

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Proses Perpindahan Kalor

Perpindahan panas adalah ilmu untuk memprediksi perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan suhu diantara benda atau material. 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).

Heat Exchanger adalah peralatan yang digunakan untuk melakukan proses pertukaran kalor antara dua fluida, baik cair (panas atau dingin), dimana fluida ini mempunyai suhu yang berbeda. *Heat Exchanger* banyak digunakan di berbagai industri tenaga atau industri lainnya dikarenakan mempunyai beberapa keuntungan, antara lain:

- a. Konstruksi sederhana, kokoh dan aman.
- b. Biaya yang digunakan relatif murah.
- c. Kemampuannya untuk bekerja pada tekanan dan temperature yang tinggi dan tidak membutuhkan tempat yang luas.

Dikarenakan ada banyak jenis penukar kalor, maka alat penukar kalor dapat dikelompokkan berdasarkan pertimbangan-pertimbangan yaitu:

- a. Proses perpindahan kalornya.
- b. Jumlah fluida yang mengalir.
- c. Konstruksi dan pengaturan aliran.

Secara umum *Heat Exchanger* dapat dikelompokkan menjadi tiga yaitu:

a. Regenerator

Yaitu *Heat Exchanger* dimana fluida panas dan dingin mengalir secara bergantian melalui saluran yang sama.

b. *Heat Exchanger* tipe terbuka (*Open Type Heat Exchanger*)

Yaitu *Heat Exchanger* dimana fluida panas dan dingin terjadi kontak secara langsung (tanpa adanya pemisah).

c. *Heat Exchanger* tipe tertutup (*Close Type Heat Exchanger*)

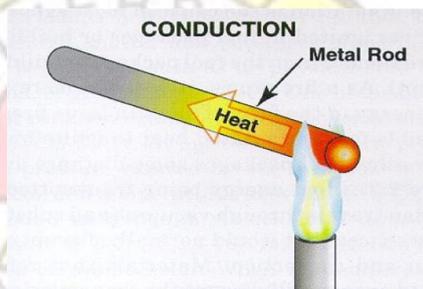
Yaitu *Heat exchanger* dimana fluida panas dan dingin tidak terjadi kontak secara langsung tetapi dipisahkan oleh dinding pipa atau suatu permukaan baik berupa dinding datar atau lengkung. Sedangkan untuk tipe *heat exchanger* berdasarkan aliran fluidanya dapat dikelompokkan menjadi *parallel-flow*, *counter-flow*, dan *cross-flow*. *Parallel-flow* atau aliran searah adalah apabila fluida-fluida dalam pipa *heat exchanger* mengalir secara searah, sedang *counter-flow* atau sering disebut dengan aliran yang berlawanan adalah apabila fluida-fluida dalam pipa *heat exchanger* mengalir secara berlawanan. *Cross-flow* atau sering disebut dengan aliran silang adalah apabila fluida-fluida yang mengalir sepanjang permukaan bergerak dalam arah saling tegak lurus.

Perpindahan panas adalah perpindahan energi yang diakibatkan oleh perbedaan suhu (Incropera, 1996). Transfer energi sebagai panas merupakan suatu sistem dimana sistem dengan suhu lebih tinggi berpindah ke sistem yang memiliki suhu yang lebih rendah. Perpindahan suhu ini akan berhenti apabila kedua sistem

telah mencapai kesetimbangan panas. Perpindahan panas ini terjadi melalui tiga cara yaitu: konduksi, konveksi, radiasi.

2.1.1 Perpindahan Panas Secara Konduksi (hantaran)

Suatu material bahan yang mempunyai *gradient*, maka kalor akan mengalir tanpa disertai oleh suatu gerakan zat. Aliran kalor seperti ini disebut konduksi atau hantaran. Konduksi *thermal* pada logam - logam padat terjadi akibat gerakan elektron yang terikat dan konduksi *thermal* mempunyai hubungan dengan konduktivitas listrik. Pemanasan pada logam berarti pengaktifan gerakan molekul, sedangkan pendinginan berarti pengurangan gerakan molekul



Gambar 2.1 Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas konduksi atau hantaran adalah proses dimana panas mengalir dari daerah yang bersuhu tinggi ke daerah yang bersuhu lebih rendah di dalam satu medium atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung (Kreith, 1997).

Perpindahan panas konduksi dapat juga didefinisikan sebagai pengangkutan kalor melalui satu jenis zat. Sehingga perpindahan panas secara konduksi atau hantaran merupakan satu proses pendalaman karena proses perpindahan kalor ini

hanya terjadi di dalam bahan material. Arah aliran energi panas adalah dari titik bersuhu tinggi ke titik bersuhu rendah (Masyithah dan Haryanto, 2006).

2.1.2 Perpindahan Panas Secara Konveksi

Perpindahan panas secara konveksi adalah proses perpindahan panas dengan kerja gabungan dari konduksi kalor, penyimpanan energi dan gerakan mencampur. Konveksi sangat penting sebagai mekanisme perpindahan energi antara permukaan benda padat dan cair atau gas. Perpindahan kalor secara konveksi dari suatu permukaan yang suhunya di atas suhu fluida disekitarnya berlangsung dalam beberapa tahap. Pertama kalor akan mengalir dengan cara konduksi dari permukaan ke partikel-partikel fluida yang berbatasan. Energi yang berpindah dengan cara demikian akan menaikkan suhu dan energi dalam partikel-partikel fluida tersebut. Kedua, partikel-partikel tersebut akan bergerak ke daerah suhu yang lebih rendah dimana partikel tersebut akan bercampur dengan partikel-partikel fluida lainnya.



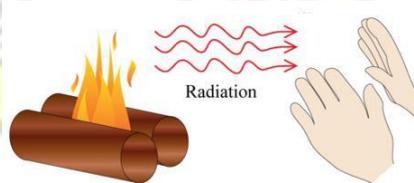
Gambar 2.2 Perpindahan panas secara konveksi

Perpindahan kalor secara konveksi dapat dikelompokkan menurut gerakan alirannya, yaitu konveksi bebas (*free convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*). Apabila gerakan fluida tersebut terjadi sebagai akibat dari perbedaan

densitas (kerapatan) yang disebabkan oleh gradient suhu maka disebut konveksi bebas atau konveksi alamiah (*natural convection*). Bila gerakan fluida tersebut disebabkan oleh penggunaan alat dari luar, seperti pompa atau kipas, maka prosesnya disebut konveksi paksa.

2.1.3 Perpindahan panas Secara Radiasi (Pancaran)

Pada radiasi panas, panas diubah menjadi gelombang elektromagnetik yang merambat tanpa melalui ruang media penghantar. Jika gelombang tersebut mengenai suatu benda, maka gelombang dapat mengalami transisi (diteruskan), refleksi (dipantulkan), dan absorpsi (diserap) dan menjadi kalor. Hal itu tergantung pada jenis benda, sebagai contoh memantulkan sebagian besar radiasi yang jatuh padanya, sedangkan permukaan yang berwarna hitam dan tidak mengkilap akan menyerap radiasi yang diterima dan diubah menjadi kalor. Contoh radiasi panas antara lain pemanasan bumi oleh matahari.

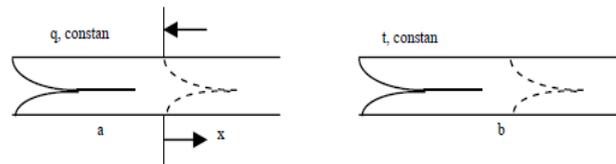


Gambar 2.3 Perpindahan Panas Secara Radiasi (Pancaran)

2.2 Daerah Pembentukan Lapis Batas Thermal

Daerah pembentukan lapis batas thermal adalah daerah dari awal pembentukan lapis batas thermal sampai ke titik pertemuan lapis batas thermal dengan sumbu pipa. Lapis batas thermal mulai terbentuk ketika aliran fluida yang

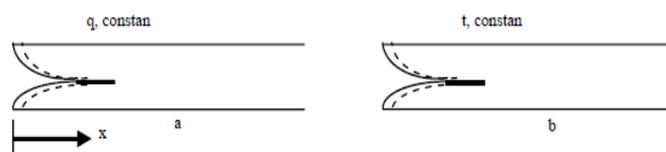
temperaturnya *uniform* mulai menyentuh permukaan dalam *tube* yang temperaturnya berbeda dengan temperature aliran fluida.



Gambar 2.4 Lapis Batas Thermal

2.3 Kombinasi Antara Daerah Pembentukan Lapis Batas Thermal dengan Daerah Pembentukan Lapis Batas Hidrodinamik.

Daerah pembentukan lapis batas hidrodinamik adalah daerah dari sisi *tube* sampai ke titik pertemuan lapis batas hidrodinamik. Panjang daerah masuk hidrodinamik adalah daerah yang dihitung mulai dari daerah sisi masuk *tube* sampai daerah aliran yang sudah berkembang penuh secara hidrodinamik gambar.

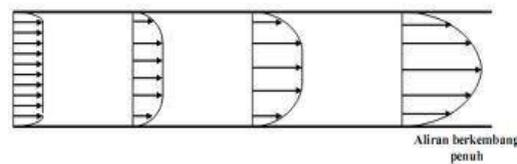


Gambar 2.5 Kombinasi Antara Daerah Pembentukan Lapis Thermal Dengan Lapis Hidrodinamik

2.4 Aliran Terbentuk Penuh

Apabila fluida memasuki tabung dengan kecepatan seragam, fluida akan melakukan kontak dengan permukaan dinding tabung sehingga viskositas menjadi penting dan lapisan batas akan berkembang. Perkembangan ini terjadi bersamaan dengan menyusunnya daerah aliran inviscid diakhiri dengan bergabungnya lapisan

batas pada garis pusat tabung. Jika lapisan-lapisan batas tersebut telah memenuhi seluruh tabung, maka dikatakan aliran berkembang penuh (*fully developed*).



Gambar 2.6 Aliran terbentuk penuh

2.5 Klasifikasi Alat Penukar Kalor

Alat penukar kalor dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori antara lain:

2.5.1 Klasifikasi berdasarkan proses perpindahan panas.

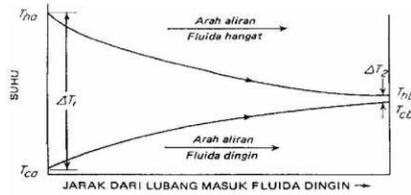
- Langsung (*direct contact*) ialah dimana fluida yang didinginkan atau fluida panas akan bercampur secara langsung dengan fluida dingin dalam suatu ruangan tertentu
- Tidak langsung (*in direct contact*) ialah dimana fluida panas tidak berhubungan dengan fluida dingin.

2.5.2 Berdasarkan Arah Aliran

- Pertukaran panas dengan aliran searah (*co-current / parallel flow*)

Pertukaran panas jenis ini, kedua fluida (dingin dan panas) masuk pada sisi penukar panas yang sama, mengalir dengan arah yang sama, dan keluar pada sisi yang sama pula. Karakter penukar panas jenis ini, temperatur fluida dingin yang keluar dari alat penukar panas (T_{cb}) tidak dapat melebihi temperatur fluida panas yang keluar dari alat penukar panas (T_{hb}), sehingga diperlukan media pendingin atau media pemanas yang banyak.

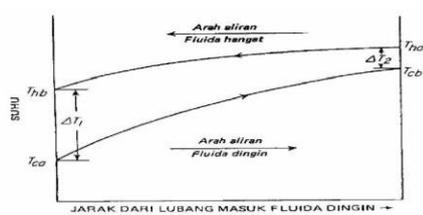
$$M_c \cdot (T_{cb} - T_{ca}) = M_h \cdot (T_{ha} - T_{hb})$$



Gambar 2.7 suhu pada aliran *co-current*

b) Pertukaran panas dengan aliran berlawanan arah (*counter flow*)

Penukar panas jenis ini, kedua fluida (panas dan dingin) masuk kedalam aliran penukar panas dengan arah berlawanan, mengalir dengan arah berlawanan dan keluar pada sisi yang berlawanan. Temperatur fluida dingin yang keluar penukar panas (T_{cb}) lebih tinggi dibandingkan temperatur fluida panas yang keluar penukar panas (T_{hb}), sehingga dianggap lebih baik dari alat penukar panas aliran searah (*Co-Current*).



Gambar 2.8 Suhu pada aliran *counter current*

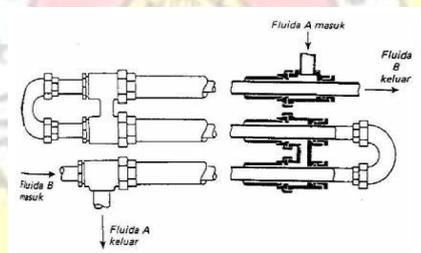
2.6 Alat Penukar Panas

Alat penukar panas konvensional seperti penukar panas pipa rangkap (*double pipe heat exchanger*) dan penukar panas cangkang buluh (*shell and tube heat exchanger*) selama beberapa decade mendominasi fungsi sebagai penukar panas di industri. Perkembangan kemudian, karena tuntutan efisiensi energi, biaya, serta tuntutan terhadap beban perpindahan panas yang lebih tinggi dengan

ukuran penukar panas yang kompak menjadi penting. Menanggapi hal itu, maka dibuat suatu penukar panas kompak. Salah satu jenis penukar panas kompak tersebut adalah penukar panas *Plate and frame Heat Exchanger*.

2.6.1 Penukar Panas Pipa Rangkap (*double pipe heat exchanger*)

Alat penukar panas pipa rangkap terdiri dari dua pipa logam standart yang dikedua ujungnya dilas menjadi satu atau dihubungkan dengan kotak penyekat. Fluida yang satu mengalir di dalam pipa, sedangkan fluida kedua mengalir di dalam ruang anulus antara pipa luar dengan pipa dalam. Alat penukar panas jenis ini dapat digunakan pada laju alir fluida yang kecil dan tekanan operasi yang tinggi. Sedangkan untuk kapasitas yang lebih besar digunakan penukar panas jenis selongsong dan buluh (*Shell And Tube Heat Exchanger*).

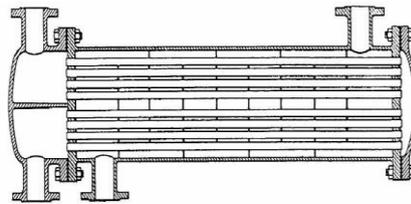


Gambar 2.9 Penukar panas jenis pipa rangkap

2.6.2 Penukar Panas Cangkang dan Buluh (*shell and tube heat exchanger*)

Alat penukar panas cangkang dan buluh terdiri atas suatu bundel pipa yang dihubungkan secara parallel dan ditempatkan dalam sebuah pipa mantel (cangkang). Fluida yang satu mengalir di dalam bundel pipa, sedangkan fluida yang lain mengalir di luar pipa pada arah yang sama, berlawanan, atau bersilangan. Kedua ujung pipa tersebut dilas pada penunjang pipa yang menempel pada mantel. Untuk meningkatkan efisiensi pertukaran panas, biasanya pada alat

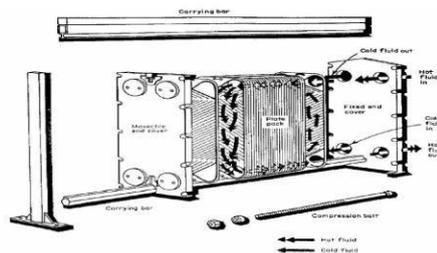
penukar panas cangkang dan buluh dipasang sekat (*baffle*). Ini bertujuan untuk membuat turbulensi aliran fluida dan menambah waktu tinggal (*residence time*), namun pemasangan sekat akan memperbesar *pressure drop* operasi dan menambah beban kerja pompa, sehingga laju alir fluida yang dipertukarkan panasnya harus diatur.



Gambar 2.10 Penukar panas jenis cangkang dan buluh

2.6.3 Penukar Panas Plate and Frame (*plate and frame heat exchanger*)

Alat penukar panas pelat dan bingkai terdiri dari paket pelat – pelat tegak lurus, bergelombang, atau profil lain. Pemisah antara pelat tegak lurus dipasang penyekat lunak (biasanya terbuat dari karet). Pelat – pelat dan sekat disatukan oleh suatu perangkat penekan yang pada setiap sudut pelat (kebanyakan segi empat) terdapat lubang pengalir fluida. Melalui dua dari lubang ini, fluida dialirkan masuk dan keluar pada sisi yang lain, sedangkan fluida yang lain mengalir melalui lubang dan ruang pada sisi sebelahnya karena ada sekat.



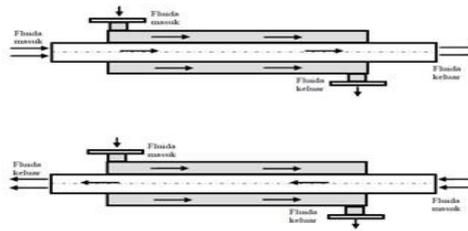
Gambar.2.11 Penukar panas jenis pelat and Frame

2.6.4 Penukar Kalor *Shell and Tube*

Alat penukar kalor jenis *shell and tube* adalah alat penukar kalor yang paling banyak digunakan dalam berbagai macam industri dan paling sederhana dibanding dengan alat penukar kalor lainnya, hal ini karena:

- a. Hanya terdiri dari sebuah *tube* dan *shell*, dimana *tube* terletak secara konsentrik yang berada di dalam *shell*.
- b. Kemampuannya untuk bekerja dalam tekanan dan temperatur yang tinggi.
- c. Kemampuannya untuk digunakan pada satu aliran volume yang besar.
- d. Kemampuannya untuk bekerja dengan fluida kerja yang mempunyai perbedaan satu aliran volume yang besar.
- e. Tersedia dalam berbagai bahan atau material.
- f. Kontruksi yang kokoh dan aman.
- g. Secara mekanis dapat beroperasi dengan baik dan handal (*reliability* tinggi).

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 1. Jika kedua fluida itu mengalir dalam arah yang berlawanan, maka penukar kalor ini bertipe aliran lawan (*counterflow*) gambar 2 (Kreith, 1997).



Gambar 2.12 Pola Aliran Searah (*parallel flow*) dan Berlawanan arah (*counter flow*)

2.7 Bilangan Reynolds

Bilangan *Reynolds* adalah parameter tidak berdimensi untuk menentukan apakah aliran yang terjadi laminar atau turbulen yang tergantung dari besarnya bilangan tersebut. Sebuah aliran dikatakan laminar 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 laminar 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 laminar atau turbulen ditunjukkan dengan bilangan *Reynolds* (Re) yang dituliskan dalam persamaan sebagai berikut: (Kreith, 1997).

Bilangan *Reynolds* untuk aliran dalam pipa dapat di definisikan dengan :

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (2-1)$$

dimana: ρ = kerapatan fluida (kg/m^3)

u = kecepatan aliran (m/s)

d = diameter pipa (m)

μ = viskositas dinamik (kg/m.s)

Sedang bilangan Nusselt untuk aliran yang sudah jadi atau berkembang penuh (*fully developed turbulent flow*) di dalam tabung licin dapat dituliskan dengan persamaan:

$$Nu_d = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.3} \quad (2-2)$$

dimana : Nu_d = Bilangan Nusselt

Re = Bilangan Reynolds

Pr = Bilangan Prandtl

2.8 Tekanan

Tekanan dinyatakan sebagai gaya persatuan luas. Untuk keadaan dimana gaya (F) terdistribusi merata atas suatu luas (A), maka:

$$P = \frac{F}{A} \quad (2-3)$$

dimana : P = tekanan fluida (Pa atau N/m^2)

F = gaya (N)

A = luas (m^2)

dengan :

ΔP = penurunan tekanan (N/m^2)

γ_{Hg} = berat jenis raksa (N/m^3)

γ_{air} = berat jenis air (N/m^3)

Δh = perbedaan ketinggian (m)

2.9 Koefisien Perpindahan Kalor Menyeluruh (U)

Besarnya koefisien perpindahan kalor menyeluruh suatu alat penukar kalor pipa ganda merupakan kebalikan dari tahanan keseluruhan. Tahanan keseluruhan terhadap perpindahan kalor ini adalah jumlah semua tahanan perpindahan panas pada alat penukar kalor pipa ganda. Tahanan ini meliputi tahanan konveksi fluida, tahanan konduksi karena tebal *tube*, efisiensi total permukaan luar, efisiensi total permukaan dalam.

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_o} + \frac{r_o}{k} + \frac{r_o}{h_i} + \frac{r_o}{U_{L}} + \frac{r_o}{U_{D}} \quad (2-4)$$

Dimana :

= diameter tube.

= efisiensi total untuk permukaan dalam.

= efisiensi total untuk permukaan luar

= luas permukaan luar total, dalam (m^2)

= luas permukaan dalam total, dalam (m^2)

= koefisien perpindahan kalor konveksi pada pipa bagian luar (w/m^2k)

= koefisien perpindahan kalor konveksi pada pipa bagian dalam (w/m^2k)

Koefisien perpindahan kalor pada masing-masing proses perpindahan kalor dapat dijabarkan sebagai berikut:

a) Koefisien perpindahan kalor konveksi pipa bagian dalam ()

$$h_i = \frac{k \cdot Nu}{D} \quad (2-5)$$

dimana:

Nu = bilangan Nuselt

k = konduktifitas termal (w/m^2)

= diameter hidrolis (m)

= _____

b) Koefisien perpindahan kalor konveksi pada bagian luar ()

$$h_o = \frac{k \cdot Nu}{D} \quad (2-5)$$

Dimana :

Nu = bilangan nuselt

K = Konduktifitas termal (w/m^2)

= diameter hidrolis (m)

= _____

c) Koefisien perpindahan kalor konveksi pada bagian luar ()

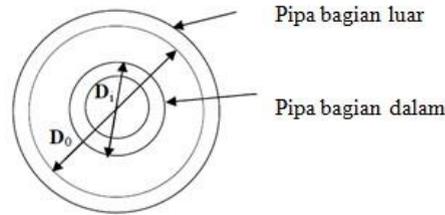
$$h_o = \frac{k \cdot Nu}{D} \quad (2-6)$$

Dimana Nu = bilangan nuselt

K = Konduktifitas termal (w/m^2)

= diameter hidrolis (m)

= _____



Gambar 2.13. Penukar kalor pipa ganda

Besar A_i dan A_o merupakan luas permukaan dalam dan luas tabung. jadi :

Luas permukaan untuk pipa dalam

$$= 2 \quad r_i \quad l \quad (2-7)$$

Luas permukaan untuk pipa luar

$$= \pi \quad D_o \quad l \quad (2-8)$$

Dimana ;

d_i = Diameter dalam pipa bagian dalam (m)

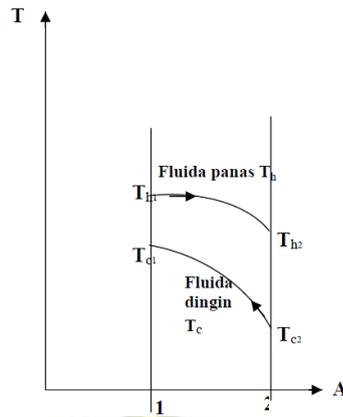
d_o = Diameter luar pipa sebelah dalam (m)

l = Panjang pipa penukar kalor (m)

2.10 Selisih Temperatur Logaritmik ()

Suhu fluida di dalam penukar panas pada umumnya tidak konstan, tetapi berbeda dari satu titik ke titik lainnya pada waktu panas mengalir dari fluida yang panas ke fluida yang dingin. Untuk tahanan termal yang konstan, laju aliran panas akan berbeda-beda sepanjang lintasan alat penukar panas, karena harganya tergantung pada beda suhu antara fluida yang panas dan fluida yang dingin pada

penampang tertentu. profil suhu pada alat penukar kalor pipa ganda berlawanan arah dapat diamati pada gambar da bawah ini.



Gambar 2.14 Temperatur untuk aliran berlawanan arah pada penukar kalor pipa ganda

Dari rumus diatas di dapatkan rumus untuk aliran berlawanan yaitu;

$$= \frac{(T_{h1} - T_{c1})}{\ln \left(\frac{T_{h1} - T_{c2}}{T_{h2} - T_{c1}} \right)} \quad (2-9)$$

Beda suhu ini disebut beda suhu rata-rata logaritmik (Log Mean Temperatur Difference= LMTD). Artinya beda suhu pada satu ujung penukar kalor dikurangi beda suhu pada ujung yang satu lagi dibagi dengan logaritma alamiah dari pada perbandingan kedua beda suhu tersebut. nilai kapasitas panas spesifik (c_p) fluida dingin dan panas konstan, tidak ada kehilangan panas ke lingkungan serta keadaan steady state, maka kalor yang dipindahkan :

$$q = U \cdot A \cdot T_{LMTD} \quad (2-10)$$

dimana :

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

A = luas perpindahan panas (m^2)

$$T_{LMTD} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)} \quad (\text{Log Mean Temperature Diffrens})$$

$$\Delta T_2 = T_{h1} - T_{c1}$$

$$\Delta T_1 = T_{h2} - T_{c2}$$

2.11 Efektifitas penukar kalor (E)

Efektifitas penukar kalor ialah perbandingan jumlah panas yang dipindahkan dengan jmlah panas maksimal yang dapat dipindahkan (Incovera.,2003)

$$= \frac{\dots}{\dots} \quad (2-11)$$

Perpindahan yang diharapkan dalam penelitian ini adalah perpindahan panas yang diterima air dingin :

$$\text{➤ } Q_{\text{air dingin}} = (m.cp)_{\text{udara dingin}} T_{co} - T_{ci} \quad (2-12)$$

Sedangkan perpindahan panas maksimum yang mungkin terjadi dalam heat exchanger ditentukan sebagai berikut :

➤ Jika $(m.cp)_{\text{air dingin}} > (m.cp)_{\text{air panas}}$, maka;

$$= (m.cp)_{\text{air panas}} (T_{hi} - T_{ci}) \quad (2-13)$$

➤ Jika $(m.cp)_{\text{air dingin}} < (m.cp)_{\text{air panas}}$, maka;

$$= (m.cp)_{\text{air dingin}} (T_{hi} - T_{ci}) \quad (2-14)$$

Perpindahan panas maksimum mungkin terjadi bila salah satu fluida mengalami perbedaan suhu terbesar beda suhu maksimum yang terdapat dalam

heat exchanger tersebut, yaitu selisih antara suhu masuk fluida panas dan fluida dingin. Fluida yang mungkin mengalami perbedaan suhu maksimum ini ialah fluida yang mempunyai nilai kapasitas panas (m.cp) minimum.

Dengan demikian efektifitas *heat exchanger* dalam penelitian adalah :

$$= \frac{(\quad)}{(\quad)} \quad (2-15)$$



