

## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Perpindahan Panas**

Ilmu perpindahan panas diperlukan untuk menganalisa proses perpindahan panas dari suatu benda lain atau dari suatu bagian benda ke bagian benda lainnya. Walaupun didalam termodinamika perpindahan energi dalam bentuk panas telah dipelajari, tetapi ilmu termodinamika tidak mampu memberikan suatu keterangan tentang cara berlangsungnya proses tersebut, lama waktu perpindahan panas, dan perubahan-perubahan temperatur yang terjadi didalam sistem. Termodinamika hanya membahas berdasarkan keadaan awal dan keadaan akhir dari proses dimana perpindahan energi dalam bentuk panas dipandang sebagai selisih antara energi yang dipunyai sistem pada keadaan awal dan akhir proses tersebut.

Pada dasarnya perpindahan panas terjadi akibat adanya ketidakseimbangan (adanya perbedaan temperatur) termal. Proses perpindahan panas yang sebenarnya terjadi adalah sangat rumit dan memerlukan pengkajian yang cukup sulit. Oleh karena itu dilakukan berbagai cara penyederhanaan dalam peninjauan proses tersebut yaitu dengan jalan memperhatikan hal – hal yang kurang berpengaruh terhadap proses keseluruhan. Dengan dasar penyederhanaan tersebut, maka mekanisme perpindahan panas dapat dibedakan atas tiga jenis yaitu : konveksi, konduksi, dan radiasi. (Frank Kreith dkk, 2003)

## **2.2 Mekanisme Perpindahan Panas**

### **2.2.1 Konduksi**

Konduksi adalah perpindahan kalor melalui satu jenis zat sehingga konduksi merupakan satu proses pendalaman karena proses perpindahan kalor ini hanya terjadi didalam bahan. Arah aliran energi kalor adalah dari titik bersuhu tinggi ke titik bersuhu rendah. (Dewitt, 2002)

### **2.2.2 Konveksi**

Proses perpindahan kalor secara aliran atau konveksi merupakan satu fenomena permukaan. Proses konveksi hanya terjadi dipermukaan bahan. Jadi dalam proses ini struktur bagian dalam bahan kurang penting. Keadaan permukaan dan keadaan sekelilingnya serta kedudukan permukaan itu adalah yang utama.

Konveksi hanya dapat terjadi melalui zat yang mengalir, maka bentuk pengangkutan kalor ini hanya terdapat pada zat cair dan gas. Pada pemanasan zat ini terjadi aliran, karena massa yang akan dipanaskan tidak sekaligus dibawa ke suhu yang sama tinggi. Oleh karena itu bagian yang paling banyak atau yang pertama dipanaskan memperoleh massa jenis yang lebih kecil daripada bagian massa yang lebih dingin. Sebagai akibatnya terjadi sirkulasi, sehingga kalor akhirnya tersebar pada seluruh zat. (Dewitt, 2002)

### **2.2.3 Radiasi**

Radiasi melibatkan perpindahan energi pancaran dari sumber ke penerima. Ketika radiasi diekluarkan dari sumber ke penerima, bagian dari energi tersedot oleh penerima dan dipantulkan olehnya.

Proses perpindahan kalor sering terjadi secara serentak. Misalnya sekeping plat yang dicat hitam kemudian dikenakan dengan sinar matahari. Plat akan menyerap sebagian energi matahari. Suhu plat akan naik ke satu tahap tertentu. Oleh karena suhu permukaan atas naik maka kalor akan berkonduksi dari permukaan atas ke permukaan bawah. Permukaan bagian atas kini mempunyai suhu yang lebih tinggi dari suhu udara sekeliling, maka jumlah kalor akan disebarkan secara konveksi. Tetapi energi kalor juga disebarkan secara radiasi. Dalam hal ini dua hal terjadi, ada kalor yang dipantulkan dan ada kalor yang dipindahkan ke sekeliling. (Kern, 1950)

### **2.3 Alat Penukar Panas (*Heat Exchanger*)**

Penukar kalor banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari dan di industri. Sebagai contoh dalam kehidupan sehari-hari sering dipergunakan peralatan masak memasak yang semuanya sebenarnya merupakan alat penukar kalor. Di dalam mobil maupun alat transportasi lainnya banyak dijumpai radiator maupun alat pengkondisi udara kabin, yang keduanya juga merupakan penukar kalor. Di industri, banyak sekali peralatan penukar kalor seperti ketel uap (boiler), pemanas lanjut (super heater), pendingin oli pelumas (oil cooler), kondenser (condenser), dan lain-lain.

Jika ditinjau dari fungsinya, semua penukar kalor sebenarnya sama fungsinya yaitu menukarkan energi yang dimiliki oleh suatu fluida atau zat ke fluida atau zat lainnya.

Secara umum ada 2 tipe penukar panas, yaitu:

a. Tipe kontak langsung

Tipe kontak langsung adalah tipe alat penukar kalor dimana antara dua zat yang dipertukarkan energinya dicampur atau dikontakkan secara langsung. Dengan demikian ciri khas dari penukar kalor seperti ini (kontak langsung) adalah bahwa kedua zat yang dipertukarkan energinya saling berkontak secara langsung (bercampur) dan biasanya kapasitas energi yang dipertukarkan relatif kecil.

b. Tipe tidak kontak langsung

Tipe tidak kontak langsung adalah tipe alat penukar kalor dimana antara kedua zat yang dipertukarkan energinya dipisahkan oleh permukaan bidang padatan seperti dinding pipa, pelat, dan lain sebagainya sehingga antara kedua zat tidak tercampur. Untuk meningkatkan efektivitas pertukaran energi, biasanya bahan permukaan pemisah dipilih dari bahan-bahan yang memiliki konduktivitas termal yang tinggi seperti tembaga dan aluminium. Dengan bahan pemisah yang memiliki konduktivitas termal yang tinggi diharapkan tahanan termal bahan tersebut akan rendah sehingga seolah-olah antara kedua zat yang saling dipertukarkan energinya seperti kontak langsung.

## **2.4 Jenis – Jenis Heat Exchanger**

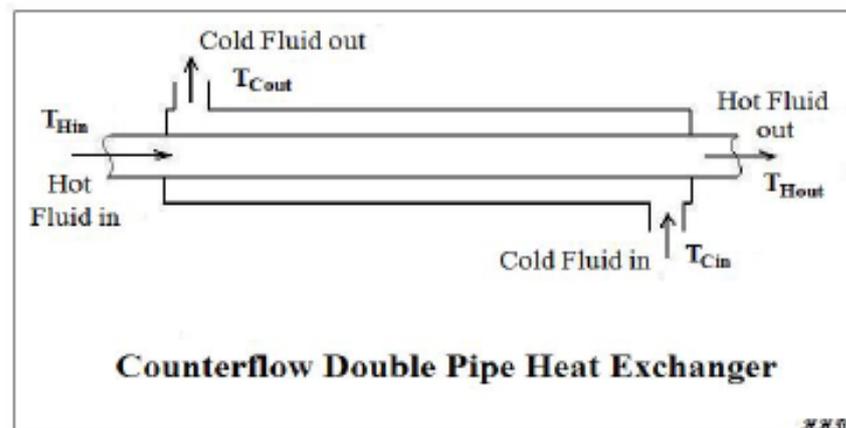
### **2.4.1 Berdasarkan Konstruksi**

a. 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.

Double pipe heat exchanger atau concentric tube heat exchanger yang ditunjukkan pada gambar dibawah di mana suatu aliran fluida dalam pipa mengalir dari titik A ke titik B, dengan space berbentuk U yang mengalir di dalam pipa. Cairan yang mengalir dapat berupa aliran co-current atau countercurrent. 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.



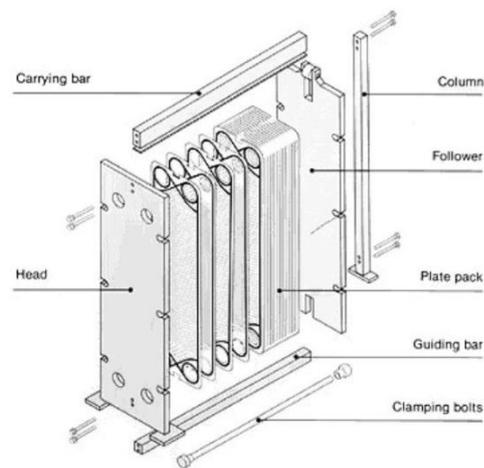
Gambar 1. Penukar panas pipa rangkap

b. Penukar panas plate and frame (plate and frame heat exchanger)

Alat penukar panas pelat dan bingkai 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

segiempat) 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.

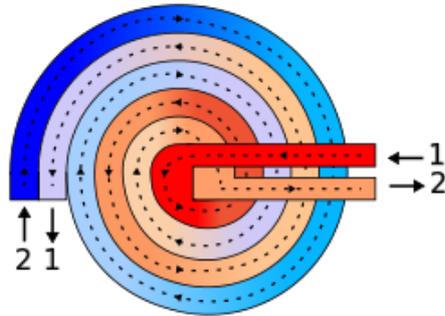
Heat exchanger jenis ini tidak cocok untuk digunakan pada tekanan fluida kerja yang tinggi, dan juga pada diferensial temperatur fluida yang tinggi pula.



Gambar 2. Penukar panas plate and frame

c. Tipe spiral (spiral heat exchanger)

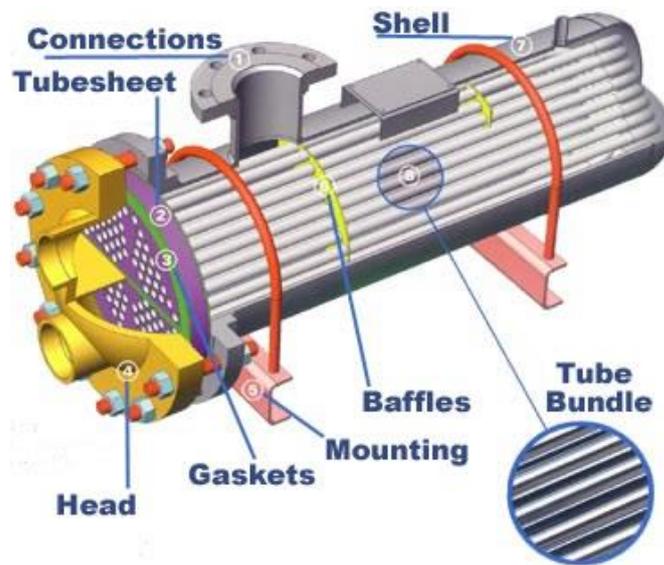
Penukar kalor tipe spiral arah aliran fluida menelusuri pipa spiral dari luar menuju pusat spiral atau sebaliknya dari pusat spiral menuju ke luar. Permukaan perpindahan kalor efektif adalah sama dengan dinding spiral sehingga sangat tergantung pada lebar spiral dan diameter serta berapa jumlah spiral yang ada dari pusat hingga diameter terluar.



Gambar 3. Penukar panas spiral

d. Tipe tabung dan pipa (*shell and tube heat exchanger*)

Jenis ini terdiri dari suatu tabung dengan diameter cukup besar yang di dalamnya berisi seberkas pipa dengan diameter relatif kecil. Alat penukar panas ini 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. 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 4. Penukar panas shell and tube

#### 2.4.2 Berdasarkan Susunan Aliran Fluida

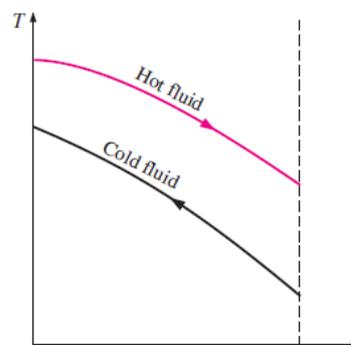
Berdasarkan susunan aliran fluida yang dimaksud di sini adalah berapa kali fluida mengalir sepanjang penukar kalor sejak saat masuk hingga meninggalkannya serta bagaimana arah aliran relatif antara kedua fluida (apakah sejajar/parallel atau berlawanan/bersilangan). Berdasarkan berapa kali fluida melalui penukar kalor dibedakan jenis satu laluan dan banyak laluan.

Pada jenis satu laluan, masih terbagi ke dalam tiga tipe berdasarkan arah aliran dari fluida yaitu:

##### a. Penukar kalor tipe aliran berlawanan

Penukar kalor tipe aliran berlawanan yaitu bila kedua fluida mengalir dengan arah yang saling berlawanan. Pada tipe ini masih mungkin terjadi bahwa temperatur fluida yang menerima kalor saat keluar penukar kalor lebih tinggi dibanding temperatur fluida yang memberikan

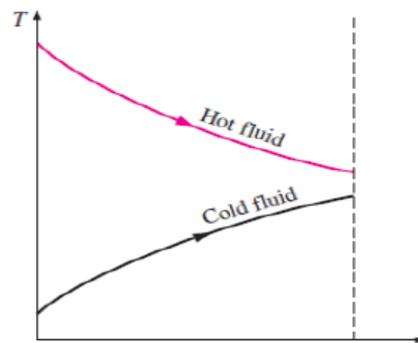
kalor saat meninggalkan penukar kalor. Bahkan idealnya apabila luas permukaan perpindahan kalor adalah tak berhingga dan tidak terjadi kebocoran kalor kelingkungan, maka temperatur fluida yang menerima kalor saat keluar dari penukar kalor bisa menyamai temperatur fluida yang memberikan kalor saat memasuki penukar kalor. Dengan teori seperti ini jenis penukar kalor berlawanan arah merupakan penukar kalor yang paling efektif.



Gambar 5. Penukar kalor tipe aliran berlawanan

b. Penukar kalor tipe aliran sejajar

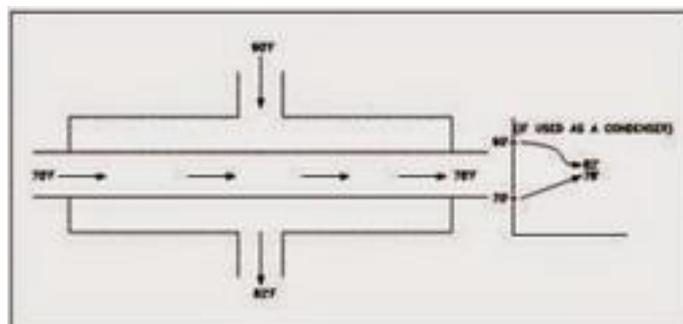
Penukar kalor tipe aliran sejajar yaitu bila arah aliran dari kedua fluida di dalam penukar kalor adalah sejajar. Artinya kedua fluida masuk pada sisi yang satu dan keluar dari sisi yang lain. Pada jenis ini temperatur fluida yang memberikan energi akan selalu lebih tinggi dibanding yang menerima energi sejak mulai memasuki penukar kalor hingga keluar. Dengan demikian temperatur fluida yang menerima kalor tidak akan pernah mencapai temperatur fluida yang memberikan kalor saat keluar dari penukar kalor. Jenis ini merupakan penukar kalor yang paling tidak efektif.



Gambar 6. Penukar kalor tipe aliran sejajar

c. Penukar kalor dengan aliran silang

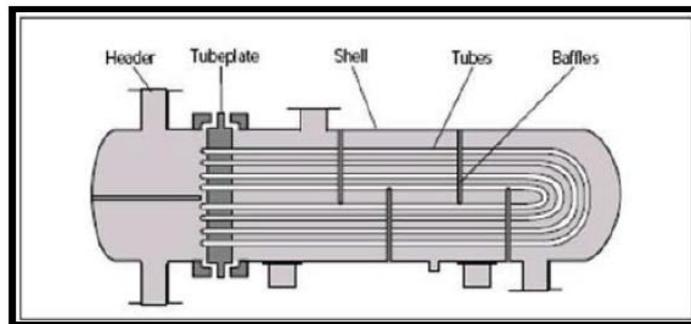
Penukar kalor dengan aliran silang yaitu bila arah aliran kedua fluida saling bersilangan. Apabila ditinjau dari efektivitas pertukaran energi, penukar kalor jenis ini berada diantara kedua jenis di atas. Contoh yang sering ditemui adalah radiator mobil dimana arah aliran air pendingin mesin yang memberikan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



Gambar 7. Penukar kalor tipe aliran silang

## 2.5 Alat Penukar Panas 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 didalam suatu shell. Satu fluida mengalir di dalam tube sedang fluida yang lain mengalir di ruang antara bundle tube dan shell.

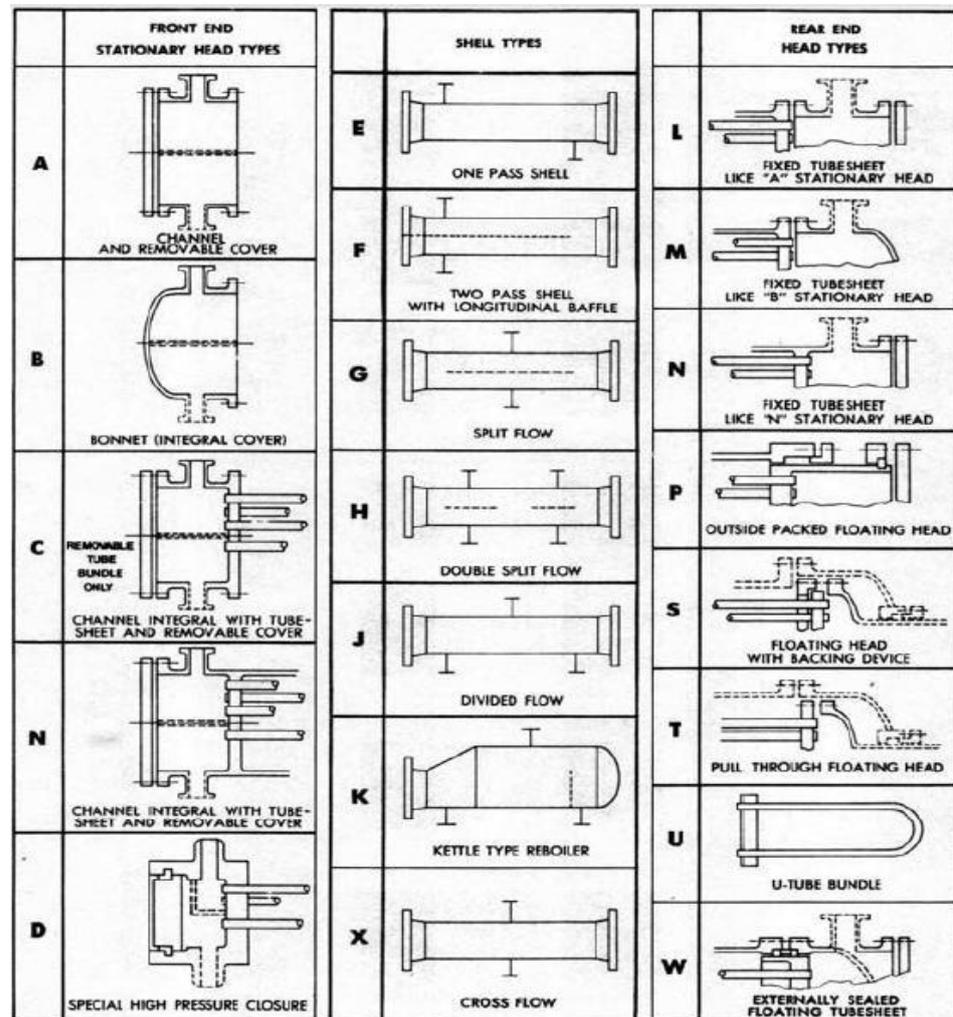


Gambar 8. Bagian heat exchanger tipe U-Bend

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 bagian dalam shell dan mengelilingi tube kemudian keluar melalui saluran keluar (outlet nozzle).



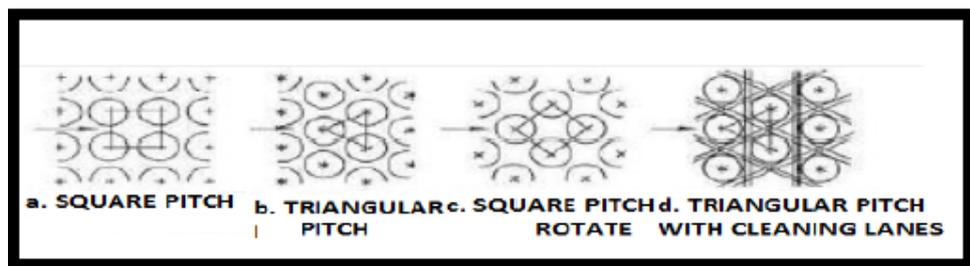
Gambar 9. Jenis shell berdasarkan TEMA

## b. Tube

Diameter dalam tube merupakan diameter dalam actual 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 tubenya. Jenis-jenis tube pitch yang utama adalah :

1. Square pitch
2. Triangular pitch
3. Square pitch rotated
4. Triangular pitch with cleaning lanes



Gambar 10. Jenis – jenis tube pitch

c. Baffle

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.

## 2.6 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 perkiraan 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 Perhitungan Nilai Efektivitas Heat Exchanger

Untuk menentukan efektivitas dari penukar panas kita perlu menemukan perpindahan panas maksimum yang mungkin yang dapat diduga dicapai dalam penukar panas kontra-aliran panjang tak terbatas. Oleh karena itu salah satu cairan akan mengalami perbedaan suhu maksimum yang mungkin, yang merupakan perbedaan suhu antara suhu masuk dari arus panas dan suhu inlet aliran dingin. Hasil metode dengan menghitung harga kapasitas panas (laju aliran massa yaitu dikalikan dengan panas spesifik  $C_h$  dan  $C_c$  untuk cairan panas dan dingin masing-masing, dan yang menunjukkan yang lebih kecil sebagai  $C_{min}$ . Alasan untuk memilih tingkat kapasitas panas yang lebih kecil adalah untuk menyertakan perpindahan panas maksimum antara cairan bekerja selama perhitungan.

Untuk mendefinisikan efektivitas suatu penukar kalor, laju perpindahan kalor maksimum yang mungkin terjadi,  $q_{max}$  untuk penukar kalor itu harus ditentukan terlebih dahulu.

Untuk menentukan laju perpindahan kalor maksimum pada suatu penukar kalor, pertama tama harus dipahami terlebih dahulu bahwa nilai maksimum akan

didapat bila salah satu fluida mengalami perubahan temperatur sebesar beda temperatur maksimum yang terdapat dalam penukar kalor itu, yaitu selisih antara temperatur masuk fluida panas ( $T_{hi}$ ) dan fluida dingin ( $T_{ci}$ ). Fluida yang mengalami beda temperatur maksimum adalah fluida yang kapasitas kalornya minimum, karena kesetimbangan energi menyaratkan bahwa energi yang diterima oleh fluida satu harus sama dengan energi yang dilepaskan oleh fluida yang satu lagi. Jika fluida yang mempunyai nilai kapasitas yang lebih besar mengalami beda temperatur maksimum, maka fluida yang satu lagi akan mengalami perubahan temperatur yang lebih besar dari maksimum, dan ini tentu saja tidak mungkin.

Efektifitas suatu penukar kalor didefinisikan sebagai rasio antara laju perpindahan kalor sebenarnya untuk suatu penukar kalor terhadap laju perpindahan kalor maksimum yang mungkin. Secara umum efektifitas dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{maks}}$$