimaksud dengan lintasan *shell* adalah lintasan yang dilakukan oleh fluida yang mengalir ke dalam melalui saluran masuk (*inlet nozzle*) melewati 13 bagian dalam *shell* dan mengelilingi *tube* kemudian keluar melalui saluran keluar (*outlet nozzle*).

b) *Tube*

Diameter dalam *tube* merupakan diameter dalam aktual dalam ukuran inch dengan toleransi yang sangat cepat. *Tube* dapat diubah dari berbagai jenis logam, seperti besi, tembaga, perunggu, tembaga-nikel, aluminium-perunggu, aluminium dan *stainless steel*. Ukuran ketebalan pipa berbeda-beda dan

dinyatakan dalam bilangan yang disebut *Birmingham Wire Gage* (BWG). Ukuran pipa yang secara umum digunakan biasanya mengikuti ukuran-ukuran yang telah baku, semakin besar bilangan BWG, maka semakin tipis *tube*-nya.

c) *Pass Divider*

Komponen ini berupa plat yang dipasang di dalam *channels* untuk membagi aliran fluida *tube* bila diinginkan jumlah *tube pass* lebih dari satu.

d) *Baffle*

Digunakan untuk mengatur aliran lewat *shell* sehingga turbulensi yang lebih tinggi akan diperoleh. Adanya *baffle* dalam *shell* menyebabkan arah aliran fluida dalam *shell* akan memotong kumpulan *tubes* secara tegak lurus, sehingga memungkinkan pengaturan arah aliran dalam *shell* maka dapat meningkatkan kecepatan liniernya, sehingga akan meningkatkan harga koefisien perpindahan panas lapisan fluida di sisi *shell*. *Baffle* juga berfungsi untuk menahan *tube bundle* untuk menahan getaran pada *tube* dan untuk mengontrol serta mengarahkan aliran fluida yang mengalir di luar *tube* sehingga turbulensi yang lebih tinggi akan diperoleh, dengan adanya turbulensi aliran maka koefisien perpindahan panas juga akan meningkat.

2.5.1 Fouling Factor (Faktor Pengotoran)

Faktor pengotoran ini sangat mempengaruhi perpindahan panas pada *heat exchanger*. Pengotoran ini dapat terjadi endapan dari fluida yang mengalir, juga disebabkan oleh korosi pada komponen dari *heat exchanger* akibat pengaruh dari jenis fluida yang dialirinya. Selama *heat exchanger* ini dioperasikan pengaruh pengotoran pasti akan terjadi. Terjadinya pengotoran tersebut dapat mengganggu atau mempengaruhi temperatur fluida mengalir juga dapat

menurunkan atau mempengaruhi koefisien perpindahan panas menyeluruh dari fluida tersebut. Beberapa faktor yang dipengaruhi akibat pengotoran antara lain:

- 1) Temperatur fluida
- 2) Temperatur dinding plat
- 3) Kecepatan aliran fluida

Faktor pengotoran (*fouling factor*) dapat dicari persamaan:

$$Rd = \frac{U_c - U_d}{U_c \cdot U_d} \dots\dots\dots(10)$$

dimana, U_c = Koefisien perpindahan panas menyeluruh bersih

$$U_c = \frac{h_{io} \times h_o}{h_{io} + h_o} \dots\dots\dots(11)$$

dimana, h_{io} = Koefisien perpindahan panas pada permukaan luar plat

h_o = Koefisien perpindahan panas fluida di luar plat

2.5.2 Analisa Efektivitas Alat Penukar Kalor dengan Pendekatan LMTD

Pendekatan LMTD dalam analisis penukar kalor berguna jika temperatur masuk dan keluar diketahui sehingga LMTD dapat dihitung, aliran kalor, luas permukaan dan koefisien perpindahan kalor menyeluruh. Metode efektifitas mempunyai beberapa keuntungan dalam menganalisis serta memilih jenis yang terbaik. Efektivitas penukar kalor (*heat exchanger effectivities*) didefinisikan sebagai:

$$Efektivitas = \epsilon = \frac{\text{perpindahan kalor nyata}}{\text{perpindahan kalor maksimum yang mungkin}} \dots\dots\dots(12)$$

LMTD (*Log Mean Temperature Difference*)

Pada aliran sejajar, dua fluida masuk bersama-sama dalam alat penukar kalor, bergerak dalam arah yang sama dan keluar bersama-sama pula. Sedangkan pada aliran berlawanan, dua fluida bergerak dengan arah yang

berlawanan, dan pada aliran menyilang, dua fluida saling menyilang/bergerak saling tegak lurus.

Seperti ditunjukkan pada gambar menunjukkan bahwa beda temperatur antara fluida panas dan fluida dingin pada waktu masuk dan pada waktu keluar tidaklah sama, dan kita perlu menentukan nilai rata2 untuk menentukan jumlah kalor yang dipindahkan dari fluida pada alat penukar kalor.

Sehingga Untuk aliran searah:

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_1) - (T_2 - t_2)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_1}{T_2 - t_2}\right)} \dots\dots\dots(13)$$

Untuk aliran berlawanan,

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln\left(\frac{T_1 - t_2}{T_2 - t_1}\right)} \dots\dots\dots(14)$$

Untuk heat exchanger tipe 2 *pass* ataupun *multiple pass* maka nilai LMTD sebenarnya akan didapatkan dengan mengalikannya dengan *correction factor* (F). Nilai F dapat dicari dengan menentukan nilai *temperature efficiency* (P) dan *heat capacity rate ratio* (R).

$$P = \frac{t_2 - t_1}{T_1 - t_1} \quad \text{dan} \quad R = \frac{T_1 - T_2}{t_2 - t_1} \dots\dots\dots(15)$$

2.5.3 Penurunan Tekanan pada Sisi “Shell”

Apabila dibicarakan besarnya penurunan tekanan pada sisi *shell* alat penukar kalor, masalahnya proporsional dengan beberapa kali fluida itu menyebrangi *tube bundle* diantara sekat-sekat.

Besarnya penurunan tekanan pada isothermal untuk fluida yang dipanaskan atau didinginkan, serta kerugian saat masuk dan keluar adalah:

$$\Delta P_s = f_s \cdot G_s^2 \cdot D_s \cdot (N+1)^{5,22} \cdot 10^{10} \cdot D_s \cdot S \cdot \phi_s \dots\dots\dots(16)$$

2.5.4 Penurunan Tekanan pada Sisi “Tube”

Besarnya penurunan tekanan pada tube side alat penukar kalor telah diformulasikan, persamaan terhadap faktor gesekan dari fluida yang dipanaskan atau yang didinginkan di dalam *tube*.

$$\Delta P_t = f_t \cdot G_t^2 \cdot L \cdot n_{5,22} \cdot 10^{10} \cdot D_t \cdot S \cdot \phi_t \dots\dots\dots (17)$$

Mengingat bahwa fluida itu mengalami belokan pada saat *pass*-nya, maka akan terdapat kerugian tambahan penurunan tekanan.

$$\Delta P_r = 4n_{St} V_{22} g \dots\dots\dots (18)$$

2.5.5 Metode NTU – Efektifitas untuk Menganalisa Perpindahan Panas Penukar Panas

Metode NTU-efektifitas merupakan metode yang berdasarkan atas efektifitas penukar panas dalam memindahkan sejumlah panas tertentu. Metode NTU-efektifitas juga mempunyai beberapa keuntungan untuk menganalisa soal-soal di mana harus dibandingkan berbagai jenis penukar panas guna memilih jenis yang terbaik untuk melaksanakan sesuatu tugas pemindahan panas tertentu. Efektifitas penukar panas didefinisikan sebagai berikut:

$$Efektivitas = \epsilon = \frac{\text{perpindahan kalor nyata}}{\text{perpindahan kalor maksimum yang mungkin}} = \frac{Q}{Q_{maks}} \dots\dots\dots (12)$$

(Holman, p. hal: 498)

Perpindahan panas sebenarnya dapat dihitung dari energi yang dilepaskan oleh fluida panas atau energi yang diterima oleh fluida dingin.

Untuk penukar panas aliran searah yaitu:

$$Q = \dot{m}_h \cdot C_h \cdot (T_{h1} - T_{h2}) = \dot{m}_c \cdot C_c \cdot (T_{c2} - T_{c1}) \dots\dots\dots (19)$$

Untuk penukar panas aliran lawan arah:

$$Q = \dot{m}_h \cdot C_h \cdot (T_{h1} - T_{h2}) = \dot{m}_c \cdot C_c \cdot (T_{c1} - T_{c2}) \dots\dots\dots (20)$$

sedangkan perpindahan panas maksimum dinyatakan sebagai berikut:

$$Q_{maks} = (\dot{m} \cdot C_p)_{min} \cdot (T_{h1} - T_{c1}) \dots \dots \dots (21)$$

dimana :

\dot{m}_h = laju aliran massa fluida panas (kg/s)

\dot{m}_c = laju aliran massa fluida dingin (kg/s)

C_h = panas spesifik fluida panas (kJ/kg°C)

C_c = panas spesifik fluida dingin (kJ/kg°C)

T_{h1} = temperatur fluida panas masuk penukar panas (°C)

T_{h2} = temperatur fluida panas keluar penukar panas (°C)

T_{c1} = temperatur fluida dingin masuk penukar panas (°C)

T_{c2} = temperatur fluida dingin keluar penukar panas (°C)

2.6 Variabel yang Mempengaruhi Laju Perpindahan Panas

Besarnya laju perpindahan panas dapat dihitung dengan rumus:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_m \dots \dots \dots (22)$$

Sehingga besarnya laju perpindahan panas (Q) dipengaruhi oleh:

1. Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh (U)

Semakin besar koefisien perpindahan panas menyeluruh (U), maka laju perpindahan panas yang terjadi antara dua fluida juga semakin besar.

2. Luas Permukaan (A)

Semakin luas permukaan *heat exchanger* maka semakin besar pula laju perpindahan panas dan juga tergantung pada diameter dalam pipa.

3. Beda suhu rata-rata (ΔT_m)

Semakin besar beda suhu rata-rata antara fluida maka semakin besar pula laju perpindahan panasnya.

2.7 Perancangan Alat Penukar Panas Tipe *Shell and Tube*

Sebelum mendisain alat penukar kalor, dibutuhkan data dari laju aliran (*flow rate*), temperatur masuk dan temperatur keluar, dan tekanan operasi kedua fluida. Data ini dibutuhkan terutama untuk fluida gas jika densitas gas tidak diketahui. Untuk fluida berupa cairan (*liquid*), data tekanan operasi tidak terlalu dibutuhkan karena sifat-sifatnya tidak banyak berubah apabila tekanannya berubah.

Langkah-langkah yang biasa di lakukan dalam merencanakan atau mendisain alat penukar kalor adalah:

1. Penentuan *heat duty* (Q) yang diperlukan. Penukar kalor yang direncanakan harus memenuhi atau melebihi syarat ini.
2. Menentukan ukuran (size) alat penukar kalor dengan perkiraan yang masuk akal untuk koefisien perpindahan kalor keseluruhannya.
3. Menentukan fluida yang akan mengalir di sisi *tube* atau *shell*. Biasanya sisi *tube* di rencanakan untuk fluida yang bersifat korosif, beracun, bertekanan tinggi, atau bersifat mengotori dinding. Hal ini dilakukan agar lebih mudah dalam proses pembersihan atau perawatannya.
4. Langkah selanjutnya adalah memperkirakan jumlah *tube* (Nt) yang digunakan dengan menggunakan rumus :

$$A = Nt (\pi d_0) L \dots \dots \dots (23)$$

dimana:

d_0 = diameter luar *tube* (mm)

L = panjang *tube* (mm)

5. Menentukan ukuran *shell*. Langkah ini dilakukan setelah kita mengetahui jumlah *tube* yang direncanakan. Kemudian perkirakan jumlah *pass* dan *tube pitch* yang akan digunakan.
6. Langkah selanjutnya adalah memperkirakan jumlah *baffle* dan jarak antar *baffle* yang akan digunakan. Biasanya, *baffle* memiliki jarak yang seragam dan minimum jaraknya $1/5$ dari diameter *shell* tapi tidak kurang dari 2 inchi.
7. Langkah yang terakhir adalah memeriksa kinerja dari alat penukar kalor yang telah direncanakan. Hitung koefisien perpindahan panas di sisi tabung dan sisi "*shell*", hitung faktor pengotorannya apakah sesuai dengan standar yang diizinkan, dan penurunan tekanan di sisi *tube* dan *shell*.