

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 *Heat Exchanger*

Heat exchanger (alat penukar panas) adalah salah satu alat yang sering digunakan pada proses industri yang berfungsi untuk menghantarkan panas antara dua proses aliran dimana salah satu penerapannya bisa digunakan untuk proses pendinginan, pemanasan, kondensasi, ataupun evaporasi. Perpindahan panas pada *heat exchanger* digunakan untuk mentransfer energi dari fluida bertemperatur panas ke fluida bertemperatur dingin ataupun sebaliknya, tanpa terjadi perpindahan massa didalamnya. Perpindahan panas pada *heat exchanger* dapat terjadi melalui proses konveksi dan konduksi. Perpindahan panas tidak hanya mencoba menjelaskan bagaimana energi panas itu berpindah dari satu benda ke benda lain, tetapi juga dapat meramalkan laju perpindahan panas yang terjadi pada kondisi-kondisi tertentu (Holman, 1993). Laju perpindahan panas pada *heat exchanger* dipengaruhi oleh koefisien perpindahan panas keseluruhan, luas bidang transfer. Pada *heat exchanger* fluida panas dan dingin dapat mengalir searah (*co-current flow* atau *parallel flow*) dimana kedua fluida masuk pada ujung *heat exchanger* yang sama dan kedua fluida mengalir searah menuju ujung *heat exchanger* yang lain. Apabila fluida panas dan dingin berlawanan arah (*counter current flow*) dimana fluida yang satu masuk pada ujung *heat exchanger*, sedangkan fluida yang lain masuk pada ujung *heat exchanger* yang lain. Pada alat penukar panas perpindahan panas terjadi karena dua aliran dengan suhu yang berbeda mengalir di dalam alat penukar panas dimana pada sisi tube mengalir suhu panas dan sisi *shell* mengalir suhu dingin sehingga mengakibatkan perpindahan kalor. Suhu yang lebih rendah akan menerima kalor, sedangkan suhu yang lebih tinggi akan melepaskan kalor, sehingga terjadi *heat mass balance* (Rusjdi H. dkk., 2016).

2.2 Perpindahan panas

Perpindahan panas adalah cabang ilmu pengetahuan yang mempelajari perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan suhu diantara dua atau lebih benda. Dalam proses perpindahan energi tersebut tentu ada kecepatan perpindahan panas yang terjadi, atau lebih dikenal dengan laju perpindahan panas. Maka ilmu perpindahan panas juga merupakan ilmu mempelajari laju perpindahan panas yang terjadi pada kondisi – kondisi tertentu. Ada tiga bentuk mekanisme perpindahan panas yang diketahui, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi, Holman (1997), Sihite (2011).

2.3 Alat penukar kalor

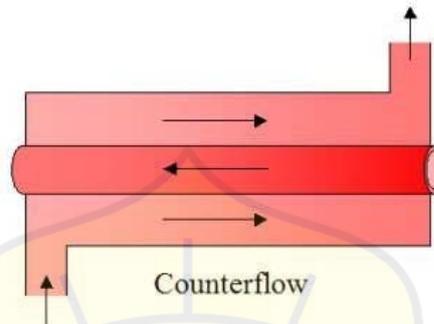
Menurut Dean A Barlet (1996), Bizzy (2013) bahwa alat penukar kalor memiliki tujuan untuk mengontrol suatu sistem (temperatur) dengan menambahkan atau menghilangkan energi termal dari suatu fluida ke fluida lainnya. Walaupun ada banyak perbedaan ukuran, tingkat kesempurnaan, dan perbedaan jenis alat penukar kalor, semua alat penukar kalor menggunakan elemen–elemen konduksi termal yang pada umumnya berupa tabung “*tube*” atau plat untuk memisahkan dua fluida. Salahsatu dari elemen tersebut, memindahkan energi kalor ke elemen yang lainnya.

2.4 Macam-macam penukar kalor

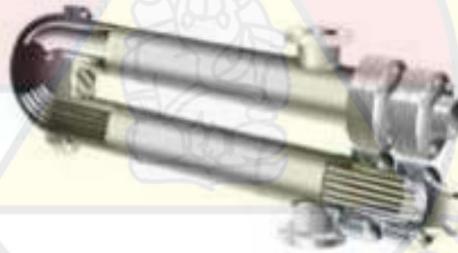
2.4.1 *Concentric Tube Heat Exchanger (Double Pipe)*

Double pipe heat exchanger atau *consentric tube heat exchanger* yang adalah alat penukar panas dimana fluida panas dan dingin dipisahkan oleh susunan tabung *concentric (double pipe)*, fluida panas dan dingin tersebut mengalir dalam arah yang sama maupun berlawanan. Pada saat dimana fluida panas dan dingin mengalir dalam arah yang sama, maka alat penukar kalor tersebut disebut *parallel flow heat exchanger*, sedangkan jika fluida panas dan dingin mengalir dalam arah yang berlawanan alat penukar kalor tersebut disebut dengan *counter flow heat exchanger*.

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.



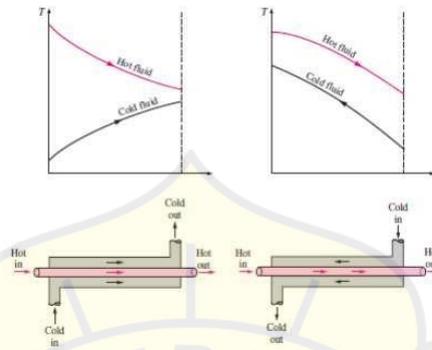
Gambar 2.1 Pola aliran *double pipe heat exchanger* (Sumber : <http://www.real-world-physics-problems.com/heat-exchanger.html>)



Gambar 2.2 Aliran *double pipe heat exchanger* (Sumber : <http://www.real-world-physics-problems.com/heat-exchanger.html>)

Single tube (double pipe) atau berbagai tabung dalam suatu hairpin shell (multitube), Bare tubes, finned tube, U-Tubes, Straight tubes, 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.

Susunan dari concentric tube ditunjukkan pada gambar di bawah ini. Aliran dalam tipe heat exchanger dapat bersifat cocurrent atau counter current dimana aliran fluida panas ada pada inner pipe dan fluida dingin pada annulus pipe.

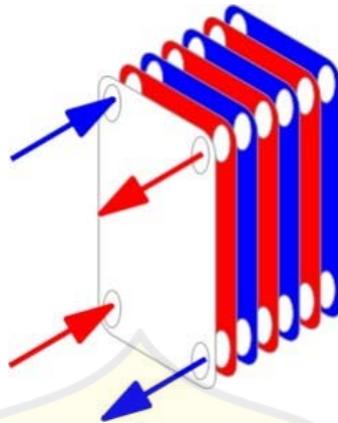


Gambar 2.3 Double pipe heat exchanger aliran cocurrent dan counter current

Sumber : Cengel

2.4.2 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 berlapislapis, 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 dibawah



Gambar 2.4 *Plate type heat exchanger* dengan aliran *counter current*

Sumber : Sadik Kakac and Hongtan Liu

2.4.3 *Jacketed Vessel White Coil and stiller*

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 coil 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*



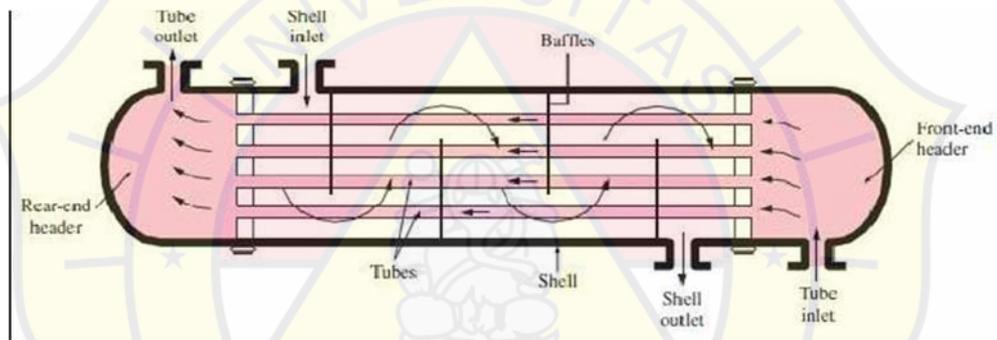
Gambar2.5 *Jacketed Vessel With Coil And Stirrer*

Sumber : Robert Dream

2.4.4 Alat penukar kalor tipe *Shell and Tube*

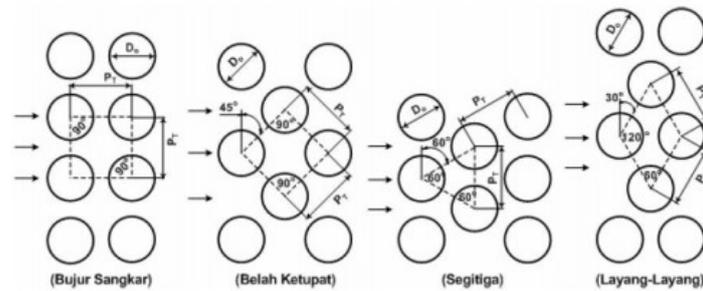
Alat penukar kalor tipe ini adalah salah satu jenis alat penukar kalor yang menurut konstruksinya dicirikan adanya sekumpulan *tube* yang dipasangkan di dalam *shell* berbentuk silinder di mana dua jenis fluida yang saling bertukar kalor mengalir secara terpisah, masing-masing melalui sisi *tube* dan sisi *shell*. Alat penukar kalor tipe ini sering digunakan di industri kimia. (Bizzy,2013)

Satu fluida mengalir di dalam pipa, sementara fluida lain dialirkan dalam shell. Agar aliran dalam shell turbulen dan untuk memperbesar koefisien perpindahan panas konveksi, maka pada shell dipasang penghalang (*baffle*).



Gamabr 2.6 *Heat exchanger* tipe *shell and tube* Sumber : Bizzy, 2013

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 segiempat).



Gambar 2.7 Bentuk susunan tabung Sumber : Incropera

Keuntungan *triangulat pitch* koefisien lebih tinggi dari pada *square pitch* dan *tube* dapat di buat dalam jumlah banyak karena susunannya yang kompak. Keuntungan *square pitch* adalah bagian dalam *tube*-nya mudah dibersihkan dan *pressure drop*-nya rendah ketika mengalir di dalamnya (fluida)

Keuntungan dari *shell and tube*:

1. Memiliki permukaan perpindahan panas persatuan volume yang lebih besar.
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 paraoperator yang berlatar belakang pendidikan rendah).
9. Konstruksinya dapat dipisah-pisah satu sama lain, tidak merupakan satu kesatuanyang utuh, sehingga pengangkutannya relatif gampang

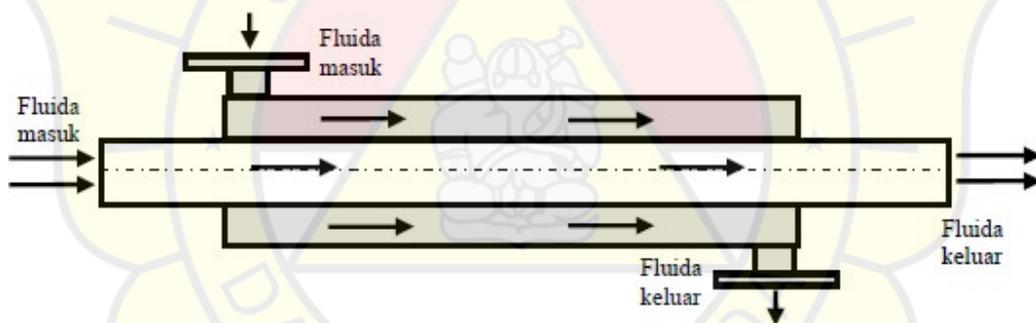
Kerugian penggunaan *shell and tube heat exchanger* adalah semakin besar jumlah lewatan maka semakin banyak panas yang diserap tetapi semakin sulit perawatannya.

2.4.5 *Heat exchanger* Berdasarkan Arah Aliran.

Heat exchanger tipe *shell and tube* di bagi lagi berdasarkan arah aliran dari *heat exchanger* tersebut, antara lain :

a. *Heat exchanger* tipe aliran sejajar

Alat penukar kalor tipe aliran sejajar, memiliki arah aliran dari dua fluida yang bergerak secara sejajar. Kedua fluida masuk dan keluar pada sisi penukar panas yang sama. Temperatur fluida yang memberikan energi akan selalu lebih tinggi dibanding temperatur fluida yang menerima sejak memasuki alat penukar kalor hingga keluar. Temperatur fluida yang menerima kalor tidak akan pernah mencapai temperatur fluida yang memberikan kalor. (Bizzy, 2013).



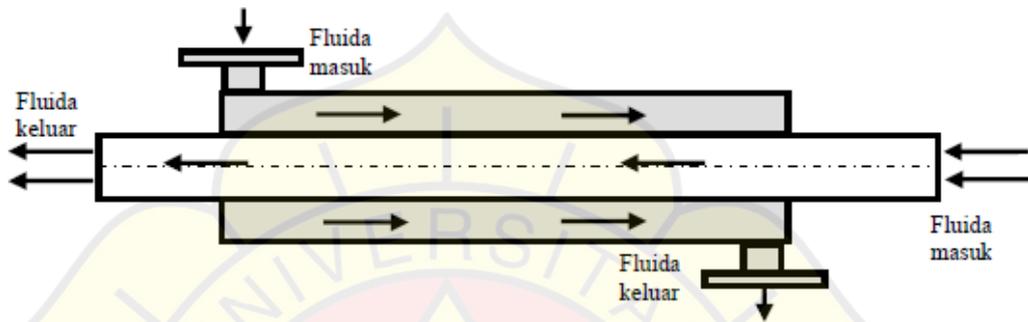
Gambar 2.8 Pola aliran searah (*parallel flow*)

Sumber : Bizzy,2013

b. *Heat exchanger* tipe aliran berlawanan.

Alat penukar kalor tipe aliran berlawanan, memiliki arah aliran yang berlawanan. Perpindahan kalor terjadi antara satu ujung bagian yang panas dari kedua fluida dan juga bagian yang paling dingin. Temperatur keluar fluida dingin dapat melebihi temperatur keluar fluida panas. Pada jenis alat penukar kalor ini, fluida panas mengalir di dalam *tube* sedangkan fluida dingin mengalir di luar *tube* atau di dalam *shell*. Karena kedua aliran fluida melintasi penukar kalor hanya sekali, maka

susunan ini disebut penukar kalor satu lintas (*single-pass*). Jika kedua fluida itu mengalir dalam arah yang sama, maka penukar kalor ini bertipe aliran searah (*parallel flow*) gambar 2.3 Jika kedua fluida itu mengalir dalam arah yang berlawanan, maka penukar kalor ini bertipe aliran lawan (*counter flow*) gambar 2.4 (Kreith, 1997), (Bizzy, 2013).

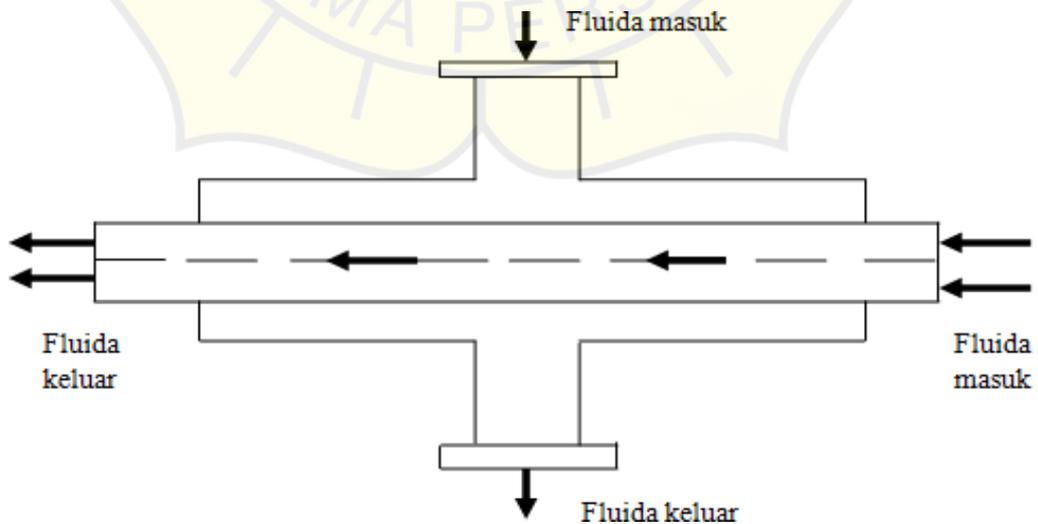


Gambar 2.9 Pola Aliran berlawanan (*counter flow*).

Sumber : Bizzy,2013.

c. *Heat exchanger* tipe aliran silang.

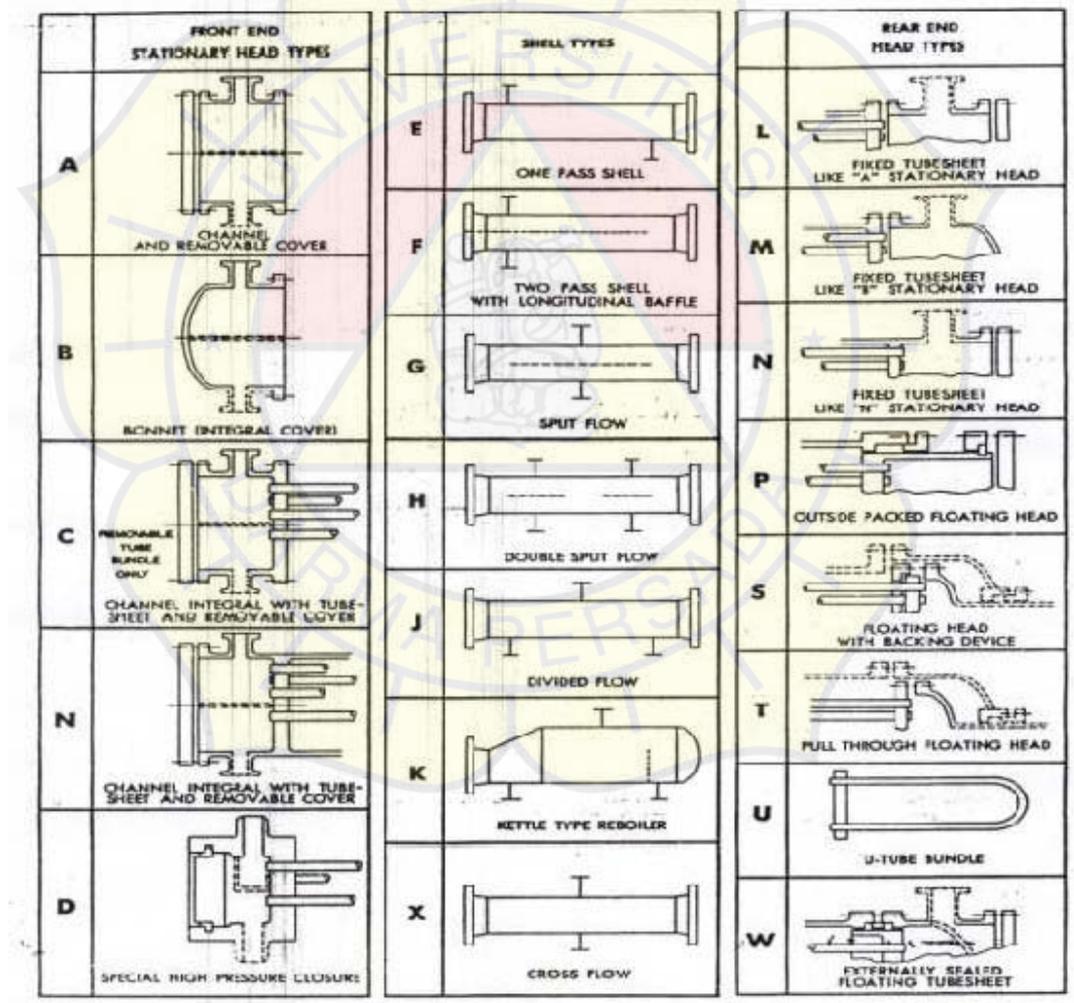
Bila kedua fluida mengalir sepanjang permukaan perpindahan panas dalam gerakan yang tegak lurus satu dengan lainnya, maka penukar panasnya dikatakan berjenis aliran silang (*cross flow*).



Gambar 2.10 Pola aliran silang (*cross flow*) (Sumber : Cindikia)

Berdasarkan standar “*Tubular Exchanger Manufactures Association*” (TEMA) terdapat 3 (tiga) macam kelas alat penukar kalor :

1. Kelas R, untuk peralatan yang bekerja dengan kondisi berat. Biasa digunakan diindustri minyak
2. Kelas C, dibuat untuk penggunaan secara umum. Didasarkan pada segi ekonomis dan ukuran kecil, digunakan untuk proses – proses umum industri.
3. Kelas B, untuk pelayanan proses kimia



Gambar 2.11 Standar TEMA berdasarkan tipe bagian alat penukar kalor
Sumber : Bizzy,2013.

2.5 Perpindahan panas Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi merupakan perpindahan yang memerlukan perantara zat padat. Persamaan perpindahan panas secara konduksi dituliskan sebagai, Holman (1997):

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{dt}{dx} \quad (2.1)$$

Dimana :

q = Laju perpindahan panas (Watt)

K = Konduksi Panas (W/m^{°K})

A = Luas Penampang yang tegak lurus aliran panas (m²)

DT = Perbedaan temperatur (°K)

dx = Jarak kedua sisi (m)

2.5.1 Perpindahan panas secara konveksi

Perpindahan panas Konveksi adalah perpindahan panas akibat adanya gerakan/perpindahan molekul dari tempat temperatur tinggi ke tempat yang temperturnya lebih rendah disertai dengan perpindahan pertikel-pertikel zat perantaranya. Contoh yang sering kita jumpai yaitu pendinginan dari secangkir kopi panas, makanan panas, kehilangan panas dari radiator mobil, dll. Perpindahan panas konveksi dapat diklasifikasikan menjadi dua jenis menurut cara gerakan alirannya, yaitu 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, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi paksa (*forced convection*). Laju perpindahan panas pada beda temperatur tertentu dapat dihitung dengan persamaan

Keterangan :

$$q_k = -hA(T_w - T_\infty) \quad (2.2)$$

Keterangan :

q = Laju perpindahan panas (kJ/s)

h = Koefisien perpindahan panas konveksi (W/m² .°C)

A = Luas bidang permukaan perpindahan panas (m²) T_w = Temperature dinding (°C)

T_∞ = Temperature sekeliling (°C) Tanda minus (-) digunakan untuk memenuhi hukum II termodinamika, sedangkan panas yang dipindahkan selalu mempunyai tanda positif (+).

2.5.2 Perpindahan panas secara radiasi

Perpindahan panas Radiasi adalah proses mengalirnya panas dari benda bertemperatur tinggi ke benda bertemperatur rendah yang masing-masing benda berada di dalam ruang yang sama, bahkan jika terdapat diruang hampa diantara benda-benda tersebut. Energi/panas radiasi dipancarkan oleh benda karena temperatur tinggi, yang dipindahkan melalui ruang hantar dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Bila energi radiasi mengenai suatu bahan, maka sebagian radiasi akan dipantulkan, sebagian

lain diserap oleh bahan dan sebagian lainnya diteruskan kebagian yang lain. Menghitung besarnya energi radiasi dapat digunakan persamaan

$$Q_{\text{pancaran}} = \sigma A T^4 \quad (2.3)$$

Keterangan :

Qpancar = laju perpindahan panas (KJ/s)

σ = konstanta boltzman ($5,669 \cdot 10^{-8}$ W/m² .K⁴)

A = luas permukaan benda (m)

T = temperatur absolut benda (°C)

2.6 Bilangan *Reynold*

Bilangan *Reynolds* adalah parameter tidak berdimensi untuk menentukan apakah aliran yang terjadi laminer atau turbulen yang tergantung dari besarnya bilangantersebut. Sebuah aliran dikatakan laminer jika fluida bergerak secara lapisan-lapisan secara teratur atau nilai bilangan *Reynolds*-nya kurang dari 2000, (Kreith, 1997). Dan daerah bilangan *Reynolds* antara 2100 sampai 4000 terjadi peralihan dari aliran laminer ke aliran turbulen aliran ini disebut aliran peralihan (transisi). Sedangkan aliran dikatakan turbulen jika fluida bergerak dengan tidak menentu ditandai dengan timbulnya ulakan-ulakan pada aliran atau nilai bilangan *Reynolds*-nya lebih dari 4000, (Kreith, 1997). Untuk mengetahui sifat dari aliran tersebut laminer atau turbulen ditunjukkan dengan bilangan *Reynolds* (Re) yang dituliskan dalam persamaan sebagai berikut: (Kreith, 1997).

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (2.4)$$

Dimana :

Re = Bilangan *Reynolds*. ρ = Massa jenis (kg/m³).

v = Kecepatan (m/s).

μ = Viskositas dinamis fluida (kg/m s).

D = Diameter (m).

1. Aliran Turbulen, (Holman, 1997).

$$Nu = 3,66 (Re \times Pr)^{1/3} \cdot (ID_t/L)^{1/3} \quad (2.5)$$

Dimana :

Nu = Bilangan *Nusselt*.

Re = Bilangan *Reynolds*.

Pr = Bilangan *Prandtl*.

2. Aliran Laminer didalam *Tube*, (Holman,1997).

$$Nu_u = 0,71 \times Re^{0,5} \times Pr^{0,36} \times \left(\frac{d}{L}\right)^{0,25} \quad (2.6)$$

Dimana :

Nu_d = Bilangan *Nusselt*.

Re_d = Bilangan *Reynolds*.

Pr = Bilangan *Prandtl*.

d = Diameter *tube* (m).

L = Panjang *tube* (m).

Sehingga koefisien perpindahan panas konveksi dapat didefinisikan sebagai :

$$h = \frac{kNu_d}{d} \quad (2.7)$$

Dimana :

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

k = Konduktivitas termal, ($W/m \cdot ^\circ C$)

Nu_d = Angka Nuselt

d = diameter pipa. (m).

Dan laju aliran panas konveksi bebas dapat dihitung dengan persamaan :

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T_{(LMTD)} \quad (2.8)$$

Dimana :

$\Delta T_{(LMTD)}$ = Log mean temperatur difference ($^\circ C$)

A = Luasan perpindahan panas dinding luar heat exchanger (m^2)

Q = laju aliran panas (W).

2.7 Performa *heat exchanger tipe shell and tube*

Dalam perhitungan, untuk mengetahui tingkat perpindahan panas yang dibutuhkan suhu masuk dan keluar dari kedua fluida melakukan perhitungan perbedaan suhu rata-rata.

2.8 Beda Temperatur Rata – Rata Logaritma (LMTD)

Faktor perhitungan pada alat penukar kalor adalah masalah perpindahan panasnya. Apabila panas yang dilepaskan besarnya sama dengan Q persatuan waktu, maka panas itu diterima fluida yang dingin sebesar Q tersebut dengan persamaan (Holman,1997):

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (2.9)$$

Dimana :

Q = Kalor yang dilepaskan/diterima (W)

U = Koefisien perpindahan panas menyeluruh (W/m²0C)

A = Luas perpindahan panas (m²)

ΔT = Selisih temperatur rata-rata (0C)

Sebelum menentukan luas permukaan kalor (A), maka terlebih dahulu ditentukan nilai dari LMTD. Hal ini berdasarkan selisih temperature dari fluida yang masuk dan keluar dari kalor. (Holman,1997).

$$LMTD = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}}} \quad (2.10)$$

Untuk aliran fluida paralel, $\Delta T_{max} = (T_1 - t_1)$ dan $\Delta T_{min} = (T_2 - t_2)$ Untuk aliran fluida silang, $\Delta T_{max} = (T_1 - t_2)$ dan $\Delta T_{min} = (T_2 - t_1)$, Dimana :

LMTD = Selisih temperatur rata – rata logaritma (0C)

T_i = Temperatur fluida masuk ke dalam *shell* (0C)

T_o = Temperatur fluida keluar *shell* (0C)

t_i = Temperatur fluida masuk ke dalam *tube* (0C)

t_o = Temperatur fluida ke luar *tube* (0C)

Koefisien perpindahan panas

$$U = \left[\frac{d_0}{h_i \cdot D_i} + \frac{d_{0.1n}(d_0/i)}{2k_{tube}} + \frac{1}{h_0} \right]^{-1} \quad (2.11)$$

Dimana :

- U = Koefisien perpindahan panas menyeluruh (W/m² C).
- hi = Koefisien perpidahan panas konveksi bagian dalam (W/m² C).
- ho = Koefisien perpidahan panas konveksi bagian luar(W/m² C).
- Ai = Luas penampang *tube* bagian dalam (m²).
- Ao = Luas penampang *tube* bagian luar (m²)
- k = Konduktivitas thermal bahan (W/m °C).
- L = Panjang tube

