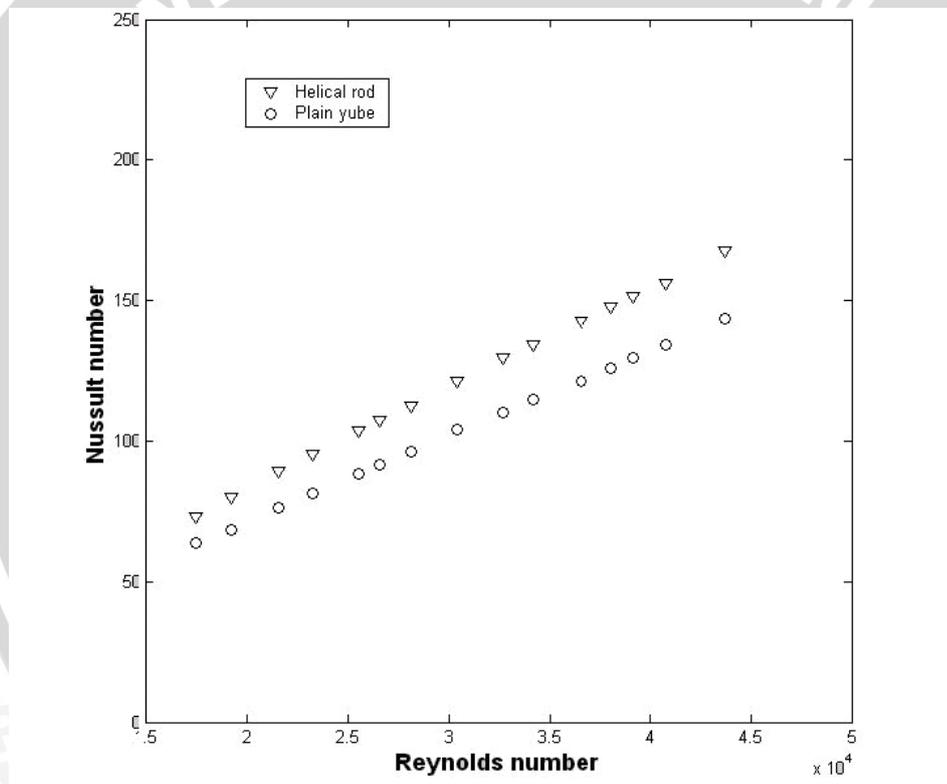


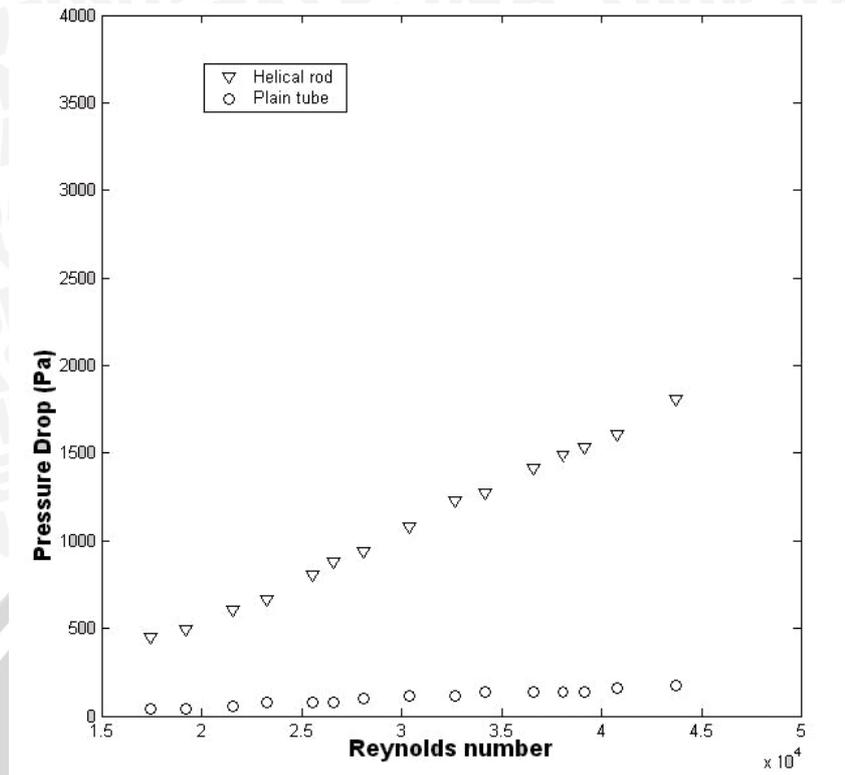
## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1 Penelitian Sebelumnya

Eiamsa-ard, dkk (2007) melakukan penelitian eksperimental dengan membandingkan laju perpindahan kalor dan kehilangan tekanan, tanpa menggunakan *helical-rod* dan *helical-rod*. Diameter pipa *double tube heat exchanger* adalah diameter dalam 40 mm dan diameter luar 65 mm, tebal 1 mm dengan panjang 2000 mm. Sedangkan jarak pitch *helical-rod* 1 = 3 mm. Hasil penelitian didapatkan bahwa dengan penambahan *helical-rod* akan mempengaruhi laju perpindahan kalor serta kehilangan tekanan yang cenderung meningkat jika dibandingkan tanpa menggunakan *helical-rod*. Hal ini sesuai dengan gambar 2.1 dan 2.2 dibawah.

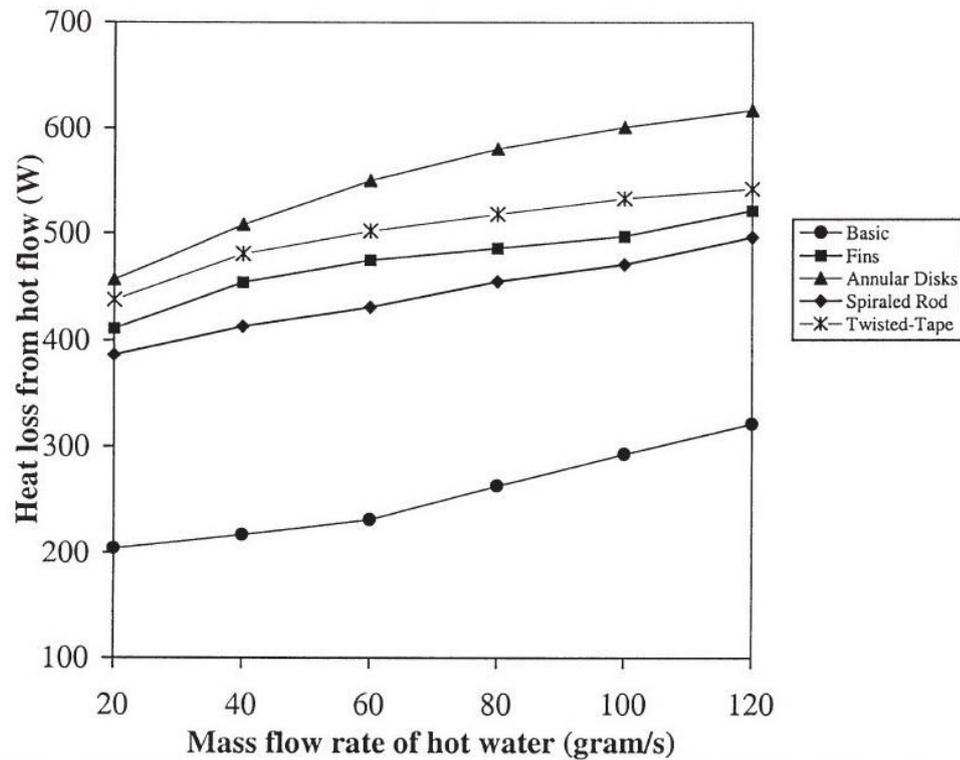


Gambar 2.1 Hubungan antara *Reynolds number* terhadap *Nusselt number*  
Sumber : Eiamsa-ard, dkk (2007)



Gambar 2.2 Hubungan antara *Reynolds number* terhadap *pressure drop*  
Sumber : Eiamsa-ard, dkk (2007)

Hosni (2003) melakukan penelitian yang dilakukan dengan membandingkan empat jenis turbulator. Turbulator yang digunakan adalah *Fin mixer*, *spiraled rod*, *twisted strip* dan *angular disk* dengan aliran berlawanan (*counter flow*) dengan diameter pipa dalam 14,35 mm, tebal 1,5 mm, diameter pipa luar 15,875 mm dan diameter luar pipa aliran dingin 40,13 mm berbahan PVC. Temperatur masuk air dingin dijaga 20°C dan temperatur air panas dijaga 70°C. Penelitian tersebut menyimpulkan bahwa semakin besar massa alir fluida menyebabkan koefisien perpindahan panas semakin tinggi.

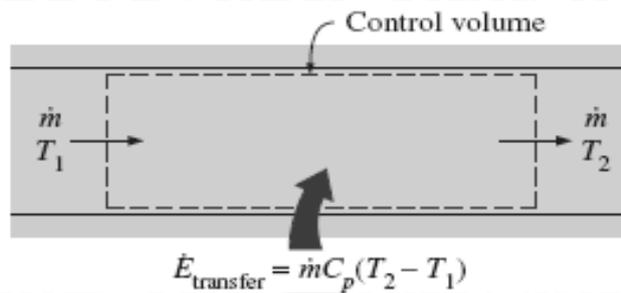


Gambar 2.3 Hubungan antara massa alir terhadap *heat loss*  
Sumber : Hosni (2003: 7)

## 2.2 Energi Kalor

Energi kalor adalah energi yang menunjukkan tingkat kecepatan gerak acak dari atom-atom atau molekul penyusun suatu benda. Pada suatu benda kalor akan bergerak dari bagian bersuhu tinggi ke bagian yang mempunyai temperatur yang rendah. Temperatur pada suatu benda dapat mengindikasikan besarnya tingkat energi kalor. Secara mikroskopis, temperatur menunjukkan energi kalor yang dimiliki oleh suatu benda. Semakin tinggi kecepatan gerak acak dari atom-atom atau molekul penyusun suatu benda, maka semakin tinggi temperatur benda tersebut, sehingga energi kalor yang dimiliki oleh benda tersebut juga akan semakin tinggi.

Fluida yang mengalir steady di dalam suatu sistem dengan volume tertentu dimana terdapat satu inlet dan outlet maka laju aliran massa fluida yang masuk akan sama dengan laju aliran massa fluida keluar atau  $m_{in} = m_{out} = m$  jika fluida tersebut tidak melakukan kerja maka besarnya energi kalor yang ditansfer oleh suatu fluida akan sama dengan perubahan energi yang terdapat pada sistem tersebut. hal ini dapat dilihat pada gambar 2.4 berikut ini.



Gambar 2.4 Transfer energi kalor pada sistem dengan *control volume*  
Sumber : Cengel, (2003:17)

Besarnya laju energi kalor pada sistem tersebut dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$q = \dot{m} \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (\text{Cengel, 2003:17}) \quad (2-1)$$

Dimana :

$q$  = laju energi kalor (W)

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

$C_p$  = Kalor spesifik pada tekanan konstan (J/kg.K)

$\Delta T$  = Beda temperatur saluran masuk dan keluar (K)

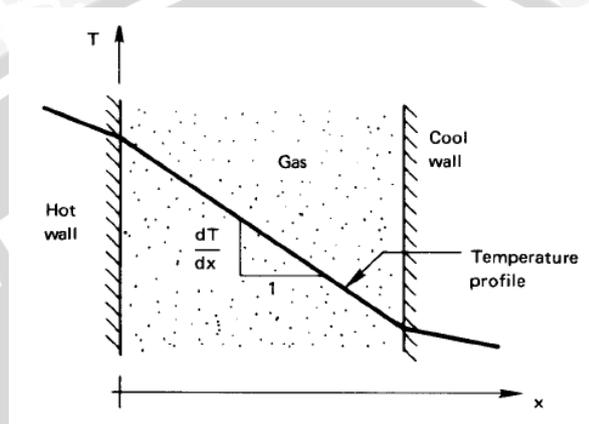
## 2.3 Perpindahan Kalor

Jika pada suatu benda terdapat gradien suhu, maka akan terjadi perpindahan energi kalor dari bagian benda yang bertemperatur tinggi ke bagian benda yang bertemperatur rendah hingga dan akan berhenti . Perpindahan kalor dapat didefinisikan sebagai *transfer* energi dari suatu sistem ke sistem lainnya sebagai akibat dari perbedaan temperatur, baik melalui perantara ataupun tanpa perantara. Mekanisme perpindahan kalor dapat terjadi dengan tiga macam cara, yaitu konduksi, konveksi dan radiasi. Dalam penelitian ini, perpindahan kalor yang terjadi yaitu konduksi dan konveksi.

### 2.3.1 Perpindahan Kalor Konduksi

Perpindahan kalor konduksi adalah proses perpindahan kalor dari suatu bagian yang bertemperatur tinggi ke sistem yang bertemperatur lebih rendah didalam satu medium (padat, cair atau gas) tanpa disertai perpindahan partikel. Menurut teori kinetik, temperatur elemen suatu zat sebanding dengan energi kinetik rata-rata molekul-molekul yang membentuk elemen itu. Energi yang dimiliki oleh suatu elemen zat yang disebabkan oleh kecepatan dan posisi relatif molekul-molekulnya disebut energi dalam.

Jadi, semakin cepat molekul-molekul bergerak maka semakin tinggi temperatur maupun energi dalam elemen zat. Perpindahan energi tersebut dapat berlangsung dengan tumbukan (*collision*) terjadi pada fluida atau dengan pembauran (difusi) elektron-elektron yang bergerak lebih cepat dari sistem yang bertemperatur tinggi ke sistem yang bertemperatur lebih rendah, seperti yang terjadi pada logam. Contoh dari perpindahan kalor konduksi dalam satu medium gas dimana terjadi perpindahan kalor dari temperatur tinggi ke temperatur rendah dapat terlihat pada gambar 2.5 di bawah ini.



Gambar 2.5 Perpindahan kalor konduksi  
Sumber : Lienhard, (2005:14)

Hubungan dasar perpindahan kalor dengan cara konduksi dikemukakan oleh J.B.J. Fourier pada tahun 1822, yaitu besarnya  $q_k$ , laju perpindahan kalor konduksi merupakan hasil kali dari tiga buah besaran, yaitu :

1.  $k$ , konduktivitas *thermal* bahan (Watt/m.°C).
2.  $A$ , luas panas dimana panas mengalir dengan cara konduksi dan harus diukur tegak lurus terhadap arah aliran panas (m<sup>2</sup>).
3.  $dT/dx$ , gradien temperatur pada penampang tersebut, yaitu laju perubahan suhu  $T$  terhadap jarak dalam arah aliran panas  $x$  (°C/m).

secara matematis dapat ditulis :

$$q_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{Kreith, 1987:7}) \quad (2-2)$$

Tanda (-) menunjukkan kenyataan bahwa aliran kalor dengan konduksi terjadi ke arah gradient temperatur yang menurun.

Konduktivitas *thermal* merupakan suatu konstanta proporsional yang didefinisikan sebagai besarnya kalor yang dapat dihantarkan oleh material dalam waktu

satu detik tiap satu satuan panjang (tebal) bila antar ujung-ujungnya terjadi perbedaan temperatur [ $1\text{ }^{\circ}\text{K}$ ].

### 2.3.2 Perpindahan Kalor Konveksi

Perpindahan kalor konveksi adalah proses *transfer* energi pada fluida yang merupakan gabungan dari perpindahan kalor konduksi dan gerakan pencampuran fluida. Perpindahan energi dengan cara konveksi dari suatu permukaan yang suhunya diatas suhu fluida sekitarnya berlangsung dengan beberapa tahap. Pertama, panas 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 ini. Kemudian partikel-partikel fluida tersebut akan bergerak ke daerah yang bersuhu lebih rendah di dalam fluida dimana akan bercampur dengan memindahkan sebagian energinya kepada partikel-partikel fluida lainnya. Dalam hal ini alirannya adalah aliran fluida maupun energi. Energi sebenarnya disimpan di dalam partikel-partikel fluida dan diangkut oleh gerakan massa partikel-partikel tersebut.

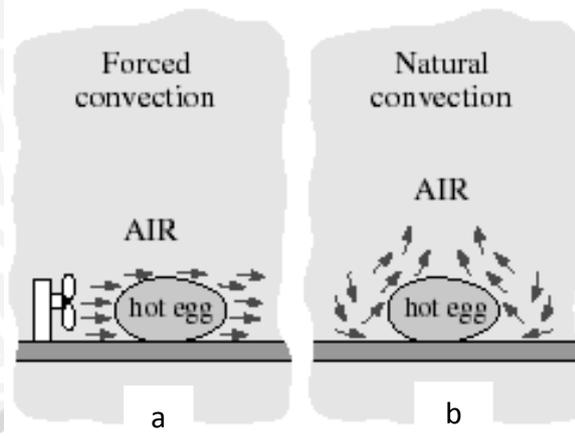
Secara umum perpindahan kalor konveksi dapat dibedakan menjadi dua yaitu :

1. Konveksi bebas (*free convection*)

Pada konveksi bebas gerakan perpindahan fluida terjadi karena adanya perbedaan densitas atau kerapatan fluida yang disebabkan oleh adanya perbedaan atau gradien temperatur. Proses ini terjadi secara alamiah sehingga sering disebut konveksi alamiah (*natural convection*). Ilustrasi natural convection dapat dilihat pada gambar 2.6 B berikut.

2. Konveksi paksa (*forced convection*)

Pada konveksi paksa fluida dipaksa bergerak oleh adanya gaya atau energi dari luar, misalnya oleh pompa atau kipas (*fan*). *Transfer* kalor yang dihasilkan akan lebih tinggi daripada konveksi bebas. Ilustrasi forced convection dapat dilihat pada gambar 2.6 A berikut.



Gambar 2.6 Perpindahan kalor konveksi : (a) konveksi paksa (b) konveksi ilmiah.  
Sumber : Cengel, (2003:30)

Besarnya laju perpindahan kalor konveksi dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$q_{conv} = h_c A (T_s - T_\infty) \quad (\text{Cengel, 2003:351}) \quad (2-3)$$

Dimana :

$q_{conv}$  = Laju perpindahan kalor konveksi (W)

$h_c$  = Koefisien perpindahan kalor konveksi ( $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ )

$A$  = Luas permukaan perpindahan kalor ( $\text{m}^2$ )

$T_s$  = Temperatur permukaan benda ( $^\circ\text{C}$ )

$T_\infty$  = Temperatur fluida pada jarak tertentu dari permukaan benda ( $^\circ\text{C}$ )

## 2.4 Analisa Aliran

Perpindahan kalor konveksi tergantung pada keadaan aliran, lapisan batas dan keadaan suatu aliran (bersifat turbulen atau laminar). Cara menentukan keadaan suatu aliran bersifat laminar atau turbulen, yaitu dengan mengetahui besarnya angka *Reynold* dari aliran tersebut.

### 2.4.1 Aliran Laminar

Aliran laminar adalah aliran dengan fluida yang bergerak dalam lamina-lamina atau pada garis aliran (*streamline*), dengan satu lapisan bergerak mengikuti lintasan secara lancar pada lapisan.. Partikel-partikel fluida dalam masing-masing lapisan masih tetap ada dalam urutan yang teratur tanpa saling mendahului.

Perpindahan momentum dan massa dalam aliran ini terjadi secara molekular dalam skala submikroskopis dari lapisan yang mempunyai kecepatan yang relatif tinggi menuju ke lapisan lain yang memiliki kecepatan yang relatif lebih rendah.

Kecenderungan aliran laminar menjadi turbulen masih dapat diredam oleh gaya-gaya viskos yang memberikan hambatan terhadap gerak relatif lapisan-lapisan fluida. Pada aliran laminar partikel-partikel fluida bergerak secara berurutan mengikuti pola aliran yang mulus (*smooth streamline*) dan memiliki kecepatan yang tetap.

Untuk aliran laminar nilai angka *Reynolds* adalah :

$$Re < 5 \cdot 10^5 \quad \text{untuk aliran eksternal (Cengel, 2001:745)}$$

$$Re < 2300 \quad \text{untuk aliran internal (Cengel, 2001:512)}$$

#### 2.4.2 Aliran Turbulen

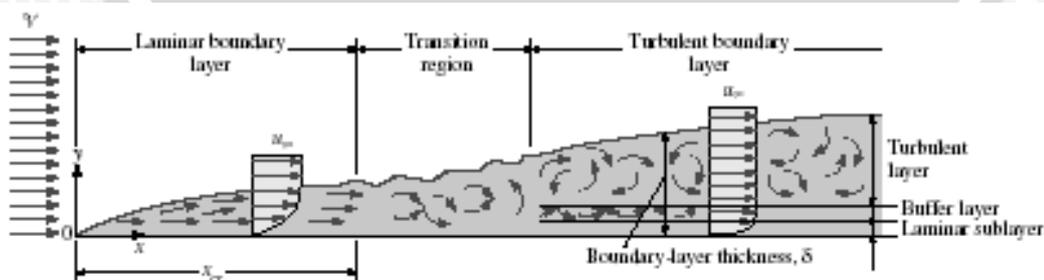
Aliran turbulen adalah aliran yang mempunyai gerakan – gerakan partikel yang bergerak secara acak dan sangat tidak menentu karena mengalami percampuran serta putaran partikel antar lapisan, dan saling tukar momentum. Pada aliran ini lapisan-lapisan fluida tidak terlihat lagi sehingga aliran fluida dibayangkan sebagai bongkahan-bongkahan fluida. Pergerakan dari bongkahan-bongkahan fluida tersebut terjadi secara acak, sehingga proses perpindahan momentum dan massa terjadi secara makroskopis. Partikel-partikel bongkahan fluida berfungsi sebagai pembawa energi dan memindahkan energi dengan cara bercampur dengan partikel-partikel lain dari fluida tersebut. Semakin cepat gerakan fluida tersebut, maka akan semakin besar energi yang dapat dipindahkan ke daerah bertemperatur lebih rendah.

Besar angka *Reynolds* untuk aliran turbulen adalah :

$$Re > 5 \cdot 10^5 \quad \text{untuk aliran eksternal (Cengel, 2001:745)}$$

$$Re > 4000 \quad \text{untuk aliran internal (Cengel, 2001:512)}$$

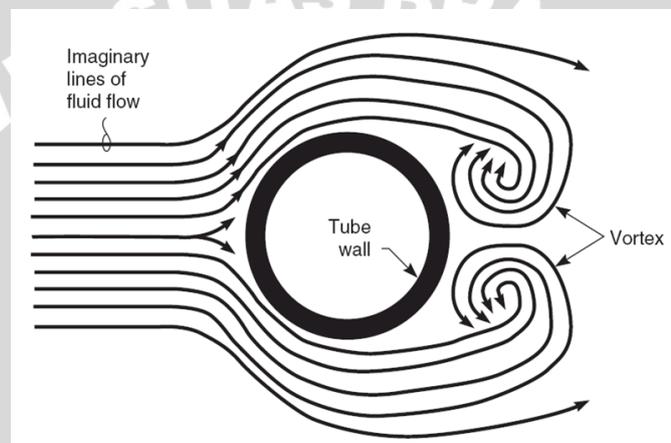
Pada aliran fluida, sebelum menjadi aliran turbulen maka aliran akan mengalami proses transisi. Transisi terjadi karena diatas bilangan reynold tertentu aliran laminar menjadi tidak stabil. Untuk aliran *internal*, aliran transisi dari aliran laminar ke aliran turbulen terjadi pada angka *Reynolds* antara 2300 – 4000. Proses transisi dari laminar menjadi turbulen dapat dilihat pada gambar 2.7 dibawah ini.



Gambar 2.7 Proses berkembangnya aliran di atas plat (aliran *eksternal*)  
Sumber : Cengel (2003:353)

### 2.4.3 Vortex

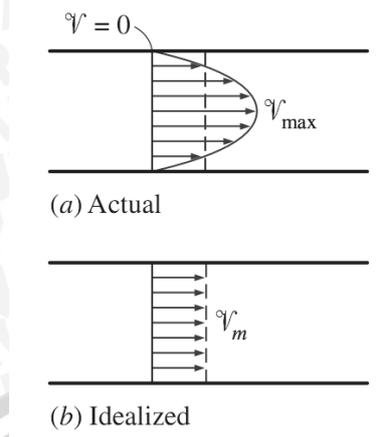
*Vortex* adalah gerakan fluida cair atau gas dimana partikel-partikelnya bergerak berputar. Partikel fluida yang bergerak berputar disebabkan oleh adanya perbedaan kecepatan dan perubahan luas penampang antar lapisan-lapisan fluida yang berdekatan sehingga menimbulkan gaya-gaya yang menyebabkan puntiran. *Vortex* dibagi menjadi dua yaitu *vortex* paksa dan *vortex* bebas. *Vortex* paksa mekanisme pembentukannya melibatkan energi dari luar, misalnya fluida yang diaduk dalam wadah. Sedangkan *vortex* bebas terjadi akibat gerakan internalnya sendiri, misalnya pusaran air di sungai dan pusaran di belokan pipa akibat adanya aliran sekunder, seperti ditunjukkan pada gambar 2.8 dibawah ini.



Gambar 2.8 Vortex atau pusaran akibat adanya penghalang atau turbulator  
Sumber : *Tube Side vs Shell Side*, anonymous

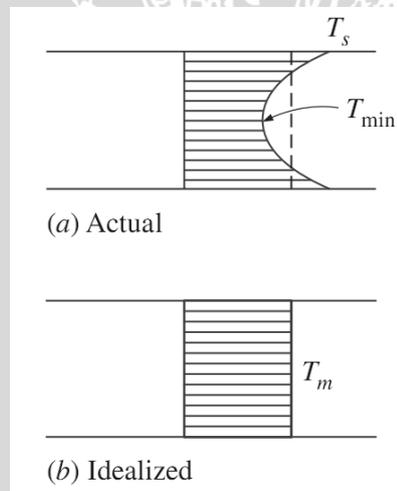
### 2.4.4 Aliran Dalam Pipa

Jika suatu fluida dalam pipa dialirkan secara paksa untuk mencapai besar perpindahan kalor tertentu dengan menggunakan pompa, fan dan alat peningkat kecepatan aliran fluida lainnya maka akan terbentuk lapisan batas kecepatan serta lapisan batas *thermal*. Profil kecepatan fluida yang mengalir dalam pipa akan terbentuk dari kecepatan nol pada permukaan pipa hingga mencapai kecepatan maksimum pada pusat pipa, seperti ditunjukkan pada gambar 2.9 dibawah ini.



Gambar 2.9 Distribusi kecepatan fluida dalam pipa  
 Sumber: Cengel (1998:421)

Pada profil temperatur fluida, jika temperatur permukaan dinding pipa lebih kecil dari temperatur fluida maka temperatur fluida pada arah melintang akan berubah dari  $T_s$  pada permukaan dinding pipa hingga menjadi maksimum pada pusat pipa sedangkan jika temperatur permukaan dinding pipa lebih besar dari temperatur fluida maka temperatur fluida pada arah melintang akan berubah dari temperatur  $T_s$  pada permukaan dinding pipa hingga menjadi minimum pada pusat pipa. Hal ini sesuai dengan gambar 2.10 berikut.



Gambar 2.10 Distribusi temperatur fluida yang mengalir dalam pipa  
 Sumber: Cengel (1998:421)

**2.4.5 Lapisan Batas**

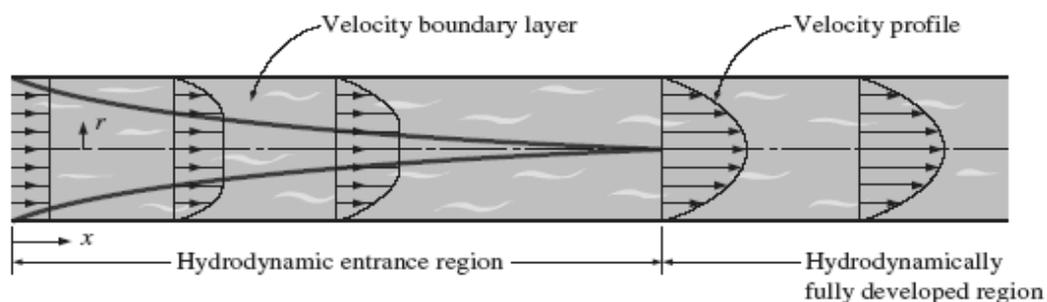
Fluida yang mengalir sepanjang suatu permukaan, baik aliran laminar atau turbulen gerakan partikel-partikel didekat permukaan diperlambat oleh gaya-gaya viskos. Partikel-partikel fluida yang berbatasan dengan permukaan melengket dengan permukaan tersebut memiliki kecepatan nol relatif. Pengertian dari lapisan batas pada

hakekatnya dibagi menjadi dua wilayah yaitu pertama adalah sebuah lapisan tipis yang menutupi permukaan benda dimana gradient kecepatan besar dan gaya-gaya viskos besar dan kedua adalah sebuah daerah diluar lapisan yang mana kecepatan hampir sama dengan harga aliran bebasnya dan pengaruh viskositas dapat diabaikan ( Kreith 1992 : 310 ). Dengan kita memahami lapisan batas aliran kita dapat mengetahui pengaruh viskositas dalam aliran, serta dapat menghitung hambatan gesek ( *frictional-drag* ), dan juga pengaruh terhadap laju perpindahan kalor khususnya perpindahan kalor secara konveksi.

#### 2.4.5.1 Lapisan Batas Hidrodinamik

Lapisan batas hidrodinamik merupakan suatu daerah dimana gaya-gaya viskos fluida berpengaruh pada kecepatan fluida. Bentuk profil kecepatan di dalam lapisan batas tergantung pada jenis alirannya. Sebagai contoh pada saat suatu aliran melewati sebuah pelat datar yang ditempatkan dengan permukaannya sejajar terhadap aliran. Pada tepi depan plat, hanya partikel-partikel fluida yang langsung bersinggungan dengan permukaan tersebutlah yang menjadi lambat gerakannya. Sedangkan fluida selanjutnya akan terus bergerak dengan kecepatan aliran bebas (*free stream*) yang tidak terganggu di depan plat. Dengan majunya fluida sepanjang plat, gaya-gaya geser menyebabkan semakin banyak fluida yang terhambat dan tebal lapisan batas meningkat. Jika tebal lapisan batas hidrodinamik pada pipa sudah mencapai pusat pipa, maka aliran dalam pipa tersebut disebut aliran berkembang penuh (*fully developed flow*).

Tebal lapisan batas hidrodinamik di dalam pipa merupakan jarak dari permukaan sampai titik dimana kecepatan lokal mencapai 99% dari kecepatan luar (Kreith,1991:310). Kecepatan aliran fluida berubah dari kecepatan nol pada permukaan pipa kemudian mencapai maksimum pada pusat pipa. Pertumbuhan lapisan batas serta profil-profil kecepatan dalam pipa ditunjukkan pada gambar 2.11 dibawah ini.



Gambar 2.11 Proses berkembangnya lapisan batas hidrodinamik  
Sumber : Cengel (2003:376)

Meningkatnya angka *Reynold* pada aliran laminar menyebabkan posisi terjadinya aliran yang telah berkembang penuh akan semakin jauh dari posisi masuknya fluida. Untuk aliran turbulen, posisi terjadinya aliran berkembang penuh lebih pendek dibanding aliran laminar. Jika jarak antara masuknya aliran terhadap lokasi terjadi aliran berkembang penuh secara hidrodinamik (*hydrodynamic entrance region*),  $L_h$ , maka pada aliran laminar dan turbulen hubungan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut :

$$L_{h, \text{ laminar}} \approx 0,05 \text{ Re } D$$

$$L_{h, \text{ turbulen}} \approx 10 D$$

(Cengel, 2003:377)

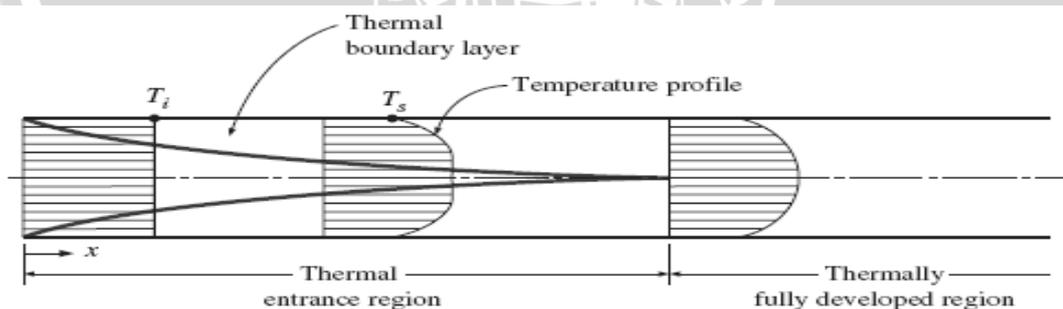
Dimana:

$D$  : diameter pipa (m)

$Re$  : angka *Reynolds*

#### 2.4.5.2 Lapisan Batas *Thermal*

Lapisan batas *thermal* merupakan daerah di mana terdapat gradien suhu dalam aliran terhadap arah normal permukaan (Holman, 1984:208). Gradien suhu itu terjadi akibat proses pertukaran kalor antara fluida dan dinding ketika fluida yang mengalir di dalam pipa dipanaskan atau didinginkan. Temperatur fluida pada penampang berubah dari  $T_s$  pada permukaan dinding sampai maksimum (atau minimum dalam kasus pemanasan) pada pusat pipa. Pada proses pendinginan, temperatur minimum terjadi pada permukaan dinding pipa dan maksimum pada pusat pipa sedangkan pada proses pemanasan, temperatur maksimum terjadi pada permukaan dinding pipa dan temperatur minimum pada pusat pipa. Hal ini sesuai dengan gambar 2.12 berikut.



Gambar 2.12 Lapisan batas *thermal*

Sumber : Cengel (2003:377)

Jarak antara masuknya aliran dimana lapisan batas *thermal* berkembang hingga mencapai pusat pipa dinamakan *thermal entry length* ( $L_t$ ). Pada aliran laminar dan turbulen besarnya  $L_t$  dapat dinyatakan sebagai berikut :

$$L_{t, \text{ laminar}} \approx 0,05 \text{ Re } \text{Pr } D$$

$$L_{t, \text{ turbulen}} \approx 10 D$$

(Cengel, 2003:425)

#### 2.4.6 Angka Reynolds ( $Re$ )

Pada fluida yang mengalir memiliki suatu pola aliran tertentu. Pola pertama adalah aliran laminar, yaitu aliran fluida bergerak secara berurutan mengikuti pola aliran yang mulus (*smooth streamline*) dan memiliki kecepatan yang tetap. Pola kedua adalah aliran turbulen yaitu aliran bergerak acak dan tidak teratur dengan kecepatan yang berfluktuasi. Untuk membedakan apakah suatu aliran fluida mengalami pola pertama atau pola kedua dibutuhkan parameter angka Reynolds. Dimana angka Reynolds merupakan perbandingan antara gaya inersia terhadap gaya viskos yang merupakan ukuran gaya gesekan antar lapisan fluida, ini merupakan angka tidak berdimensi dan dapat dirumuskan dengan persamaan sebagai berikut:

$$Re = \frac{\text{inertiaforce}}{\text{viscos force}} = \frac{V \cdot \delta}{\nu} \quad (\text{Cengel, 2003:355}) \quad (2-4)$$

Dimana :

$V$  = Kecepatan aliran fluida (m/s)

$\delta$  = Panjang karakteristik geometri (m)

$\nu = \frac{\mu}{\rho}$  = Viskositas kinematik fluida ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$\mu$  = viskositas dinamik (kg/m.s)

$\rho$  = massa jenis ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

#### 2.4.7 Angka Prandtl ( $Pr$ )

Angka Prandtl merupakan parameter yang menghubungkan ketebalan relatif antara lapisan batas hidrodinamika dengan lapisan batas thermal yaitu menyatakan perbandingan viskositas kinematik fluida terhadap difusivitas thermal. Viskositas kinematik fluida merupakan laju difusi momentum dalam fluida karena gerakan molekul. Difusivitas *thermal* merupakan difusi kalor dalam fluida. Perbandingan antara kedua hal tersebut menunjukkan besaran relatif antara difusi momentum dan difusi kalor dalam fluida. Dari kedua laju difusi tersebut yang akan menentukan berapa tebal lapisan batas *thermal* pada suatu medan aliran tertentu. Sehingga angka Prandtl merupakan penghubung antara medan kecepatan dan medan suhu yang dirumuskan sebagai berikut:

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu / \rho}{k / Cp \cdot \rho} = \frac{\mu \cdot Cp}{k} \quad (\text{Holman, 1991:213}) \quad (2-5)$$

Dimana:

$\alpha$  = difusivitas *thermal* fluida ( $\text{m}^2/\text{s}$ )

$C_p$  = panas spesifik (J/kg.K)

$k$  = konduktivitas *thermal* fluida (W/m.K)

$\mu$  = viskositas dinamik fluida (kg/m.s)

$\nu$  = viskositas kinematik ( $m^2/s$ )

#### 2.4.8 Angka Nusselt ( $Nu$ )

Angka *Nusselt* merupakan angka yang didapat dari pengukuran eksperimental, yang terdiri dari angka *Reynolds*, *Prandtl* dan konstanta yang harganya tergantung pada geometri saluran dan sifat aliran. Angka *Nusselt* menunjukkan laju perpindahan kalor secara konveksi terhadap laju perpindahan kalor secara konduksi pada lapisan fluida yang sama. Berikut merupakan laju perpindahan kalor tiap waktu tiap unit luas pada proses konveksi dan konduksi:

$$q_{conv} = h\Delta T \quad (\text{Cengel, 2003:352}) \quad (2-6)$$

$$q_{cond} = k \frac{\Delta T}{\delta} \quad (\text{Cengel, 2003:352}) \quad (2-7)$$

Sehingga didapat perbandingannya:

$$\frac{q_{conv}}{q_{cond}} = \frac{h\Delta T}{k\Delta T / \delta} = \frac{h\delta}{k} = Nu \quad (\text{Cengel, 2003:352}) \quad (2-8)$$

Dimana:

$\delta$  = panjang karakteristik (m)

Hubungan antara angka *Nusselt* dengan angka *Reynold* dan angka *Prandlt* adalah sebagai berikut :

$$Nu = \frac{h\delta}{k} = C Re^m Pr^n \quad (\text{Cengel, 2003:352}) \quad (2-9)$$

Dimana:

$h$  = koefisien perpindahan panas konveksi ( $W/m^2 K$ )

Nilai C, m dan n tergantung dari karakteristik aliran. Untuk aliran dalam pipa adalah sebagai berikut :

- Aliran laminar

$$Nu = 1,86 \left( \frac{Re Pr D}{L} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu_b}{\mu_s} \right)^{0,14} \quad (\text{Pr} > 0,5) \quad (\text{Cengel, 1998:379}) \quad (2-10)$$

Dimana :

Re = angka *Reynolds*

Pr = angka *Prandlt*

$D$  = diameter pipa (m)

$L$  = panjang pipa (m)

$\mu_s$  = viskositas dinamik fluida pada temperatur permukaan (kg.m/s)

$\mu_b$  = viskositas dinamik fluida pada temperatur *bulk* (kg.m/s)

- Aliran turbulen

$$Nu = 0,023 Re^{0,8} Pr^n \quad \begin{cases} (0,7 \leq Pr \leq 160) \\ (Re > 10000) \end{cases} \quad (\text{Cengel, 1998:382}) \quad (2-11)$$

Dimana :

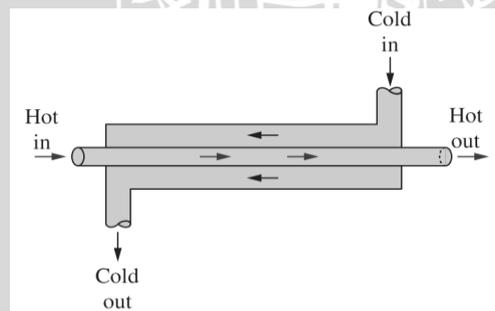
$n = 0,4$  untuk pemanasan

$n = 0,3$  untuk pendinginan

Selain dipengaruhi oleh sifat aliran fluida, angka *Nusselt* juga tergantung pada geometri dari pipa dimana fluida tersebut mengalir.

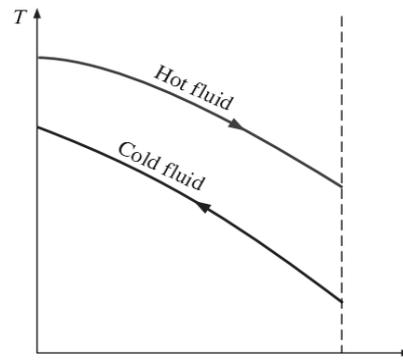
## 2.5 Alat Penukar Kalor

Alat penukar kalor adalah alat yang berfungsi memindahkan kalor antara dua fluida yang mempunyai perbedaan temperatur dan menjaga agar kedua fluida tersebut tidak bercampur (Cengel, 2003:569). Berdasarkan arah aliran alat penukar kalor dibagi menjadi 3, yaitu aliran kontra/berlawanan (*counter flow*), aliran sama (*parallel flow*) dan aliran lintang (*cross flow*). Alat penukar kalor aliran kontra/berlawanan adalah alat penukar kalor yang arah aliran fluida dingin berlawanan dengan arah aliran fluida panas, sebagai contoh pada gambar 2.13 berikut.



Gambar 2.13 Alat penukar kalor aliran kontra/berlawanan  
Sumber : Cengel (1998:570)

Pada alat penukar kalor tipe ini, temperatur akhir fluida dingin dapat melampaui temperatur akhir fluida panas karena terdapat perpindahan kalor yang efektif sepanjang pipa. Keuntungan yang lain dari tipe ini adalah diperlukan luas permukaan yang lebih kecil dibanding dengan aliran searah. Adapun proses perubahan temperatur pada alat penukar kalor aliran berlawanan dapat dilihat pada gambar 2.14 berikut ini.



Gambar 2.14 Distribusi temperatur alat penukar kalor aliran kontra/berlawanan  
 Sumber : Cengel (1998:570)

### 2.5.1 Analisa Alat Penukar Kalor

Dalam menentukan besarnya kalor yang dipindahkan oleh alat penukar kalor, biasa digunakan rumus di bawah ini :

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T \quad (\text{Cengel, 1997:574}) \quad (2-12)$$

Dimana :

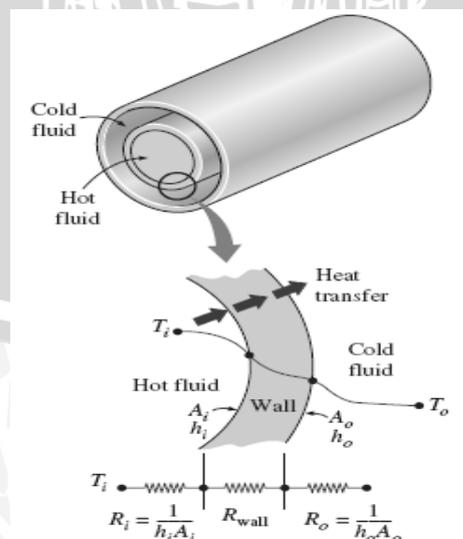
$q$  = laju perpindahan kalor (W)

$U$  = koefisien perpindahan kalor menyeluruh ( $\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ )

$A$  = luas permukaan perpindahan kalor ( $\text{m}^2$ )

$\Delta T$  = perbedaan temperatur menyeluruh ( $^\circ\text{C}$ )

Pada alat penukar kalor jenis pipa ganda terdapat dua fluida yang memiliki temperatur berbeda yang dibatasi oleh dinding pipa dalam sehingga untuk melakukan perpindahan kalor dari fluida panas ke fluida dingin maka ilustrasi hambatan *thermal* dapat terlihat seperti pada gambar 2.15 berikut.



Gambar 2.15 Hambatan *thermal* pada alat penukar kalor jenis pipa ganda  
 Sumber : Cengel (2003:574)

Dalam transfer kalor tersebut terjadi tiga proses perpindahan kalor yaitu proses perpindahan kalor konveksi (antara fluida dengan permukaan dinding bagian dalam pipa), perpindahan kalor konduksi (dari permukaan dinding dalam hingga permukaan dinding luar dari pipa dalam), serta proses perpindahan kalor konveksi (antara fluida yang terdapat pada permukaan dinding luar dari pipa dalam dengan permukaan luar pipa), sehingga hambatan termal dapat dinyatakan:

$$R = R_{total} = R_i + R_{wall} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k l} + \frac{1}{h_o A_o}$$

.....(Cengel, 2003:574) (2-13)

Dimana:

$$q = \frac{\Delta T}{R} = UA\Delta T = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T$$

.....(Cengel, 2003:574) (2-14)

Sehingga:

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} = \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{D_o}{D_i}\right)}{2\pi k l} + \frac{1}{h_o A_o}$$

.....(Cengel, 2003:574) (2-15)

Dimana :

$q$  = Laju perpindahan kalor (W)

$U$  = Koefisien perpindahan kalor menyeluruh (W/m<sup>2</sup>°C)

$h$  = Koefisien perpindahan kalor konveksi (W/m<sup>2</sup>°C)

$A$  = Luas permukaan pipa (m<sup>2</sup>)

$D$  = Diameter pipa (m)

$k$  = Konduktivitas *thermal* bahan (W/m °C)

$L$  = Panjang pipa (m)

$i$  = Pipa dalam bagian dalam

$o$  = Pipa dalam bagian luar

Sehingga laju perpindahan kalor dinyatakan sebagai berikut:

$$q = \frac{T_h - T_c}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o / D_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o}}$$

(Holman, 1991:482) (2-16)

Dimana :

$T_h$  = Temperatur fluida panas ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_c$  = Temperatur fluida dingin ( $^{\circ}\text{C}$ )

Perbedaan temperatur pada alat penukar kalor tidak dapat ditentukan dengan mudah sehingga ada beberapa analisa yang dapat digunakan untuk mempermudah menentukan laju perpindahan kalor pada alat penukar kalor :

### 2.5.1.1 LMTD (*log mean temperatur difference*)

Dengan menggunakan analisa ini perbedaan temperatur pada alat penukar kalor dapat ditentukan. Sehingga laju perpindahan kalor pada alat penukar kalor adalah sebagai berikut :

$$q = U \cdot A \cdot \Delta T_{lm} \quad (\text{Cengel, 2003:583}) \quad (2-17)$$

Dimana :  $\Delta T_{lm}$  = *log mean temperature difference*

Dalam menentukan  $\Delta T_{lm}$  (*log mean temperature difference*) dari alat penukar kalor tergantung pada jenis alat penukar kalor. Adapun rumus untuk alat penukar kalor aliran berlawanan adalah sebagai berikut :

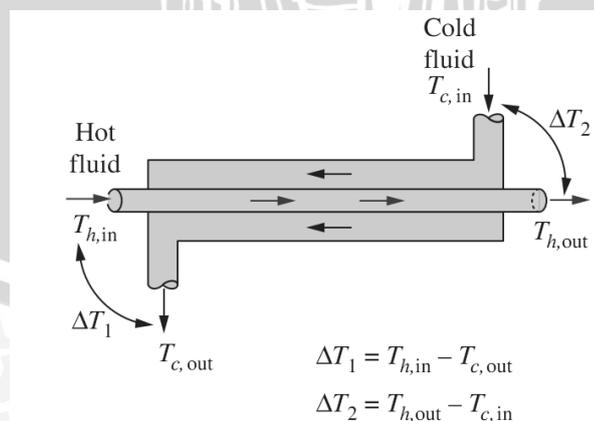
$$\Delta T_{lm} = \frac{(T_{h1} - T_{c2}) - (T_{h2} - T_{c1})}{\ln \frac{(T_{h1} - T_{c2})}{(T_{h2} - T_{c1})}} \quad (\text{Holman, 1991:491}) \quad (2-18)$$

Dimana :

$T_{h1}$  dan  $T_{h2}$  = temperatur fluida panas masuk dan keluar ( $^{\circ}\text{C}$ )

$T_{c1}$  dan  $T_{c2}$  = temperatur fluida dingin dan keluar ( $^{\circ}\text{C}$ )

Persamaan dari  $\Delta T_1$  dan  $\Delta T_2$  pada alat penukar kalor aliran berlawanan dapat dilihat pada gambar 2.16 berikut ini.



Gambar 2.16 Persamaan  $\Delta T_1$  dan  $\Delta T_2$  pada alat penukar kalor aliran berlawanan  
Sumber : Cengel (2003:682)

### 2.5.1.2 Metode NTU – Efektivitas

Keefektifitas penukar kalor merupakan perbandingan laju perpindahan kalor nyata dalam penukar kalor tertentu terhadap laju perpindahan kalor yang mungkin, atau dapat di tuliskan :

$$\text{Efektivitas} = \varepsilon = \frac{\text{perpindahan kalor nyata}}{\text{perpindahan kalor maksimum yang mungkin}} \dots\dots\dots(\text{Holman, 1991:498}) \quad (2-19)$$

Perpindahan kalor nyata (*actual*) dapat dihitung dari energi yang dilepas oleh fluida panas atau energi yang diserap oleh fluida dingin. Sehingga secara matematis dapat ditulis:

$$q_{\text{actual}} = \dot{m}_h \cdot C_h \cdot (T_{h1} - T_{h2}) = \dot{m}_c \cdot C_c \cdot (T_{c1} - T_{c2}) \quad (\text{Holman, 1991:499}) \quad (2-20)$$

Dimana :

$q_{\text{actual}}$  = perpindahan kalor nyata (W)

$\dot{m}_h$  = laju massa fluida panas (kg/dtk)

$\dot{m}_c$  = laju massa fluida dingin (kg/dtk)

$C_h$  dan  $C_c$  = kalor spesifik fluida panas dan dingin (J/kg.°C)

$T_{c1}$  dan  $T_{c2}$  = temperatur untuk fluida dingin masuk dan keluar (°C)

$T_{h1}$  dan  $T_{h2}$  = temperatur untuk fluida panas masuk dan keluar (°C)

Perpindahan kalor maksimum dari penukar kalor diperoleh dari energi yang dilepas oleh fluida yang memiliki temperatur panas sama dengan energi yang diserap fluida yang bertemperatur dingin. Beda suhu maksimum pada alat penukar kalor adalah selisih antara temperatur masuk fluida panas dan fluida dingin, maka fluida yang mungkin mengalami beda temperatur maksimum ini adalah fluida yang memiliki nilai  $\dot{m} \cdot C$  minimum. Sehingga rumusan perpindahan kalor maksimum dapat dituliskan sebagai berikut.

$$q_{\text{maks}} = (\dot{m} \cdot C)_{\text{min}} \cdot (T_{h\text{masuk}} - T_{c\text{masuk}}) \quad (\text{Holman, 1991:499}) \quad (2-21)$$

Sehingga dari kedua persamaan (2-20) dan (2-21) dapat dirumuskan efektifitas penukar kalor secara matematis sebagai berikut :

$$\varepsilon = \frac{\dot{m}_h \cdot C_h \cdot (T_{h1} - T_{h2})}{(\dot{m} \cdot C)_{\text{min}} \cdot (T_{h\text{masuk}} - T_{c\text{masuk}})} \quad (\text{Holman, 1991:499}) \quad (2-22)$$

Jumlah satuan perpindahan kalor (*number of transfer unit* – NTU) merupakan tolak ukuran perpindahan kalor dari alat penukar kalor. Semakin besar harga NTU maka alat penukar kalor tersebut semakin mendekati batas termodinamikanya. NTU dapat dirumuskan sebagai berikut.

$$NTU = \frac{U.A}{(\dot{m}.C)_{\min}} \quad (\text{Holman, 1991:501}) \quad (2-23)$$

Untuk hubungan antara NTU dan efektivitas ( $\epsilon$ ), dapat dilihat pada persamaan di bawah ini.

$$\epsilon = \frac{1 - \exp[-NTU(1-C)]}{1 - C \exp[-NTU(1-C)]} \quad (\text{Holman, 1991:501}) \quad (2-24)$$

Dimana :

$$C = \frac{(\dot{m}.C)_{\min}}{(\dot{m}.C)_{\max}}$$

### 2.5.1.3 Peningkatan Kinerja Alat Penukar Kalor

Peningkatan kinerja alat penukar kalor yaitu memindahkan kerja lebih besar atau melakukan pertukaran temperatur antar fluida yang lebih cepat. Salah satunya dengan peningkatan perpindahan kalor menyeluruh  $U$  (*Overall heat transfer coefficient*), karena  $U$  ini sangat berhubungan dengan area perpindahan kalor  $A$ , laju perpindahan kalor  $Q$  dan perbedaan temperature  $\Delta T$ .

$$q = U.A.\Delta T \quad (\text{Cengel, 1997:574}) \quad (2-12)$$

Dimana :

$q$  = laju perpindahan kalor (W)

$U$  = koefisien perpindahan kalor menyeluruh ( $\text{W/m}^2\text{ }^\circ\text{C}$ )

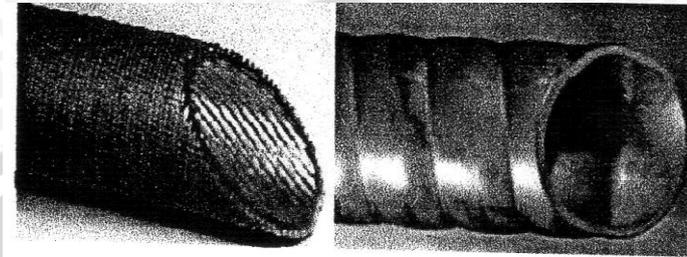
$A$  = luas permukaan perpindahan kalor ( $\text{m}^2$ )

$\Delta T$  = perbedaan temperatur menyeluruh ( $^\circ\text{C}$ )

Dengan adanya pengembangan pada heat exchanger akan meningkatkan efisiensi perpindahan kalor dengan menurunnya kebutuhan daya pembangkitnya (pompa) dan atau mengurangi ukuran serta bahan dari heat exchanger. Pengembangan pipa – pipa heat exchanger dibagi kedalam teknik aktif dan pasif. Pengembangan teknik aktif membutuhkan energi luar untuk mengalirkan dan menkondisikan fluidanya

sedangkan teknik pasif tidak. Dengan adanya perlakuan pada pipa ini diharapkan dapat meningkatkan turbulensi fluida yang memberikan dampak laju perpindahan kalor juga meningkatkan pada operasional daya pompa yang sama. Berikut ini merupakan contoh – contoh pengembangan teknik pasif pipa *double tube heat exchanger* :

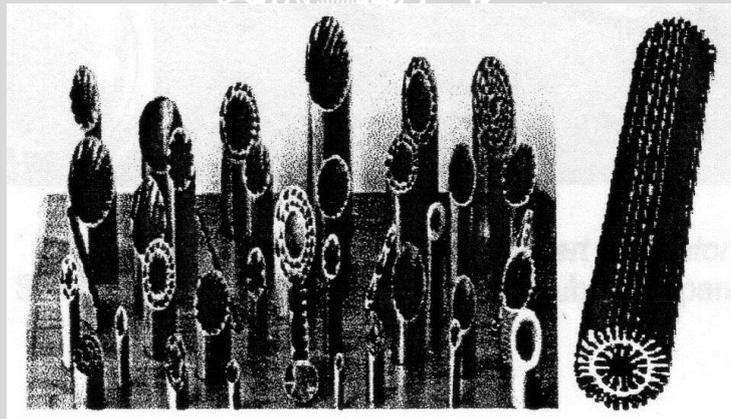
1. Dengan memberi kekasaran permukaan (beralur) pada pipa.



Gambar 2.17 profil pipa beralur

Sumber ; Wolverine Tube, Inc, Engineering data book III, 5-1

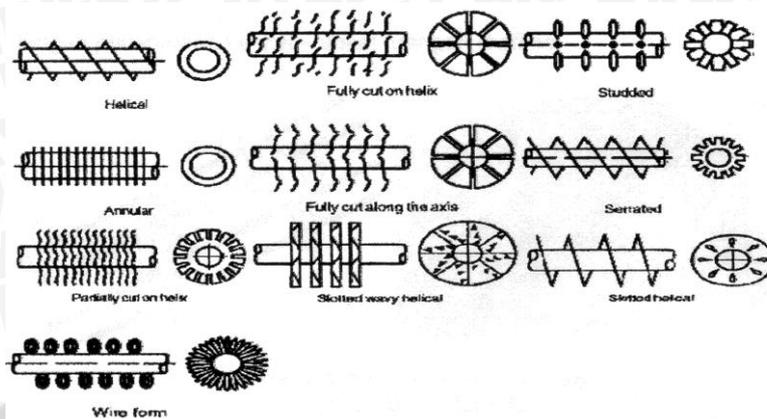
2. Dengan penambahan sirip – sirip dalam pipa (internal fin)



Gambar 2.18 Tipe – tipe internal fin

Sumber : shah (2003:44)

### 3. Dengan penambahan sirip – sirip pada luar pipa (external fin)



Gambar 2.19 Tipe external fin  
Sumber : Shah (2003:43)

#### 2.6 Static Radial Fin Mixer

*Static radial fin mixer* merupakan turbulator mempunyai fungsi sebagai penghalang yang mengakibatkan meningkatnya turbulensi dan juga mengubah arah gerakan fluida menjadi gerakan acak. Gerakan acak pada fluida menyebabkan terjadinya *vortex*, hal ini terjadi karena perbedaan kecepatan pada fluida akibat adanya turbulator (*static radial fin mixer*). Pada pusaran atau olakan (*vortex*) inilah terjadi percampuran antara partikel-partikel fluida yang bergerak acak sehingga akan meningkatkan laju perpindahan kalor, serta dengan meningkatkan kecepatan aliran pada saluran dapat memperbesar angka *Reynolds* dan angka *Nusselt*. Sehingga laju perpindahan kalor akan meningkat dikarenakan meningkatnya koefisien perpindahan kalor konveksi.

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{turb} = -\rho C_p \epsilon_M \frac{\partial T}{\partial y}$$

$$\frac{q}{A} = -\rho c_p (\alpha + \epsilon_h) \frac{\partial T}{\partial y} \quad (\text{Holman, 1991:224}) \quad (2-25)$$

Dimana :

$$\left(\frac{q}{A}\right)_{turb} = \text{flux kalor pada aliran turbulen ( W/m}^2\text{)}$$

$$\rho = \text{massa jenis fluida (kg/m}^3\text{)}$$

$$C_p = \text{k calor spesifik pada tekanan konstan (J/kg.K)}$$

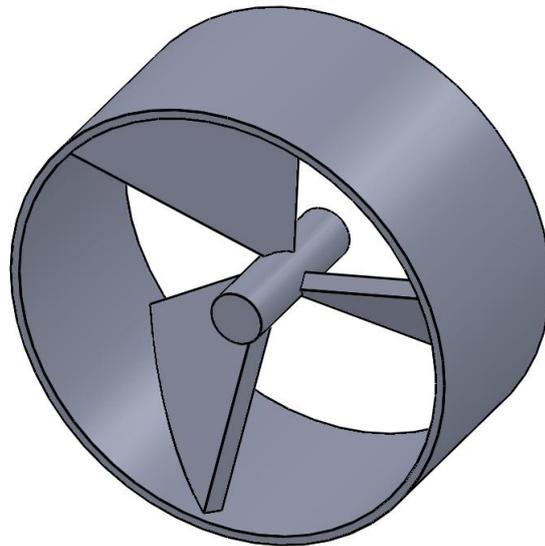
$$\epsilon_M = \text{difusivitas pusaran ( m}^2\text{/s)}$$

$$\alpha = \text{difusivitas termal (m}^2\text{/s)}$$

$$\epsilon_h = \text{pusaran eddy ( m}^2\text{/s)}$$

$$\frac{\partial T}{\partial y} = \text{gradient temperatur ke arah sumbu } y \text{ (K/m)}$$

Dengan semakin banyak jumlah *static radial fin mixer* maka akan meningkatkan pusaran atau olakan (*vortex*) pada aliran fluida tersebut sehingga meningkatkan difusivitas *thermal* pada fluida dan akan meningkatkan transfer kalor pada aliran tersebut. Pada aliran yang sepenuhnya turbulen terdapat viskositas pusaran (*eddy viscosity*) dan konduktivitas *thermal* pusaran (*eddy thermal conductivity*) dimana sifat-sifat pada pusaran ini nilainya mungkin sampai sepuluh kali lebih besar dari nilai molekular (Holman, 1984: 220).



Gambar 2.20 Tampak Isometri *static radial fin mixer*

## 2.7 Penurunan Tekanan

Penurunan tekanan pada suatu aliran disebabkan oleh gesekan atau kerugian antara fluida dengan saluran. Pada alat penukar kalor, semakin tinggi penurunan tekanan akan menyebabkan semakin tinggi daya yang dibutuhkan oleh pompa atau kompresor untuk mengalirkan fluida. Hal inilah yang menimbulkan *head losses*. *Head losses* dibagi menjadi 2, yaitu :

### 1. *Major losses*

Kerugian pada aliran fluida yang disebabkan oleh gesekan antara fluida dengan dinding saluran. Besarnya *major losses* dapat dihitung dengan rumus berikut ini :

$$h_{ma} = f \cdot \frac{L \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g} \quad (\text{Oslo dan wright, 1993:357}) \quad (2-26)$$

Dimana :

$h_{ma} = \text{major losses (m)}$

$f = \text{koefisien gesek}$

$L = \text{panjang pipa (m)}$

$v = \text{kecepatan fluida (m/s)}$

$D = \text{diameter pipa (m)}$

$g = \text{percepatan gravitasi bumi (m/s}^2\text{)}$

Koefisien gesek di atas tergantung pada kekasaran pipa, angka *Reynold* dan diameter pipa. Adapun besarnya koefisien gesekan dapat ditentukan dengan menggunakan diagram *Moody*.

## 2. *Minor losses*

Kerugian pada aliran fluida yang disebabkan oleh timbulnya *vortex* akibat alat atau komponen yang dipasang pada suatu saluran. Besarnya *minor losses* dapat dihitung dengan rumus di bawah ini:

$$h_{mi} = K_L \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (\text{Olson dan wright, 1993:350}) \quad (2-27)$$

Dimana :

$h_{mi} = \text{minor losses (m)}$

$K_L = \text{koefisien kerugian peralatan}$

Sehingga *head losses* ( $\Sigma h = h_{ma} + \Sigma h_{mi}$ ) totalnya adalah :

$$\Sigma h = h_{ma} + \Sigma h_{mi} \quad (\text{Olson dan wright, 1993:356}) \quad (2-28)$$

Besar penurunan tekanan pada aliran fluida tersebut dapat diketahui dengan cara memasang manometer yang terhubung dengan sisi masuk dan keluar dari pipa sehingga akan dihasilkan beda ketinggian permukaan fluida referensi, besarnya penurunan tekanan tersebut dapat dirumuskan :

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_1 - P_2 \\ &= \rho \cdot g \cdot h \end{aligned} \quad (\text{Olson dan wright, 1993:56}) \quad (2-29)$$

Dimana :

$\Delta P = \text{penurunan tekanan (N/m}^2\text{)}$

$\rho = \text{massa jenis fluida referensi (kg/m}^3\text{)}$

$g = \text{percepatan gravitasi bumi (m/s}^2\text{)}$

$h = \text{beda ketinggian permukaan fluida referensi (m)}$

## 2.8 Hipotesa

Semakin banyak jumlah *static radial fin mixer* mengakibatkan timbulnya pusaran besar atau olakan (*vortex*) sepanjang aliran, hal ini dikarenakan kecepatan aliran bebas meningkat dan menyebabkan angka *Reynolds* yang dihasilkan semakin besar, sehingga dapat diduga bahwa laju perpindahan kalor semakin meningkat dan penurunan tekanan juga semakin meningkat.

