

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Sebelumnya

Berbagai penelitian yang telah dilakukan dalam menyelidiki upaya-upaya peningkatan unjuk kerja *heat exchanger* dan penelitian-penelitian tersebut menjadi inspirasi pada penelitian penulis saat ini. Beberapa penelitian tersebut adalah yang dilakukan oleh Eri Prasetyo (2009) dan Ardiansyah (2011). Eri Prasetyo melakukan penelitian pengaruh jarak *pitch helical screw tape* dengan variasi *pitch* 14 mm, 18 mm dan 22 mm. Pada penelitian ini didapatkan bahwa jarak *pitch* terbaik adalah 18 mm, dengan laju perpindahan kalor mendekati laju perpindahan kalor pada *pitch* 14 mm namun nilai penurunan tekanannya tidak jauh beda dengan nilai penurunan tekanan pada *pitch* 22 mm.

Sementara itu, menurut Ardiansyah, adanya pemasangan penghalang dengan variasi sudut *static mixer* menyebabkan terjadinya peningkatan laju perpindahan kalor jika dibandingkan tanpa penghalang. Disamping itu peningkatan sudut *static mixer* berbanding lurus dengan faktor gesekan sehingga akan meningkatkan penurunan tekanan.

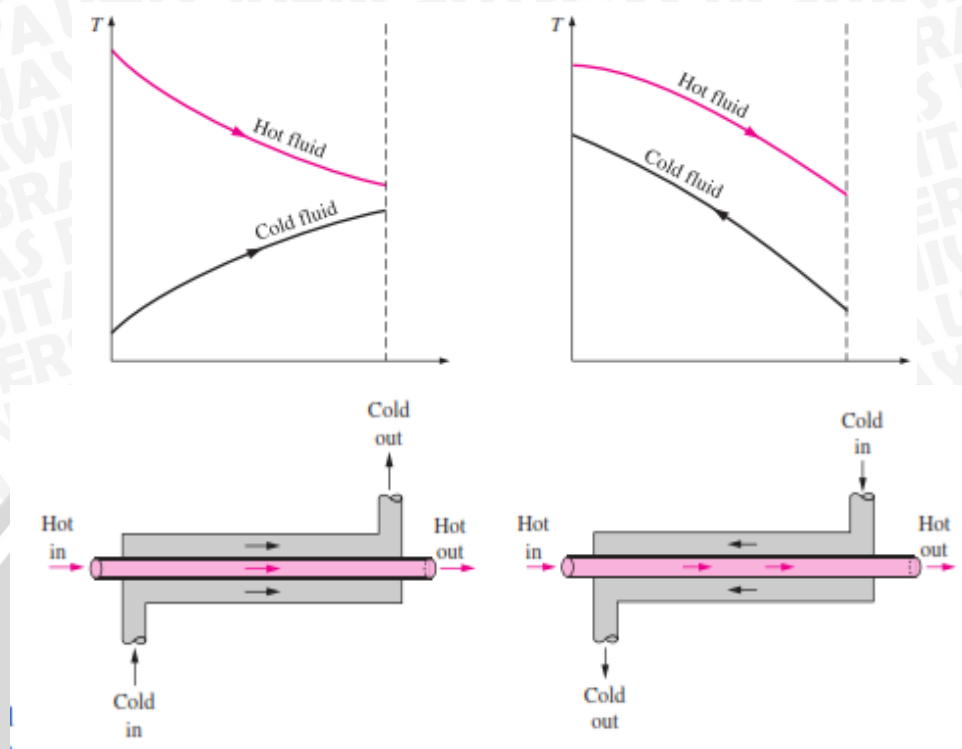
2.2 Heat Exchanger

Heat exchanger adalah peralatan yang digunakan untuk melaksanakan proses perpindahan energi kalor (termal) dari fluida yang bertemperatur tinggi ke fluida yang bertemperatur lebih rendah. Proses perpindahan kalor tersebut dapat dilakukan secara langsung (*direct transfer*) maupun tidak langsung (*indirect transfer*).

Pada proses perpindahan kalor *heat exchanger* secara langsung, fluida panas akan bercampur secara langsung dengan fluida dingin (tanpa adanya pemisah) dalam suatu bejana atau ruangan tertentu. Contohnya adalah *primary air heater*. Sedangkan perpindahan kalor *heat exchanger* secara tidak langsung, fluida panas tidak berhubungan langsung dengan fluida dingin. Sehingga proses perpindahan kalor melalui media perantara seperti pipa atau peralatan jenis lainnya. Contoh perpindahan kalor secara tidak langsung adalah pada *reheater* dan *superheater*.

Konstruksi dari *heat exchanger* yang paling sederhana adalah jenis susunan pipa ganda seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut. Dalam *heat exchanger* jenis ini dapat digunakan aliran searah maupun berlawanan arah, baik dengan zat cair kalor

maupun zat cair dingin yang terdapat dalam ruang annulus dan zat cair yang lain di dalam pipa bagian dalam.



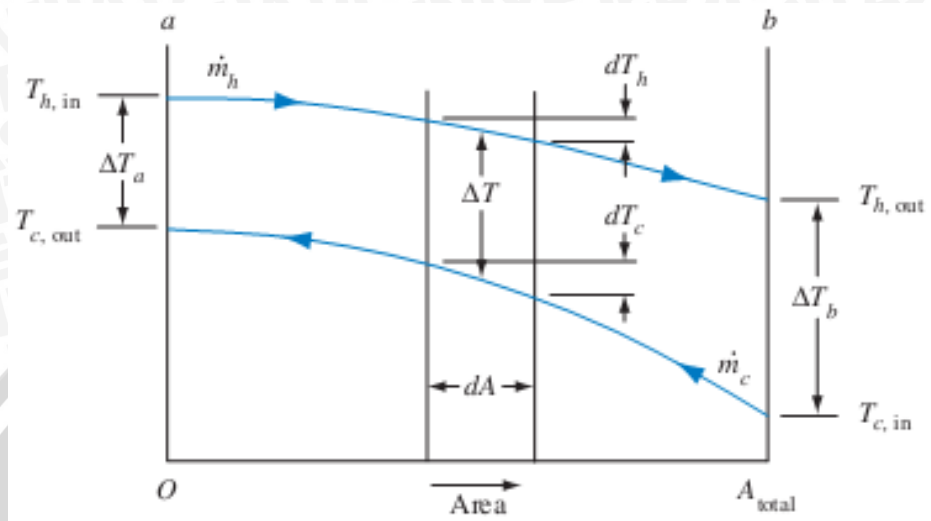
Gambar 2.1 Profil temperatur *heat exchanger* aliran searah dan berlawanan arah
Sumber : Cengel (2003:668)

Heat exchanger ini termasuk ke dalam tipe *indirect transfer* dimana fluida-fluidanya dipisahkan dengan area permukaan perpindahan kalor dan tidak terjadi pencampuran antara fluida bertemperatur tinggi dengan fluida bertemperatur rendah, atau sering disebut fluida *unmixed*.

Di dalam *heat exchanger*, kalor mula-mula dipindahkan dari fluida kalor ke dinding melalui konveksi, melewati dinding dengan konduksi, dan dari dinding ke fluida dingin melalui konveksi kembali.

Profil temperatur *heat exchanger* seperti pada gambar 2.1 untuk aliran berlawanan arah dengan aliran searah (paralel) adalah berbeda. Beda temperatur untuk *heat exchanger* aliran berlawanan arah selalu lebih besar dari *heat exchanger* aliran searah (parallel), $\Delta T_{lm,CF} > \Delta T_{lm,PF}$. Dengan demikian, semakin kecil area permukaan perpindahan panas *heat exchanger* maka dibutuhkan aliran berlawanan arah untuk mencapai nilai perpindahan panas spesifik yang lebih baik. Oleh karena itu dalam skripsi ini menggunakan *heat exchanger* aliran berlawanan arah (*counter flow*).

Pada alat penukar kalor dengan jenis aliran *counter flow*, temperatur akhir fluida dingin dapat melampaui temperatur akhir fluida kalor karena terdapat perpindahan kalor yang efektif sepanjang pipa. Proses perubahan temperatur pada *heat exchanger* aliran berlawanan dapat dilihat pada gambar 2.2 di bawah ini.



Gambar 2.2 Profil temperatur alat penukar kalor aliran berlawanan

Sumber: Frank Kreith (1959:498)

2.3 Energi Kalor

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, *heat exchanger* adalah peralatan yang digunakan untuk melaksanakan proses perpindahan energi kalor (termal) dari fluida yang bertemperatur tinggi ke fluida yang bertemperatur lebih rendah. Kalor adalah suatu energi yang bila bekerja pada suatu benda dapat mengubah temperatur maupun wujud benda tersebut. Kalor merupakan suatu kuantitas atau jumlah kalor baik yang diserap maupun yang dilepaskan suatu benda. Satuan kalor dalam SI adalah Joule (1 Joule = 0.24 kalori). Kalor bergerak dari daerah bertemperatur tinggi menuju ke daerah yang bertemperatur lebih rendah.

Sementara itu, energi kalor merupakan energi yang menunjukkan tingkat kecepatan gerak acak dari atom-atom atau molekul penyusun suatu benda. Semakin tinggi kecepatan gerak acak dari atom-atom atau molekul penyusun suatu benda maka temperatur benda tersebut semakin tinggi. Sehingga dapat dikatakan bahwa benda tersebut memiliki energi kalor yang tinggi.

Secara matematis, kalor dinyatakan dengan persamaan berikut :

$$Q = \dot{m} C_p \Delta T \quad (\text{Cengel, 2003:13}) \quad (2-1)$$

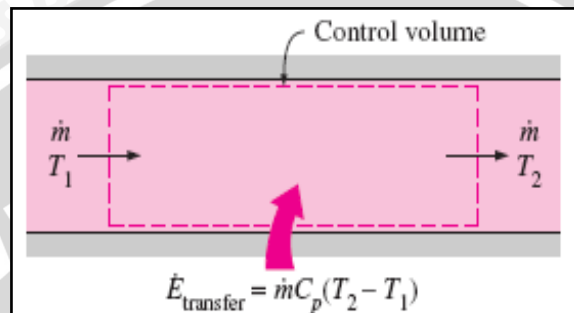
dengan :

\dot{Q} = laju energi kalor (Joule/s atau Watt)

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

C_p = kalor jenis pada tekanan konstan (J/kg.°C)

ΔT = beda temperatur masuk dan keluar (°C)



Gambar 2.3 Transfer energi kalor pada sistem dengan *control volume*

Sumber : Cengel (2003:13)

2.4 Perpindahan Kalor

Sebagaimana yang telah dijabarkan di atas, kalor bergerak dari daerah bertemperatur tinggi menuju ke daerah yang bertemperatur lebih rendah. Pergerakan ini sering kita sebut dengan perpindahan kalor (*heat transfer*).

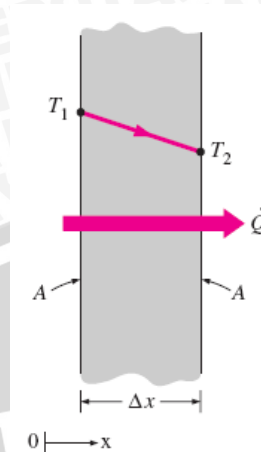
Perpindahan kalor dapat terjadi melalui tiga cara, yaitu konduksi atau hantaran, konveksi, dan radiasi. Pada *heat exchanger* yang digunakan dalam penelitian ini, perpindahan kalor yang terjadi secara konduksi dan konveksi.

2.4.1 Perpindahan Kalor Konduksi

Perpindahan kalor konduksi terjadi apabila pada suatu benda terdapat dua daerah yang memiliki perbedaan temperatur. Pada perpindahan kalor konduksi juga terjadi transfer energi dari daerah yang memiliki energi lebih besar menuju daerah yang memiliki energi lebih kecil akibat adanya interaksi antara kedua partikel yang berdekatan.

Perpindahan kalor konduksi dapat terjadi dalam zat padat, cair, maupun gas. Pada perantara cair dan gas, konduksi terjadi karena adanya molekul yang bertumbukan dan berdifusi dengan gerakan acak. Pada zat padat, konduksi dikarenakan adanya kombinasi dari getaran dari molekul dalam kisi dan transport energi melalui elektron

bebas. Perpindahan kalor secara konduksi melalui medium zat padat dapat diilustrasikan pada gambar 2.3 dibawah ini:



Gambar 2.4 Perpindahan kalor konduksi melalui sebuah dinding dengan ketebalan Δx dan luas penampang A

Sumber : Cengel (2003:18)

2.4.2 Perpindahan Kalor Konveksi

Perpindahan kalor konveksi adalah proses transfer energi pada fluida yang meliputi kerja gabungan dari konduksi dan gerakan mencampur 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.

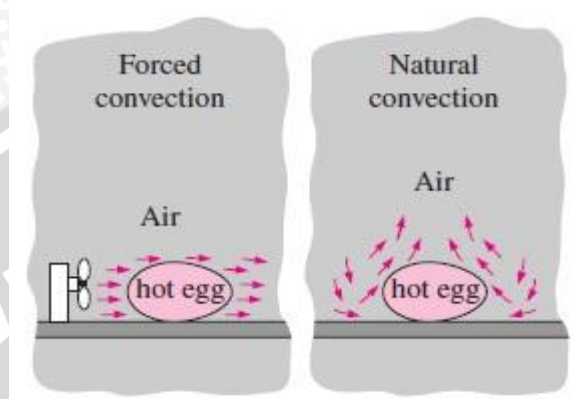
Secara umum, perpindahan kalor konveksi dapat dibedakan menjadi dua macam yaitu:

1. Konveksi Bebas (*Free Convection*)

Gerakan perpindahan fluida pada konveksi bebas terjadi karena adanya perbedaan kerapatan yang disebabkan oleh adanya perbedaan atau gradient temperatur, proses ini terjadi secara alamiah sehingga dapat disebut konveksi alamiah (natural convection).

2. Konveksi secara paksa (*Force Convection*)

Pada konveksi paksa fluida dipaksa bergerak oleh adanya gaya atau energi dari suatu peralatan, misalnya pompa dan *blower*. Dalam penerapan di dunia industri proses ini lebih sering digunakan daripada konveksi alamiah, karena mempunyai transfer energi kalor yang lebih besar tetapi dibutuhkan energi tambahan untuk menggerakkan sudu pada pompa maupun *blower*.



Gambar 2.5 Proses terjadinya perpindahan kalor konveksi

Sumber : Cengel (2003:30)

2.4.3 Temperatur Rata-Rata

Temperatur fluida berubah pada arah melintang pipa pada aliran dalam pipa yang dipanaskan atau didinginkan dari luar. 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 seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.7. Maka dalam penyelesaian permasalahan transfer energi digunakan temperatur rata-rata (*mean temperature*). Berbeda dengan kecepatan rata-rata (*mean velocity*), temperatur rata-rata akan mengalami perubahan sepanjang arah aliran bilamana dipanaskan maupun didinginkan. Sehingga energi yang dapat ditambahkan dalam aliran dalam pipa memenuhi persamaan,

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T_m \quad (\text{Holman, 1986:251}) \quad (2-2)$$

Dengan :

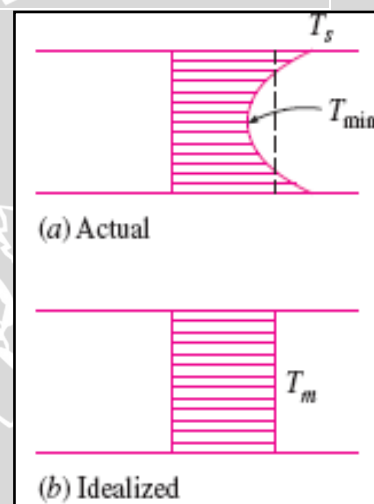
| | | |
|--------------|---|--------------------------------|
| \dot{Q} | = | laju energi panas (W) |
| \dot{m} | = | massa alir fluida (Kg/s) |
| C_p | = | panas spesifik (J/Kg.°C) |
| ΔT_m | = | Beda temperatur rata-rata (°C) |

Karena temperatur rata-rata fluida berubah selama pemanasan dan pendinginan, maka peninjauan transfer energi menggunakan temperatur *bulk* rata-rata (*bulk mean fluid temperature*) yang merupakan temperatur rata-rata aritmatika berdasarkan temperatur rata-rata masuk dan keluar seperti yang ditunjukkan pada persamaan dibawah ini :

$$T_b = \frac{(T_{m,i} + T_{m,o})}{2} \quad (\text{Cengel, 2003:422}) \quad (2-3)$$

Dengan :

| | | |
|-----------|---|--|
| T_b | = | bulk mean temperature ($^{\circ}\text{C}$) |
| $T_{m,i}$ | = | temperatur rata-rata masuk ($^{\circ}\text{C}$) |
| $T_{m,o}$ | = | temperatur rata-rata keluar ($^{\circ}\text{C}$) |



Gambar 2.6 Temperatur rata-rata (*mean temperature*) aliran fluida pada pipa
Sumber: Cengel (2003:421)

2.5 Fluida

Fluida didefinisikan sebagai suatu zat yang akan secara terus-menerus berubah bentuk atau terdeformasi apabila dikenakan tegangan geser, walaupun tegangan geser tersebut sangat kecil. Fluida akan bergerak dan berubah bentuk secara terus-menerus atau kontinu selama tegangan geser itu bekerja. Makin besar laju deformasi fluida, makin besar pula tegangan geser yang terjadi pada fluida tersebut.

Perpindahan kalor antara batas benda padat dan fluida terjadi dengan adanya suatu gabungan dari konduksi dan angkutan massa. Jika batas tersebut bersuhu lebih tinggi daripada fluida itu, maka kalor akan mengair secara konduksi dari neda padat ke partikel fluida didekat dinding. Bila partikel fluida yang terpanaskan mencapai daerah

yang suhunya lebih rendah, maka kalor berpindah dengan cara konduksi dari fluida yang lebih panas ke fluida yang lebih dingin.

Dalam penelitian ini, untuk menentukan laju perpindahan kalor fluida, setidaknya terdapat dua sifat fluida yang harus diketahui yaitu massa jenis dan kalor jenis.

2.5.1 Massa Jenis (ρ)

Massa jenis didefinisikan sebagai perbandingan antara massa suatu zat dengan volumenya. Satuan SI untuk massa jenis adalah kilogram per meter kubik (kg/m^3). Secara matematis, untuk menentukan massa jenis suatu zat persamaan yang digunakan adalah :

$$\rho = \frac{m}{v} \quad (2-4)$$

dengan :

ρ = massa jenis fluida (kg/m^3)

m = massa fluida (kg)

v = volume fluida (m^3)

2.5.2 Kalor Jenis (C_p)

Kalor jenis adalah besarnya energi kalor yang dibutuhkan untuk menaikkan temperatur 1 kg zat sebesar 1 °C pada tekanan konstan. Alat yang digunakan untuk menentukan besar kalor jenis suatu zat adalah kalorimeter.

$$C_p = \frac{Q}{m \cdot \Delta T} \quad (2-5)$$

dimana :

Q = banyak kalor yang diterima (J)

m = massa dari fluida (kg)

ΔT = selisih temperatur (°C)

2.6 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 :

$$h_{ma} = f \cdot \frac{L \cdot v^2}{D \cdot 2 \cdot g} \quad (\text{Oslon, 1993:357}) \quad (2-6)$$

Dimana :

h_{ma} = *major losses* (m)

f = koefisien gesek

L = panjang pipa (m)

v = kecepatan fluida (m/s)

D = diameter pipa (m)

g = percepatan gravitasi bumi (m/s²)

2. Minor losses

Kerugian pada aliran fluida yang disebabkan oleh timbulnya *vortex* akibat alat atau komponen yang dipasang pada suatu saluran. Adapun yang termasuk alat atau komponen tersebut antara lain : katup, saringan, perubahan luas penampang, *orifice*, turbulator dan sebagainya. Besarnya *minor losses* dapat dihitung dengan rumus di bawah ini:

$$h_{mi} = K_L \cdot \frac{v^2}{2 \cdot g} \quad (\text{Oslon, 1993:350}) \quad (2-7)$$

Dimana :

h_{mi} = *minor losses* (m)

K_L = koefisien kerugian peralatan

Sehingga *head losses* (Σh) totalnya adalah :

$$\Sigma h = h_{ma} + \Sigma h_{mi} \quad (\text{Olson dkk., 1993:356}) \quad (2-8)$$

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 didapat :

$$\begin{aligned} \Delta P &= P_1 - P_2 \\ &= \rho \cdot g \cdot h \end{aligned} \quad (\text{Oslon dkk., 1993:56}) \quad (2-9)$$

Dimana :

- ΔP = penurunan tekanan (N/m²)
 ρ = massa jenis fluida referensi (kg/m³)
 g = percepatan gravitasi bumi (m/s²)
 h = beda ketinggian permukaan fluida referensi (m)

2.7 Effectiveness

Effectiveness merupakan angka tak berdimensi dalam alat penukar kalor yang didefinisikan sebagai perbandingan laju perpindahan kalor aktual terhadap laju perpindahan kalor maksimum. *Effectiveness* dapat dirumuskan :

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{\text{perpindahan kalor aktual}}{\text{perpindahan kalor maksimum}} \quad (\text{Cengel, 2003}) \quad (2-10)$$

Perpindahan kalor aktual dapat dihitung dari energi kalor yang dilepaskan oleh fluida panas atau energi kalor yang diterima oleh fluida dingin.

$$q = C_c(T_{c,o} - T_{c,i}) = C_h(T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (2-11)$$

dimana $C_c = \dot{m}_c C_{p,c}$ dan $C_h = \dot{m}_h C_{p,h}$

Sedangkan perpindahan kalor maksimum yang terjadi pada alat penukar kalor :

$$q_{max} = C_{min} (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (\text{Cengel, 2003}) \quad (2-12)$$

Sehingga efektifitas dari alat penukar kalor adalah

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} = \frac{C_h(T_{c,o} - T_{c,i})}{C_{min} (T_{h,i} - T_{c,i})} \quad (\text{Cengel, 2003}) \quad (2-13)$$

2.8 Helical Static Mixer

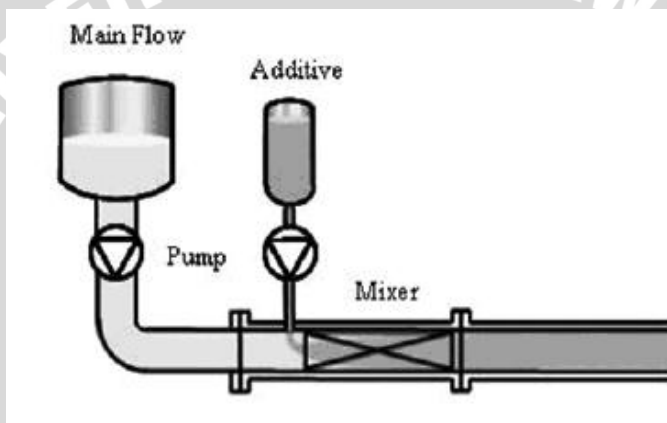
Static mixer merupakan alat yang digunakan untuk merubah orientasi aliran fluida pada suatu saluran sesuai dengan bentuk *static mixer*. Akibatnya lintasan dan luasan bebas alir fluida dalam pipa berkurang, sehingga akan meningkatkan kecepatan alir fluida.

Kecepatan pada fluida ini akan meningkatkan kontak termal antara permukaan pipa dalam dengan fluida yang mengalir. Hal ini menyebabkan adanya rotasi (*curl*) fluida yang bersinggungan dengan *static mixer* ini dimana ada perbedaan tekanan lokal sehingga mengakibatkan terjadinya pusaran dan olakan (*vortex*) di sepanjang saluran.

Proses aliran ini jelas mempengaruhi perpindahan panas. Menurut Holman (1986:267), “perpindahan panas meningkat cepat ketika lapisan batas menjadi turbulen, dan ketika terjadi peningkatan gerakan pusaran pada pemisahan”.

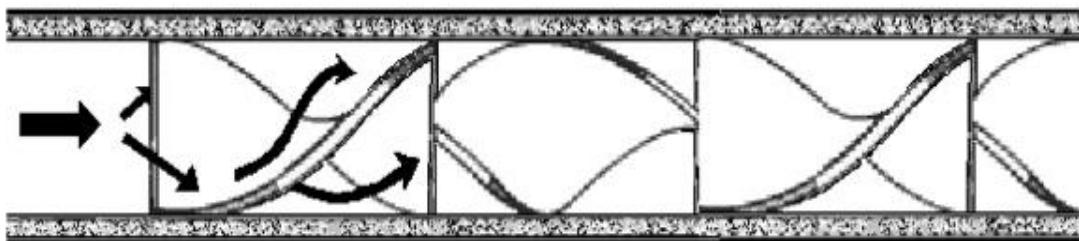
Selain itu, secara teoritis, pada aliran turbulen terdapat indikasi bahwa aliran tersebut memiliki angka *Reynolds* yang tinggi. Tingginya angka *Reynolds* akan meningkatkan angka *Nusselt*. Sehingga dari peningkatan parameter-parameter di atas, maka koefisien perpindahan kalor juga akan meningkat.

Static mixer digunakan secara umum untuk mencampur dua atau lebih cairan (*liquids*) menjadi campuran yang homogen. Penggunaan lainnya adalah pada pemrosesan zat kimia dan pengolahan limbah. *Static mixer* juga dapat digunakan pada kilang minyak dan gas, misalnya untuk proses pengolahan minyak mentah.



Gambar 2.7 Skematik penggunaan *static mixer* pada proses homegenisasi
Sumber : Plagianti (2008:81)

Pada penelitian ini, jenis *static mixer* yang digunakan adalah *helical static mixer*. *Helical static mixer* adalah jenis *static mixer* yang mempunyai geometri helical sehingga terbentuk aliran radial.



Gambar 2.8 *Helical static mixer*

Sumber : Khinast dkk. (2003: 1065)

2.9 Hipotesis

Semakin kecil jarak *pitch helical static mixer* maka akan meningkatkan turbulensi karena adanya pusaran dan olakan (*vortex*), sehingga dapat diduga bahwa kecepatan aliran fluida akan semakin meningkat. Peningkatan kecepatan alir fluida akan menyebabkan koefisien perpindahan kalor menyeluruh meningkat sehingga laju perpindahan kalor dan nilai *effectiveness* juga akan meningkat namun tekanan fluida berkurang karena adanya peningkatan losses.

