

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Perpindahan Panas

Perpindahan kalor (heat transfer) ialah ilmu untuk meramalkan perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan suhu di antara benda atau material. Pada termodinamika telah kita ketahui bahwa energi yang pindah itu dinamakan kalor (heat). Ilmu perpindahan kalor tidak hanya mencoba menjelaskan bagaimana energi kalor itu berpindah dari suatu benda ke benda lain, tetapi juga dapat meramalkan laju perpindahan yang terjadi pada kondisi - kondisi tertentu. Kenyataan di sini yang menjadi sasaran analisis ialah masalah laju perpindahan, inilah yang membedakan ilmu perpindahan kalor dari ilmu termodinamika. (Holman,1997)

Panas atau kalor merupakan suatu bentuk energi yang berpindah karena adanya perbedaan temperatur. Panas atau kalor tersebut akan bergerak dari temperatur tinggi ke temperatur yang lebih rendah. Ketika panas atau kalor bergerak maka akan terjadi pertukaran panas dan kemudian akan berhenti ketika kedua tempat tersebut sudah memiliki temperatur yang sama. (Cengel, 2003)

2.2 Mekanisme Perpindahan Panas

2.1.1. Konduksi

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 termal pada logam-logam padat terjadi akibat gerakan elektron yang terikat dan konduksi termal mempunyai hubungan dengan konduktivitas listrik. Pemanasan pada logam berarti pengaktifan gerakan

molekul, sedangkan pendinginan berarti pengurangan gerakan molekul. (Mc. Cabe, 1993)

2.1.2. Konveksi

Konveksi adalah pengangkutan kalor oleh gerak dari zat yang dipanaskan. Proses perpindahan kalor secara aliran/konveksi merupakan satu fenomena permukaan. Proses konveksi hanya terjadi di permukaan bahan. Keadaan permukaan dan keadaan sekelilingnya serta kedudukan permukaan itu adalah yang utama. Lazimnya, keadaan keseimbangan termodinamik di dalam bahan akibat proses konduksi, suhu permukaan bahan akan berbeda dari suhu sekelilingnya. (Kern, 1950)

2.1.3. Radiasi

Pada proses radiasi, 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. (Holman, 1997)

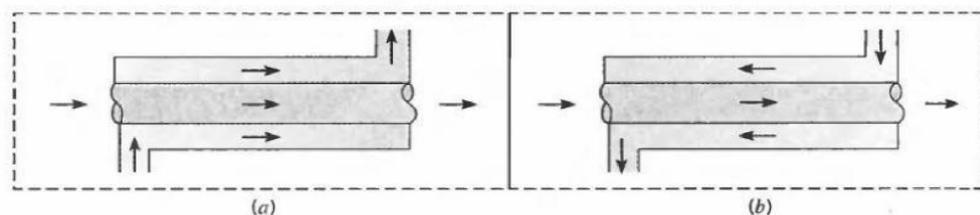
2.3 Alat Penukar Panas (*Heat Exchanger*)

Heat Exchanger merupakan peralatan yang digunakan untuk perpindahan panas antara dua atau lebih fluida. Banyak jenis *Heat Exchanger* yang dibuat dan digunakan dalam pusat pembangkit tenaga, unit pendingin, unit produksi udara, proses di industri, sistem turbin gas, dan lain lain. Dalam *heat exchanger* tidak terjadi pencampuran seperti dalam halnya suatu *mixing chamber*. Dalam radiator mobil misalnya, panas berpindah dari air yang panas yang mengalir dalam pipa radiator ke udara yang mengalir dengan bantuan fan.

Hampir disemua *heat exchanger*, perpindahan panas didominasi oleh konveksi dan konduksi dari fluida panas ke fluida dingin, dimana keduanya

dipisahkan oleh dinding. Perpindahan panas secara konveksi sangat dipengaruhi oleh bentuk geometri *heat exchanger* dan tiga bilangan tak berdimensi, yaitu bilangan Reynold, bilangan Nusselt dan bilangan Prandtl fluida. Besar konveksi yang terjadi dalam suatu *double-pipe heat exchanger* akan berbeda dengan *cros-flow heat exchanger* atau *compact heat exchanger* atau *plate heat exchanger* untuk berbeda temperatur yang sama. Sedang besar ketiga bilangan tak berdimensi tersebut tergantung pada kecepatan aliran serta *property* fluida yang meliputi massa jenis, viskositas absolut, panas jenis dan konduktivitas panas. (Cengel, 2003)

Alat penukar kalor (*Heat Exchanger*) secara tipikal diklasifikasikan berdasarkan susunan aliran (*flow arrangement*) dan tipe konstruksi. Penukar kalor yang paling sederhana adalah satu penukar kalor yang mana fluida panas dan dingin bergerak atau mengalir pada arah yang sama atau berlawanan dalam sebuah pipa berbentuk bundar (atau pipa rangkap dua). Pada susunan aliran sejajar (*parallel-flow arrangement*) yang ditunjukkan gambar 1(a) fluida panas dan dingin masuk pada ujung yang sama, mengalir dalam arah yang sama dan keluar pada ujung yang sama. Pada susunan aliran berlawanan (*counter flow arrangement*) yang ditunjukkan gambar 1(b), kedua fluida tersebut pada ujung yang berlawanan, mengalir dalam arah yang berlawanan, dan keluar pada ujung yang berlawanan.



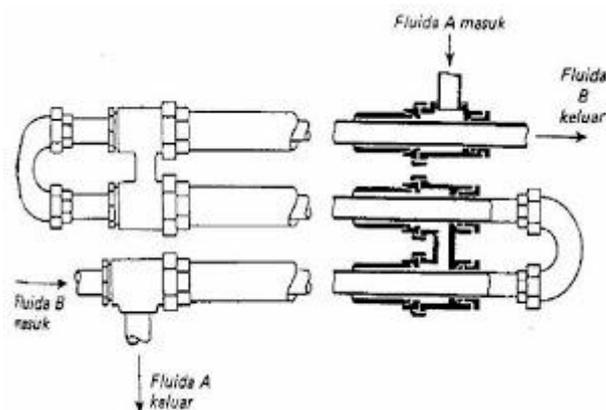
Gambar 1. Aliran Fluida pada Heat Exchanger

2.4 Tipe-tipe *Heat Exchanger*

1) Double pipe heat exchanger (Penukar panas pipa rangkap)

Salah satu jenis penukar panas dengan susunan pipa ganda. Dalam jenis penukar panas dapat digunakan berlawanan arah aliran atau searah arah aliran, baik dengan cairan panas atau dingin cairan yang terkandung dalam ruang annular dan cairan lainnya dalam pipa.

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 annulus 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 *shell and tube heat exchanger*.

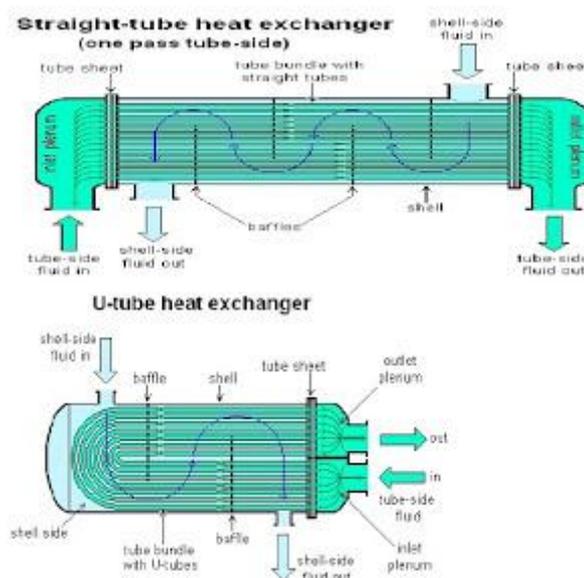


Gambar 2. *Double pipe heat exchanger*

2) Shell and tube heat exchanger (Penukar panas cangkang dan buluh)

Jenis ini merupakan jenis yang paling banyak digunakan dalam industri perminyakan. Alat ini terdiri dari sebuah *shell* (tabung/slinder besar) dimana

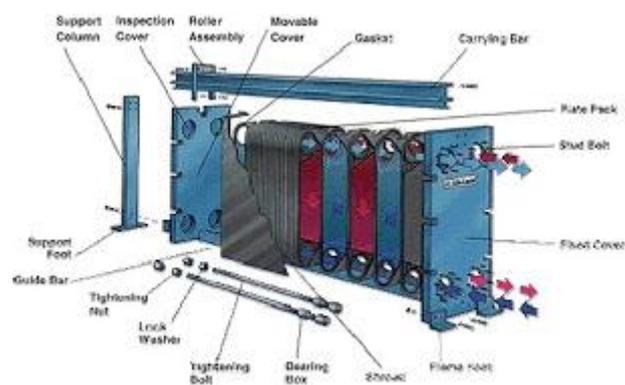
di dalamnya terdapat suatu *bundle* (berkas) pipa dengan diameter yang *relative* kecil. Satu jenis fluida mengalir di dalam pipa-pipa sedangkan fluida lainnya mengalir di bagian luar pipa tetapi masih di dalam *shell*. Alat penukar panas cangkang dan buluh terdiri atas suatu bundel pipa yang dihubungkan 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 3. *Shell and tube heat exchanger*

3) 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 10 (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 4. *Plate and frame heat exchanger*

2.5 Alat Penukar Panas Shell and Tube

Alat ini terdiri dari sebuah shell (tabung/slinder besar) dimana didalamnya terdapat suatu bundle (berkas) pipa dengan diameter yang relatif kecil. Satu jenis fluida mengalir didalam pipa-pipa sedangkan fluida lainnya mengalir dibagian luar pipa tetapi masih didalam shell. (Prastiyo S, 2014)

Komponen-komponen penyusun heat exchanger shell and tube adalah:

a. Shell

Shell merupakan badan dari heat exchanger, dimana terdapat 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) dan mengelilingi tube kemudian keluar melalui saluran keluar (outlet nozzle). Shell ini dapat dibuat dari pipa yang berukuran besar atau pelat logam yang dirol. (Prastiyo S, 2014)

b. Tube

Tube atau pipa merupakan bidang pemisah antara kedua jenis fluida yang mengalir didalamnya dan sekaligus sebagai bidang perpindahan panas. Selain itu bahan pipa tidak mudah terkorosi oleh fluida kerja. Bahan tube dapat diubah dari berbagai jenis logam, seperti besi, tembaga, perunggu, tembaga-nikel, aluminium perunggu, aluminium dan stainless steel. Diameter dalam tube merupakan diameter dalam actual dalam ukuran inch dengan toleransi yang sangat cepat. Ketebalan dan bahan pipa harus dipilih pada tekanan operasi fluida kerjanya. 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 tubenya. (Prastiyo S, 2014). Jenis-jenis tube pitch antara lain:

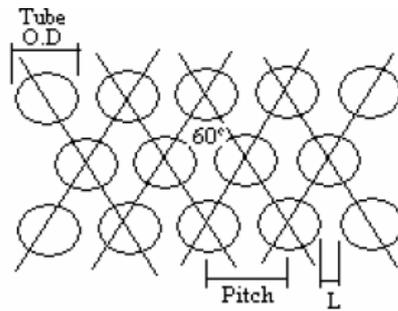
➤ *Triangular Pitch*

Keuntungan :

- Film koefisien lebih tinggi daripada square pitch.
- Dapat dibuat jumlah tube yang lebih banyak sebab susunannya kompak.

Kerugian :

- Pressure drop yang terjadi antara menengah ke atas.
- Tidak baik untuk fluida fouling.
- Pembersihan secara kimia. (Dwi Indra Wibawa,2014)



Gambar 5. *Triangular pitch*

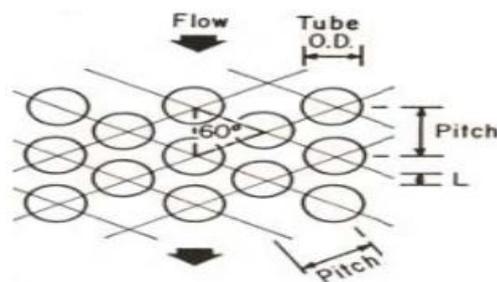
➤ *In-line Triangular Pitch (Rotated Triangular Pitch)*

Keuntungan :

- Film koefisennya tidak sebesar susunan triangular pitch, tetapi lebih besar dari susunan square pitch.
- Dapat digunakan pada fluida fouling

Kerugian :

- Pressure drop yang terjadi antara menengah ke atas.
- Pembersihan secara kimia. (Dwi Indra Wibawa,2014)



Gambar 6. *In-line triangular pitch*

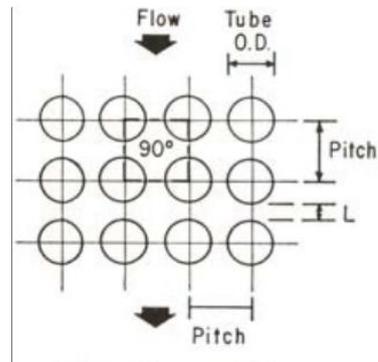
➤ *Square Pitch*

Keuntungan :

- Bagus untuk kondisi yang memerlukan pressure drop rendah.
- Baik untuk pembersihan luar tube secara mekanik.
- Baik untuk menangani fluuida fouling.

Kerugian :

- Film koefisiennya relatif rendah. (Dwi Indra Wibawa,2014)



Gambar 7. *Square pitch*

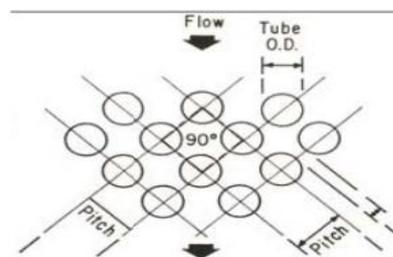
➤ *Diamond Square Pitch*

Keuntungan :

- Film koefisiennya lebih baik dari susunan square pitch, tetapi tidak sebaik triangular pitch dan rotated triangular pitch.
- Mudah untuk pembersihan dengan mekanik.
- Baik untuk fluida fouling.

Kerugian :

- Film koefisien relatif rendah.
- Pressure drop tidak serendah square pitch. (Dwi Indra Wibawa,2014)



Gambar 8. *Diamond square pitch*

c. Sekat (*Baffle*)

Adapun fungsi dari pemasangan sekat (*baffle*) pada heat exchanger ini antara lain adalah untuk:

- Sebagai penahan dari tube bundle .
- Untuk mengurangi atau menambah terjadinya getaran.
- Sebagai alat untuk mengarahkan aliran fluida yang berada di dalam tubes.

Ditinjau dari segi konstruksinya *baffle* dapat diklasifikasikan dalam empat kelompok, yaitu:

- sekat plat bentuk segmen.
- Sekat bintang (*rod baffle*).
- Sekat mendatar.
- Sekat impingement. (Dwi Indra Wibawa,2014)

d. Pass Divider

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

e. Tube Sheet

Tempat untuk merangkai ujung-ujung tube sehingga menjadi satu yang disebut tube bundle. HE dengan tube lurus pada umumnya menggunakan 2 buah tube sheet. Sedangkan pada tube tipe U menggunakan satu buah tube sheet yang berfungsi untuk menyatukan tube-tube menjadi tube bundle dan sebagai pemisah antara tube side dengan shell side. Tube sheet merupakan bagian yang penting pada penukar kalor. Bagian ini merupakan tempat disatukannya pipa-pipa pada bagian ujungnya. Tube sheet ini dibuat tebal dan pipa harus terpasang rapat tanpa bocor pada tube sheet. Dengan konstruksi fluida yang mengalir pada badan shell tidak akan tercampur dengan fluida yang

mengalir didalam tube. Penyambungan antaratube sheet dengan pipa merupakan hal yang paling penting untuk diperhatikan, karena segala kegagalan penyambungan ini akan menyebabkan kebocoran dan pencampuran kedua fluida di dalam penukar kalor. (Hariyanto D, 2016)

2.6 Perancangan Alat Penukar Kalor Tipe *Shell and Tube*

Sebelum mendesain alat penukar kalor, dibutuhkan data dari laju aliran, temperature masuk dan temperature keluar dan tekanan operasi kedua fluida. Data ini dibutuhkan terutama untuk fluida gas jika densitas gas tidak diketahui. Untuk fluida berupa cairan, data tekanan operasi tidak terlalu dibutuhkan karena sifat-sifatnya tidak banyak berubah apabila tekanannya berubah. Langkah-langkah yang biasa dilakukan dalam merencanakan atau mendesain 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 direncanakan 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 yang digunakan dengan menggunakan rumus :

$$A = Nt (\pi d_o) L, \text{ dimana}$$

d_o = 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 factor pengotornya apakah sesuai dengan standar yang diizinkan, dan penurunan tekanan di sisi tube dan shell.
(Bizzy dan Setiadi, 2013)

2.7 Bilangan Nusselt

Bilangan Nusselt adalah rasio pindah panas konveksi dan konduksi normal terhadap batas dalam kasus pindah panas pada permukaan fluida; bilangan Nusselt adalah satuan tak berdimensi yang dinamai menggunakan nama Wilhelm Nusselt. Komponen konduktif diukur di bawah kondisi yang sama dengan konveksi dengan kondisi fluida stagnan atau tidak bergerak. Aliran panas konduksi dan konveksi sifatnya sejajar satu sama lainnya dan terhadap permukaan normal terhadap bidang batas, sehingga

$$Nu_L = \frac{hL}{k_f} = \frac{\text{Koefisien pindah panas konvektif}}{\text{Koefisien pindah panas konduktif}}$$

di mana:

- $L =$ panjang karakteristik
- $k_f =$ konduktivitas termal fluida

- $h =$ koefisien pindah panas konvektif

Pemilihan panjang karakteristik harus searah dengan ketebalan dari lapisan batas. Contoh dari panjang karakteristik misalnya diameter terluar dari silinder pada aliran yang mengalir di luar silinder, tegak lurus terhadap aksis silinder. Selain itu, panjang papan vertikal terhadap konveksi alami yang bergerak ke atas dan diameter bola yang berada di dalam aliran konveksi juga merupakan panjang karakteristik. Untuk bangun yang lebih rumit, panjang karakteristik bisa dihitung dengan membagi volume terhadap luas permukaannya.

Untuk konveksi bebas, rataan bilangan Nusselt dinyatakan sebagai fungsi dari bilangan Rayleigh dan bilangan Prandtl. Dan untuk konveksi paksa, rataan bilangan Nusselt adalah fungsi dari bilangan Reynolds dan bilangan Prandtl. Hubungan empiris untuk berbagai geometri terkait konveksi menggunakan bilangan Nusselt didapatkan melalui eksperimen. Pindah massa terkait dengan bilangan Nusselt adalah bilangan Sherwood.

2.8 Bilangan Reynold

Dalam mekanika fluida, bilangan Reynolds adalah rasio antara gaya inersia (ρv^2) terhadap gaya viskos (μ/L) yang mengkuantifikasikan hubungan kedua gaya tersebut dengan suatu kondisi aliran tertentu.

Bilangan ini digunakan untuk mengidentifikasikan jenis aliran yang berbeda, misalnya laminar dan turbulen. Namanya diambil dari Osborne Reynolds (1842–1912) yang mengusulkannya pada tahun 1883. Bilangan Reynold merupakan salah satu bilangan tak berdimensi yang paling penting dalam mekanika fluida dan digunakan, seperti halnya dengan bilangan tak berdimensi lain, untuk memberikan kriteria untuk menentukan *dynamic similitude*. Jika dua pola aliran

yang mirip secara geometris, mungkin pada fluida yang berbeda dan laju alir yang berbeda pula, memiliki nilai bilangan tak berdimensi yang relevan, keduanya disebut memiliki kemiripan dinamis.

$$\text{Re} = \frac{\rho V_s L}{\mu} = \frac{V_s L}{\nu} = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Gaya Viskos}}$$

Dimana :

- v_s – kecepatan fluida,
 - L – panjang karakteristik,
 - μ – viskositas absolut fluida dinamis,
 - ν – viskositas kinematik fluida: $\nu = \mu / \rho$,
- ρ – kerapatan (densitas) fluida.