

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Perpindahan Panas

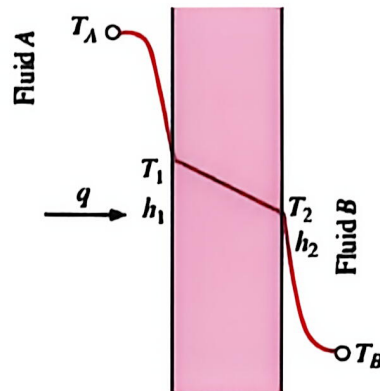
Perpindahan kalor (*heat transfer*) ialah ilmu untuk meramalkan perpindahan energi yang terjadi karena adanya perbedaan suhu di antara benda atau material. Pada termodinamika telah kita ketahui bahwa energi yang pindah itu dinamakan kalor (*heat*). Ilmu perpindahan kalor tidak hanya mencoba menjelaskan 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. (J.P.Holman, 2010)

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. Contohnya, kopi panas ke lingkungan yang mempunyai suhu 20°C, hingga terjadi kesetimbangan atau kesamaan suhu pada gelas dan lingkungan.

2.2. Mekanisme Perpindahan Panas

2.2.1. Konduksi

Perpindahan kalor secara konduksi adalah proses perpindahan kalor dimana kalor mengalir dari daerah yang bertemperatur tinggi ke daerah yang bertemperatur rendah dalam suatu medium (padat, cair atau gas) atau antara medium-medium yang berlainan yang bersinggungan secara langsung sehingga terjadi pertukaran energi dan momentum.



Gambar 2.1. Perpindahan panas konduksi pada dinding

(Sumber : J.P. Holman, 2010)

Laju perpindahan panas yang terjadi pada perpindahan panas konduksi adalah berbanding dengan gradien suhu normal sesuai dengan persamaan berikut.

Persamaan dasar Konduksi :

$$q = -k \cdot A \cdot \left(\frac{dt}{dx}\right) \dots \dots \dots (2.1)$$

(J.P. Holman, 2010)

Dimana :

- q = Laju perpindahan panas (W)
- A = Luas penampang dimana panas mengalir (m^2)
- dt/dx = Perbedaan temperatur t terhadap jarak dalam arah aliran panas pada kordinat x
- k = Konduktivitas thermal bahan ($W/m^\circ C$)

dT/dx = gradient temperatur kearah perpindahan kalor. Konstanta positif " k " disebut konduktifitas atau kehantaran termal benda itu, sedangkan tanda minus disisipkan agar memenuhi hukum kedua termodinamika, yaitu bahwa kalor mengalir ketempat yang lebih rendah dalam skala temperatur. (J.P.Holman, 2010)

Hubungan dasar aliran panas melalui konduksi adalah perbandingan antara laju aliran panas yang melintas permukaan isothermal dan gradient yang terdapat pada permukaan tersebut berlaku pada setiap titik dalam suatu benda pada setiap titik dalam suatu benda pada setiap waktu yang dikenal dengan hukum fourier.

Dalam penerapan hukum Fourier (persamaan 2.1) pada suatu dinding datar, jika persamaan tersebut diintegrasikan maka akan didapatkan :

$$q_k = -\frac{k.A}{\Delta x} (T_2 - T_1) \dots \dots \dots (2.2)$$

(J.P. Holman, 2010)

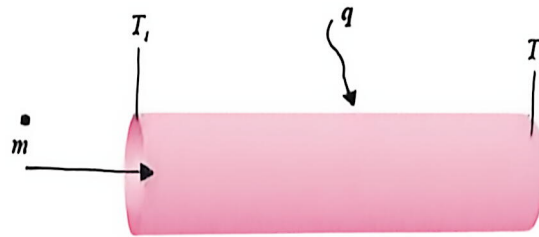
Bilamana konduktivitas termal (*thermal conductivity*) dianggap tetap. Tebal dinding adalah Δx , sedangkan T_1 dan T_2 adalah temperatur muka dinding. Jika konduktivitas berubah menurut hubungan linear dengan temperatur, seperti $k = k_0(1 + \beta T)$, maka persamaan aliran kalor menjadi :

$$q_k = -\frac{k_0.A}{\Delta x} [T_2 - T_1 \frac{\beta}{2} (T_2^2 - T_1^2)] \dots \dots \dots (2.3)$$

(J.P. Holman, 2010)

2.2.2. Konveksi

Konveksi adalah perpindahan panas karena adanya gerakan/aliran/pencampuran dari bagian panas ke bagian yang dingin. Contohnya adalah kehilangan panas dari radiator mobil, pendinginan dari secangkir kopi dll. Menurut cara menggerakkan alirannya, perpindahan panas konveksi diklasifikasikan menjadi dua, yakni konveksi bebas (*free convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*). Bila gerakan fluida disebabkan karena adanya perbedaan kerapatan karena perbedaan suhu, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi bebas (*free / natural convection*). Bila gerakan fluida disebabkan oleh gaya pemaksa / eksitasi dari luar, misalkan dengan pompa atau kipas yang menggerakkan fluida sehingga fluida mengalir di atas permukaan, maka perpindahan panasnya disebut sebagai konveksi paksa (*forced convection*).



Gambar 2.2. Perpindahan panas konveksi pada saluran
(Sumber : J.P.Holman, 2010)

Proses pemanasan atau pendinginan fluida yang mengalir didalam saluran tertutup seperti pada gambar 2.2 merupakan contoh proses perpindahan panas. Laju perpindahan panas pada beda suhu tertentu dapat dihitung dengan persamaan dibawah ini.

Besar laju perpindahan Konveksi :

$$q = -h \cdot A \cdot (T_w - T_{\infty}) \dots \dots \dots (2.4)$$

(J.P. Holman, 2010)

Dimana :

- q = Laju perpindahan panas (Watt)
- h = Koefisien perpindahan panas ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
- A = Luas bidang permukaan perpindahan panas (m^2)
- T_w = Temperatur dinding ($^\circ C$)
- T_{∞} = Perbedaan sekeliling ($^\circ C$)

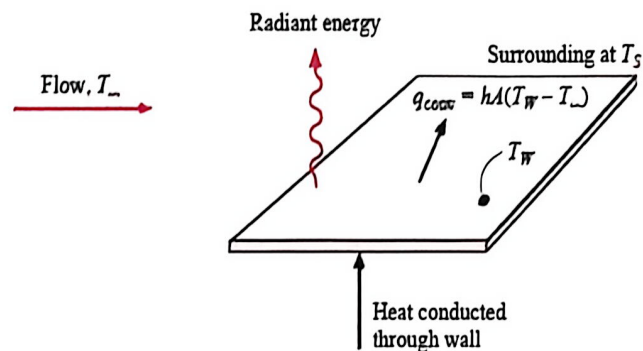
Tanda minus (-) digunakan untuk memenuhi hukum II thermodinamika, sedangkan panas yang dipindahkan selalu mempunyai tanda positif (+).

Persamaan (2.4) mendefinisikan tahanan panas terhadap konveksi. Koefisien pindah panas permukaan h , bukanlah suatu sifat zat, akan tetapi menyatakan besarnya laju pindah panas didaerah dekat pada permukaan itu.

Perpindahan konveksi paksa dalam kenyataanya sering dijumpai, karena dapat meningkatkan efisiensi pemanasan maupun pendinginan suatu fluida dengan fluida yang lain.

2.2.3. 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. (J.P.Holman, 2010)



Gambar 2.3. Perpindahan Panas Kombinasi Konveksi, Konduksi, dan Radiasi

(Sumber : J.P.Holman, 2010)

Energi radiasi dikeluarkan oleh benda karena temperatur, yang dipindahkan melalui ruang antara, dalam bentuk gelombang elektromagnetik. Bila energi radiasi menimpa suatu bahan, maka sebagian radiasi dipantulkan, sebagian diserap, dan sebagian diteruskan seperti gambar 2.3. Sedangkan besarnya energi radiasi ditentukan dari rumus berikut ini:

$$q = \sigma \cdot A \cdot T^4 \dots\dots\dots (2.5)$$

(J.P. Holman, 2010)

Dimana :

q	= Aliran kalor radiasi (Watt)
σ	= Konstanta Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$)
A	= Luas permukaan (m^2)
T	= Temperatur absolut benda ($^\circ\text{C}$)

2.3. Alat Penukar Panas

Menurut Incropera (2011) efektifitas suatu *heat exchanger* didefinisikan sebagai perbandingan antara perpindahan panas yang diharapkan (nyata) dengan perpindahan panas maksimum yang mungkin terjadi dalam *heat exchanger* tersebut. Secara umum, Alat penukar panas atau *heat exchanger* adalah suatu alat yang memungkinkan perpindahan panas dan bisa berfungsi sebagai pemanas maupun sebagai pendingin. Biasanya, medium pemanas dipakai uap lewat panas (*super heated steam*) dan air biasa sebagai air pendingin (*cooling water*). Penukar panas dirancang sebisa mungkin agar perpindahan panas antara fluida dapat berlangsung secara efisien. Pertukaran panas terjadi karena adanya kontak, baik antara fluida terdapat dinding yang memisahkannya maupun keduanya bercampur langsung begitu saja.

Alat Penukar Panas banyak digunakan di banyak aplikasi keteknikan, seperti proses teknik kimia, pembangkit listrik, penyulingan minyak bumi, pendingin, industri makanan, dan sebagainya. (Yang, Jian-Feng, et al., 2014)

2.4. Jenis dan Fungsi Alat Penukar Panas

Alat penukar panas terdiri dari enam alat antara lain *chiller*, *cooler*, *condenser*, *reboiler*, *evaporator* dan *heat exchanger*. Berikut ini penjelasan mengenai fungsi alat penukar panas tersebut sebagai berikut :

a. *Chiller*

Alat penukar kalor ini digunakan untuk mendinginkan fluida sampai pada temperature yang rendah. Temperature fluida hasil pendinginan didalam *chiller* yang lebih rendah bila dibandingkan dengan fluida pendinginan yang dilakukan dengan pendingin air. Untuk *chiller* ini media pendingin biasanya digunakan amoniak atau Freon.

b. *Cooler*

Alat penukar kalor ini digunakan untuk mendinginkan cairan atau gas dengan mempergunakan air sebagai media pendingin. Disini tidak terjadi perubahan fasa, dengan perkembangan teknologi dewasa ini maka pendingin *cooler* mempergunakan media pendingin berupa udara dengan bantuan *fan* (kipas).

c. *Condenser*

Alat penukar kalor ini digunakan untuk mendinginkan uap atau campuran uap, sehingga berubah fasa menjadi cairan. Media pendingin yang dipakai biasanya air atau udara. Uap atau campuran uap akan melepaskan panas atent kepada pendingin, misalnya pada pembangkit listrik tenaga uap yang mempergunakan condensing turbin, maka uap bekas dari turbin akan dimasukkan kedalam kondensor, lalu diembunkan menjadi kondensat.

d. *Reboiler*

Alat penukar kalor ini berfungsi mendidihkan kembali (*reboil*) serta menguapkan sebagian cairan yang diproses. Adapun media pemanas yang sering digunakan adalah uap atau zat panas yang sedang diproses itu sendiri.

e. *Evaporator*

Alat penukar kalor ini digunakan untuk penguapan cairan menjadi uap. Dimana pada alat ini menjadi proses evaporasi (penguapan) suatu zat dari fasa cair menjadl uap. Yang dimanfaatkan alat ini adalah panas latent dan zat yang digunakan adalah air atau refrigerant cair.

f. *Heat Exchanger*

Alat penukar kalor ini bertujuan untuk memanfaatkan panas suatu aliran fluida yang lain. Maka akan terjadi dua fungsi sekaligus, yaitu:

- Memanaskan fluida
- Mendinginkan fluida yang panas

Suhu yang masuk dan keluar kedua jenis fluida diatur sesuai dengan kebutuhannya. (Afandi, 2018)

2.5. Prinsip Kerja Heat Exchanger

Prinsip kerja *heat exchanger* yaitu memindahkan panas dari dua fluida pada temperatur berbeda dimana transfer panas dapat dilakukan secara langsung ataupun tidak langsung (Ikhsan, 2012).

a. secara kontak langsung

panas yang di pindahkan antara fluida panas dan dingin melalui permukaan kontak langsung berarti tidak ada dinding anantara kedua fluida. Transfer panas yang terjadi yaitu melalui *interfase* atau penghubung antara kedua fluida. Contoh : aliran steam pada kontak langsung yaitu dua zat cair yang *immiscible* (tidak dapat bercampur), gas-liquid, dan partikel padat-kombinasi fluida.

b. secara kontak tak langsung

perpindahan panas terjadi antara fluida panas dan dingin melalui dinding pemisah. dalam sistem ini, kedua fluida akan mengalir.

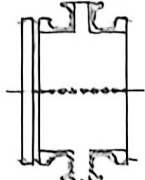
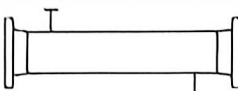
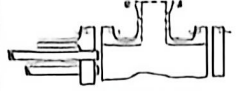
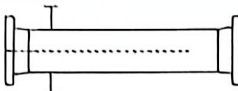
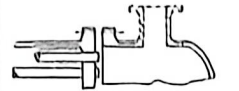
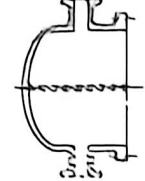
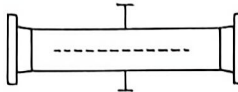
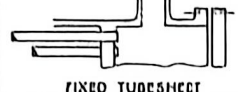
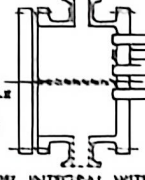
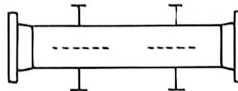
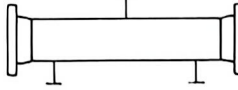
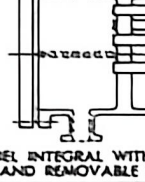
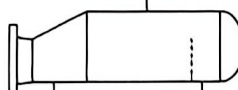
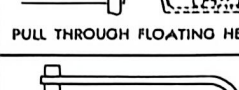
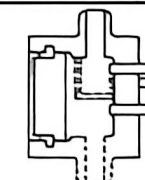
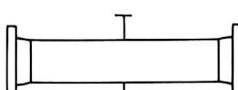
2.6. Jenis Heat Exchanger

Perlu diketahui bahwa untuk alat-alat ini terdapat sautu terminologi yang telah distandarkan untuk menamai alat dan bagian-bagian alat tersebut yang dikeluarkan oleh asosiasi pembuat heat exchanger yang dikenal *engan Tubular Exchanger Manufactures Association* (TEMA). Standarisasi tersebut bertujuan untuk melindungi para pemakai dari bahaya kerusakan atau kegagalan alat, karena alat ini beroperasi pada temperatur dan tekanan yang tinggi (Morris, 2011)

Dalam standar mekanik TEMA, terdapat tiga macam kelas heat exchanger, yaitu :

1. Kelas R, yaitu untuk peralatan yang berkerja dengan kondisi berat, misalnya untuk industri minyak dan kimia berat.
2. Kelas C, yaitu yang dibuat untuk general purpose, dengan didasarkan pada segi ekonomis dan ukuran kecil, digunakan untuk proses-proses umum industri.
3. Kelas B, yaitu untuk menentukan desain dan fabrikasi untuk proses kimia.

Dalam gambar 2.4 diperlihatkan tipe-tipe *shell and tube heat exchanger* berdasarkan desain TEMA.

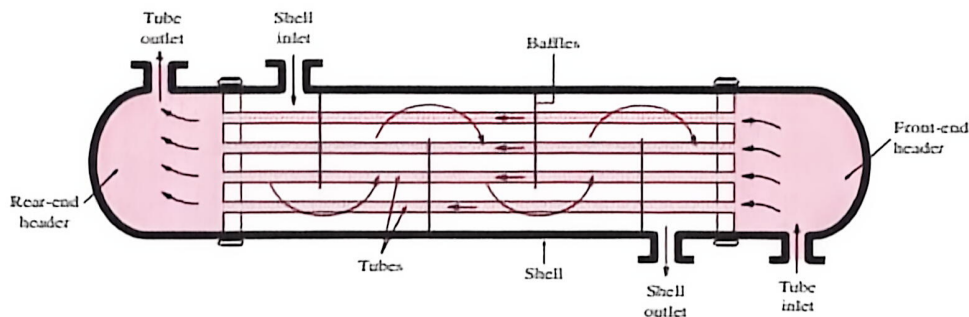
FRONT END STATIONARY HEAD TYPES		SHELL TYPES		REAR END HEAD TYPES	
A		E		L	
	AND REMOVABLE COVER	F		M	
B		G		N	
C		H		P	
	CHANNEL INTEGRAL WITH TUBE-SHEET AND REMOVABLE COVER	J		S	
N		K		T	
D		X		U	
	SPECIAL HIGH PRESSURE CLOSURE			W	

Gambar 2.4. Desain TEMA untuk Shell and Tube Heat Exchanger

(Sumber : Tubular Exchanger Manufacturers Association, 2007)

2.7. Shell and Tube Heat Exchanger

Shell and tube heat exchanger merupakan jenis penukar panas yang paling banyak digunakan dalam industri perminyakan. Alat ini terdiri dari sebuah shell (tabung/silindris besar) dimana di dalamnya terdapat suatu bundle (berkas) pipa dengan diameter yang relatif kecil. Satu jenis fluida mengalir di dalam pipa-pipa sedangkan fluida lainnya mengalir pada bagian luar pipa tetapi masih didalam shell. (Za Tendra, 2011)

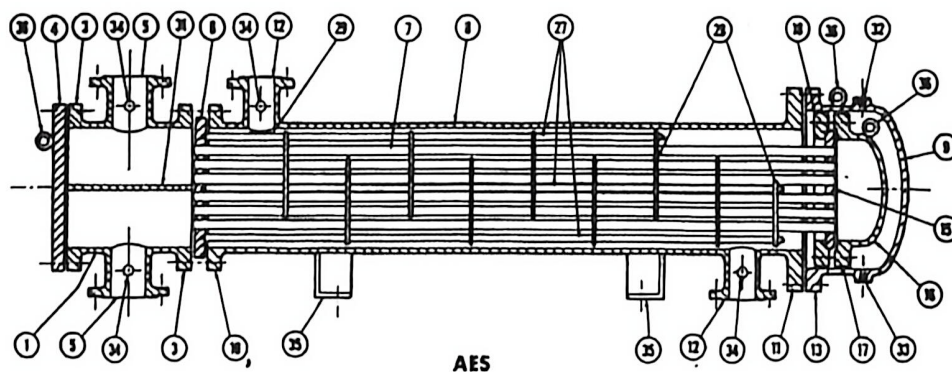


Gambar 2.5. Shell and Tube Heat Exchanger

(Sumber : Yunus.A.Cengel, 2003)

2.8. Komponen – Komponen Shell and Tube Heat Exchanger

Alat penukar kalor tipe Shell and Tube memiliki komponen – komponen yang sangat berpengaruh pada konstruksinya. Adapun komponen – komponen dari alat penukar kalor tipe ini adalah



Gambar 2.6. Komponen-komponen alat penukar kalor tipe shell and tube

(Sumber : Tubular Exchanger Manufacturers Association, 2007)

Bagian-bagian shell and tube heat exchanger :

- | | |
|--------------------------------------|--|
| 1. Channel Fixed tip | 21. Floating Head Cover |
| 2. Hat Fixed Tip | 22. Floating Tube Sheet Skirt |
| 3. Channel Fixed Tip | 23. Packing box Flange |
| 4. Channel Cover | 24. Packing |
| 5. Stationary Head Nozzles | 25. Packing Follower Ring |
| 6. Stationary Tubes Sheet | 26. Lantern Ring |
| 7. Tubes | 27. Tie Rod and Spacer |
| 8. Shell | 28. Transverse Baffle or Support Plate |
| 9. Shell Cover | 29. Impingement Baffle |
| 10. Stationary Shell Flange Head End | 30. Longitudinal Baffle |
| 11. Shell Flange-Rear Head End | 31. Pass Partition |
| 12. Shell Nozzle | 32. Vent Connection |
| 13. Shell Cover Flange | 33. Drain Connection |
| 14. Expansion Joint | 34. Instrument Connection |
| 15. Floating Head Cover | 35. Support Saddle |
| 16. Floating Head Cover | 36. Lifting Lug |
| 17. Floating Head Flange | 37. Support Bracket |
| 18. Head Floating Backing Device | 38. Weir |
| 19. Split Ring Shear | 39. Liquid Level Connection |
| 20. Slip-on Backing Flange | 40. Floating Head Support |

a. Tube

Tube atau pipa merupakan bidang pemisah antara kedua jenis fluida yang mengalir di dalamnya dan sekaligus sebagai bidang perpindahan panas. Ketebalan dan bahan pipa harus dipilih berdasarkan pada tekanan operasi fluida kerjanya. Selain itu, bahan pipa tidak mudah terkorosi oleh fluida kerjanya.

Ukuran pipa yang secara umum digunakan biasanya mengikuti ukuran-ukuran yang telah baku. Komponen alat yang dialiri fluida lainnya, yang dindingnya merupakan lintasan pertukaran panas, dengan ukuran standar IPS (*Iron Pipe Size*) dan ketebalan standar BWG (*Birmingham Wire Gage*). IPS mengacu

pada sistem lama pengukuran pipa yang masih digunakan oleh beberapa industri, termasuk produsen utama pipa PVC, sedangkan BWG merupakan bilangan untuk menyatakan ukuran ketebalan pipa yang berbeda-beda. Semakin besar bilangan BWG semakin tipis tubenya.

Diameter dalam tube merupakan diameter dalam aktual (ukuran Inch) dengan toleransi yang sangat tepat. Tube dapat diubah dari berbagai jenis logam, seperti besi, tembaga, muniz metal, perunggu, 70-30 tembaga-nikel, alumunium perunggu, alumunium, dan stainless steel.

Lubang-lubang pipa pada penampang shell dan tube tidak disusun secara begitu saja namun mengikuti aturan tertentu. Jumlah pipa dan ukurannya harus disesuaikan dengan ukuran shell. Ketentuan ini mengikuti aturan baku dan lubang-lubang pipa disusun berbentuk persegi atau segitiga. Bentuk susunan lubang-lubang pipa secara persegi dan segitiga ini disebut sebagai tube pitch, pitch adalah jarak dari pusat atau center line tube yang satu ke pusat tube yang lainnya (Za Tendra, 2011).

Jenis-jenis tube pitch yang utama adalah :

a. Square pitch

tipe ini biasa digunakan untuk heat exchanger dengan pressure drop yang rendah dan pembersihan secara mekanik dilakukan pada bagian luar tube. Selain itu nilai perpindahan panas dari Square Pitch lebih kecil dibandingkan dengan triangular Pitch. Pusat-pusat tube saling membentuk sudut 90° (persegi empat)

b. Triangular pitch

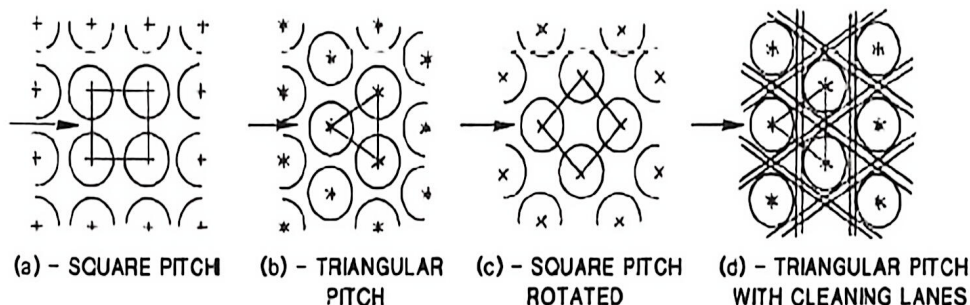
tipe ini banyak digunakan fluida yang tingkat kekotorannya tinggi ataupun rendah. Pusat-pusat tube saling membentuk sudut 60° (segitiga sama sisi) searah dengan aliran fluidanya. Triangular pitch mempunyai nilai perpindahan panas lebih tinggi dari square pitch

c. Square pitch rotated

tipe ini digunakan untuk *heat exchanger* dengan *pressure drop* dan nilai perpindahan panas yang lebih tinggi dibandingkan dengan square pitch square. Square pitch rotated dibersihkan secara mekanik. Pusat-pusat tube saling membentuk sudut 45°

d. triangular pitch with cleaning lanes

tipe ini jarang digunakan seperti triangular pitch, tetapi dapat digunakan untuk *heat exchanger* dengan *pressure drop* sedang hingga tinggi. Triangular pitch with cleaning lanes memiliki nilai perpindahan panas yang lebih baik dari Square pitch.



Gambar 2.7. (a) Square pitch, (b) Triangular pitch, (c) Square pitch rotated, (d) Triangular pitch with cleaning lanes

(Sumber : D.Q.Kern, 1950)

b. Tube sheet

Berfungsi sebagai tempat untuk merangkai ujung-ujung tube sehingga menjadi satu yang disebut tube bundle. Tube sheet terbuat dari material dengan ketebalan dan jenis tertentu tergantung dari jenis fluida yang mengalir pada peralatan tersebut. Heat exchanger dengan tube lurus pada umumnya menggunakan dua buah tube sheet. Sedangkan untuk menyatukan tube-tube menjadi tube bundle dan sebagai pemisah antara tube side dengan shell side.

c. Tie Rods

Batangan besi yang dipasang sejajar dengan tube dan ditempatkan di bagian paling luar dari baffle yang berfungsi sebagai peyangga agar jarak antara baffle yang satu dengan yang lainnya tetap.

d. Shell

Konstruksi shell sangat ditentukan oleh keadaan tube yang akan ditempatkan didalamnya. Shell ini dapat dibuat dari pipa yang berukuran besar atau pelat logam yang di roll. Shell merupakan badan dari heat exchanger dimana terdapat tube bundle. Untuk temperatur yang sangat tinggi terkadang shell dibagi menjadi dua dan disambungkan dengan sambungan ekspansi.

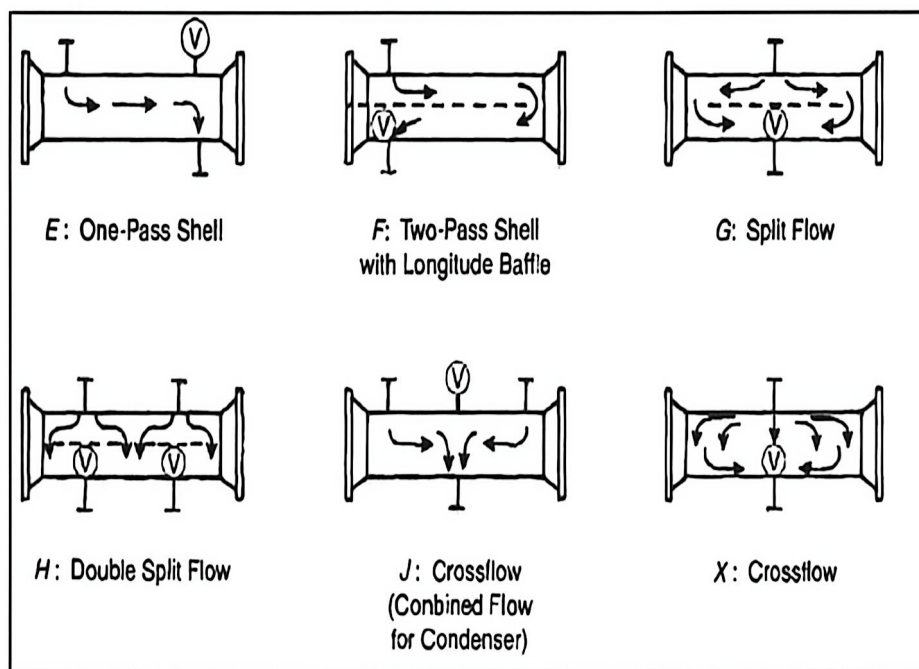
Biasanya, shell berbentuk bulat memanjang (silinder) yang berisis tube bundle sekaligus sebagai wadah mengalirkan fluida. Untuk kemungkinan korosi, tebal shell seiring diberi kelebihan 1/8 in.

Jenis – jenis shell Seperti diketahui bahwa bentuk konstruksi shell alat penukar kalor terdiri dari 7 jenis, yaitu E, F, G, H, J, K dan X. masing-masing jenis konstruksi mempunyai karakteristik sendiri, untuk itu diperlukan pertimbangan dalam menentukan pemilihan penggunaannya. Shell tipe E merupakan salah satu jenis shell yang paling ekonomis, efisiensi termalnya baik, terdiri dari satu pass. Factor koreksi selisih temperatur rata-rata (Log mean temperature difference- F factor) tinggi. Sesuai kebutuhan operasi, apabila terdapat aliran multi pass dalam shell, perlu dipertimbangkan apakah menggunakan 1 shell tipe E F.

Dalam hal ini pilihan mungkin akan lebih ekonomis. Tetapi sebaliknya supaya dipikirkan apakah tidak terjadi kesulitan lain dengan pilihan itu, seperti masalah perbaikan memasukkan dan mengeluarkan tube bundle, dan kerugian panas. Segi lain yang perlu diperhatikan dalam pemilihan shell adalah penurunan tekanan atau

pressure drop. Jika pressure drop pada sisi shell dibatasi, apakah tidak lebih baik menggunakan shell dengan tipe J, walaupun pada tipe ini terjadi kerugian panas (faktor koreksi F rendah). Masalah pressure drop juga dapat diatasi oleh shell tipe G dan H, dimana terjadi pemisahan aliran dan sedikit mengorbankan faktor koreksi F.

Alat penukar kalor dengan satu laluan cangkang adalah tipe yang paling banyak digunakan karena konstruksinya sederhana dan harganya pun murah. Dalam tipe ini, cairan masuk disalah satu ujung shell, dan keluar pada ujung yang lain. Tabung mungkin mempunyai satu laluan atau dua laluan dan dapat didukung oleh baffle melintang.



Gambar 2.8. Skematik dari beberapa tipe shell yang sering digunakan
(Sumber : Morris, 2011)

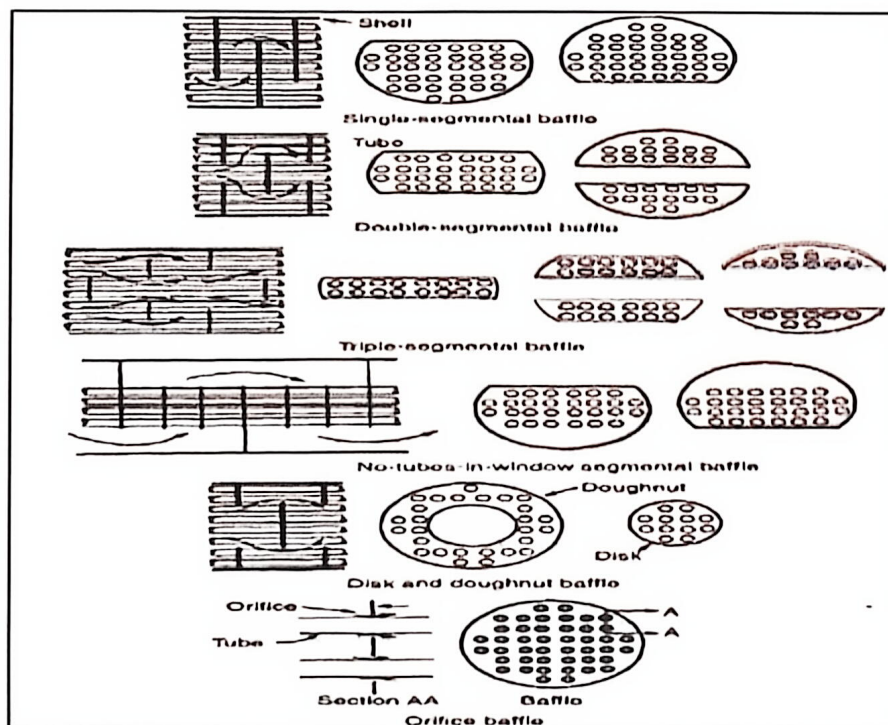
e. Baffle

Baffle atau sekat merupakan bagian yang penting dari heat exchanger. Pemasangan baffle pada heat exchanger bertujuan untuk membuat turbulensi aliran fluida baik pada shell dan tube serta menambah waktu tinggal (residence time), tetapi pemasangan baffle akan memperbesar pressure drop operasi dan menambah beban kerja pompa, sehingga laju alir fluida yang dipertukarkan panasnya harus diatur. Selain itu, baffle pun memiliki fungsi lain yaitu untuk menahan tube bundle dan mengurusi vibrasi.

Ditinjau dari segi konstruksi, baffel dapat diklasifikasikan dalam 4 kelompok, yaitu:

1. Sekat pelat berbentuk segmen (*segmental baffles plate*).
2. Sekat batang (*rod baffles*).
3. Sekat mendatar (*longitudinal baffles*).
4. *Impingement baffles*

Biasanya jenis sekat ini dipergunakan secara sendiri-sendiri, namun dalam hal keperluan khusus, dapat dikombinasikan jenis yang satu dengan yang lainnya. Hal ini jarang sekali dilakukan. Plat baffel berbentuk segmen yang sering digunakan ditunjukkan pada gambar 2.9 dibawah ini.



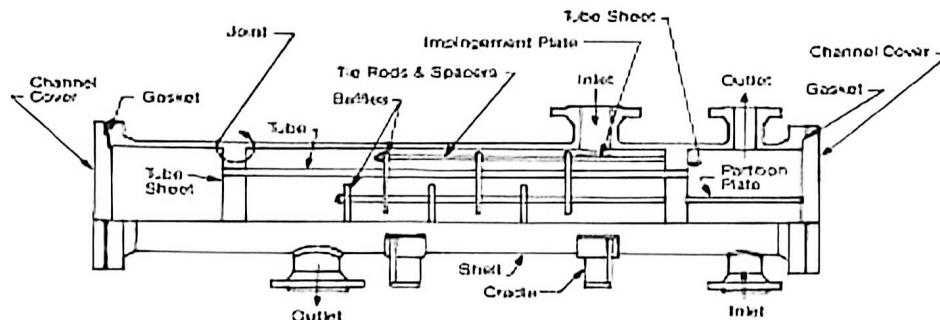
Gambar 2.9. Jenis Plat Baffle

(Sumber : G.F.Hewitt,G.L.Shires,T.R.Bott, 1994)

2.9. Jenis Shell and Tube Heat Exchanger

Berdasarkan konstruksinya, shell and tube heat exchanger dibagi menjadi tiga kategori yaitu (Za Tendra, 2011) :

1. Fixed Tube Sheet Heat Exchanger



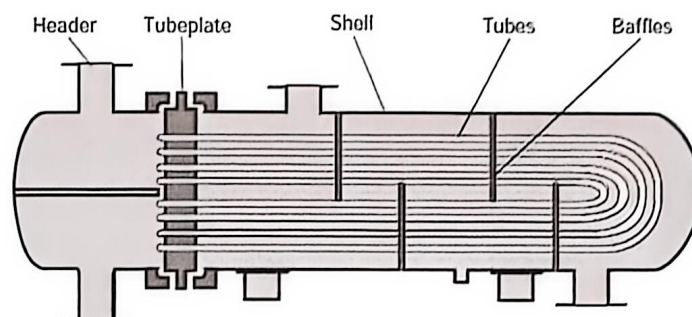
Gambar 2.10. Konstruksi alat penukar kalor jenis Fixed Tube Sheet Heat Exchanger
(Sumber : Za Tendra, 2011)

Fixed Tube Sheet merupakan jenis shell and tube heat exchanger yang terdiri dari tube-bundle yang dipasang sejajar dengan shell dan kedua tube sheet menyatu dengan shell. Kelebihan utama dari konstruksi fixed tube sheet adalah biaya rendah karena konstruksinya yang sederhana, selama ekspansi joint tidak diperlukan. Kelebihan lainnya adalah tube dapat dibersihkan secara mekanik setelah penutup saluran (bonnet) dilepas.

Kelemahan dari desain ini adalah sisi luar dari tube tidak dapat dibersihkan secara mekanis karena bundle tidak dapat dilepas dari shell sehingga kesulitan pada penggantian tube dan pembersihan shell. Akan tetapi, dapat diaplikasikan cara yang tepat yaitu dengan menggunakan bahan kimia untuk fouling services pada shell side.

2. U Tube Heat Exchanger

U tube atau U bundle hanya mempunyai 1 buah tube sheet, dimana tube dibuat berbentuk U yang ujung-ujungnya disatukan pada tube sheet sehingga biaya yang dibutuhkan paling murah diantara shell and tube heat exchanger yang lain. Tube bundle dapat dikeluarkan dari shell-nya setelah channel head-nya dilepas. Tipe ini dapat digunakan pada tekanan tinggi dan beda temperatur yang tinggi. Masalah yang sering terjadi pada heat exchanger ini adalah terjadinya erosi pada bagian dalam bengkokan tube yang disebabkan oleh kecepatan aliran dan tekanan didalam tube, untuk itu fluida yang mengalir dalam tube side haruslah fluida yang tidak mengandung partikel-partikel padat.



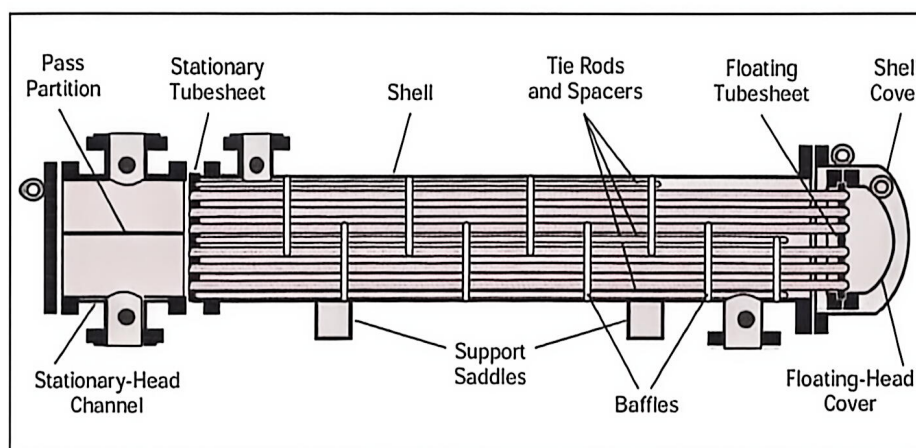
Gambar 2.11. Konstruksi alat penukar kalor jenis U Tube Heat Exchanger
(Sumber : Za Tendra, 2011)

Biaya pembuatan sebuah heat exchanger U tube sebanding dengan fixed tube sheet karena diimbangi oleh biaya tambahan yang dikeluarkan untuk membengkokkan tube menjadi seperti huruf U dan diameter shell yang agak lebih besar.

Keuntungan dari U tube heat exchanger ini adalah sisi luar dapat dibersihkan karena tube bundle dapat dilepas. Kerugian U tube heat exchanger adalah bagian dalam tube tidak dapat dibersihkan secara efektif karena tikungan pada tube akan membutuhkan fleksibel end mengebor lubang untuk cleaning. Jadi, U tube heat exchanger sebaiknya tidak menggunakan untuk cairan kotor didalam tube.

3. Floating Tube Sheet Heat Exchanger

Floating Tube Sheet merupakan heat exchanger yang dirancang dengan salah satu tube sheet-nya mengambang, sehingga tube bundle dapat bergerak didalam shell jika terjadi pemuaian atau penyusutan karena adanya perubahan suhu yang terjadi dalam heat exchanger. Tipe ini banyak digunakan dalam industri migas karena pemeliharaannya lebih mudah dibandingkan fixed tube sheet. Selain itu, tube bundle-nya dapat dikeluarkan dan dapat digunakan pada operasi dengan perbedaan temperatur antara shell dan tube di atas 200°F.



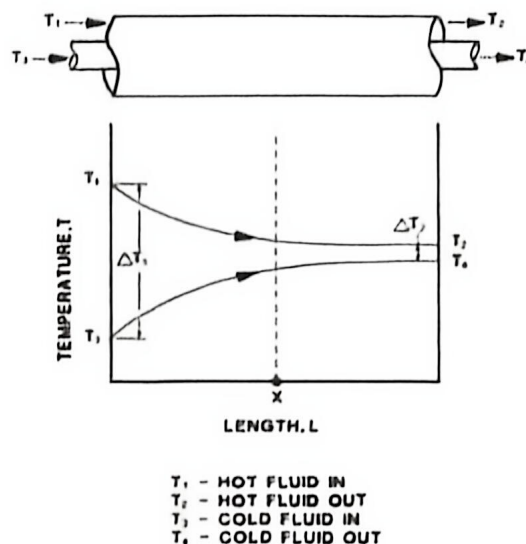
Gambar 2.12. Konstruksi alat penukar kalor jenis Floating Tube Sheet Heat Exchanger
(Sumber : Za Tendra, 2011)

2.10. Jenis Aliran Dalam Shell and Tube Heat Exchanger

Pada alat heat exchanger terdapat tiga tipe aliran dalam alat penukar panas, yaitu (Za Tendra, 2011)

a. *Parallel flow* (Aliran Searah)

Yaitu apabila 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 mengalir dengan arah yang sama. Karakter penukar panas jenis ini temperatur fluida yang memberikan energi akan selalu lebih tinggi dibanding yang menerima energi sejak mulai memasuki penukar kalor hingga keluar. (Za Tendra, 2011)



Gambar 2.13. Tipe aliran parallel flow (searah) dan profil temperatur
(Sumber : D.Q.Kern, 1950)

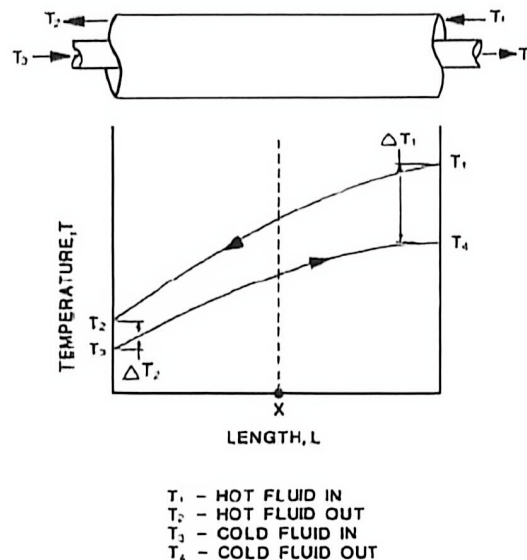
Dengan kesetimbangan panas maka diperoleh besarnya perbedaan temperatur suhu rata-rata fluida adalah :

$$LMTD_{pf} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} = \frac{(th1 - tc1) - (th2 - tc2)}{\ln \left(\frac{th1 - tc1}{th2 - tc2} \right)} \dots \dots \dots (2.6)$$

(G.F.Hewitt, G.L. Shires, T.R. Bott, 1994)

b. *Counter flow* (Aliran Berlawanan Arah)

Counter current flow atau *counter flow* adalah aliran berlawanan arah, dimana fluida yang satu masuk pada ujung penukar kalor, sedangkan fluida yang satu lagi masuk pada ujung penukar kalor yang lain, masing-masing fluida ini mengalir menurut arah yang berlawanan. Untuk tipe *counter current flow* ini memberikan panas yang lebih baik bila dibandingkan dengan aliran searah atau parallel. Sedangkan banyaknya pass (lintasan) juga berpengaruh terhadap efektifitas dari alat penukar panas yang digunakan. (Za Tendra, 2011)



Gambar 2.14. Tipe aliran counter flow (berlawanan arah) dan profil temperatur
(Sumber : D.Q.Kern, 1950)

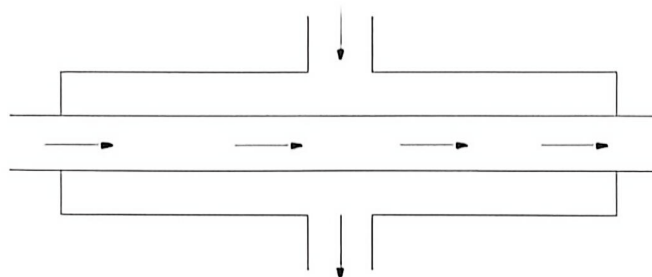
Dengan kesetimbangan panas maka diperoleh besarnya perbedaan temperatur suhu rata-rata fluida adalah :

$$LMTD_{cf} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln \left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2} \right)} = \frac{(th1 - tc2) - (th2 - tc1)}{\ln \left(\frac{th1 - tc2}{th2 - tc1} \right)} \dots \dots \dots (2.7)$$

(G.F.Hewitt, G.L. Shires, T.R. Bott, 1994)

c. Cross flow (Aliran Silang)

Cross-flow atau sering disebut dengan aliran silang adalah apabila fluida-fluida yang mengalir sepanjang permukaan bergerak dalam arah saling tegak lurus. (Za Tendra, 2011)



Gambar 2.15. Tipe aliran cross flow (silang)
(Sumber : Za Tendra, 2011)

Pada aliran ini, besarnya beda temperatur rata-rata adalah besarnya LMTD aliran berlawanan dikalikan besarnya faktor koreksi. Besarnya faktor koreksi diberikan sesuai dengan bentuk dari konstruksi saluran dimana dua fluida yang berbeda temperatur mengalir.

$$\text{LMTD} = F_1 \times \text{LMTD}_{\text{cf}} \dots \dots \dots (2.8)$$

(G.F.Hewitt, G.L. Shires, T.R. Bott, 1994)

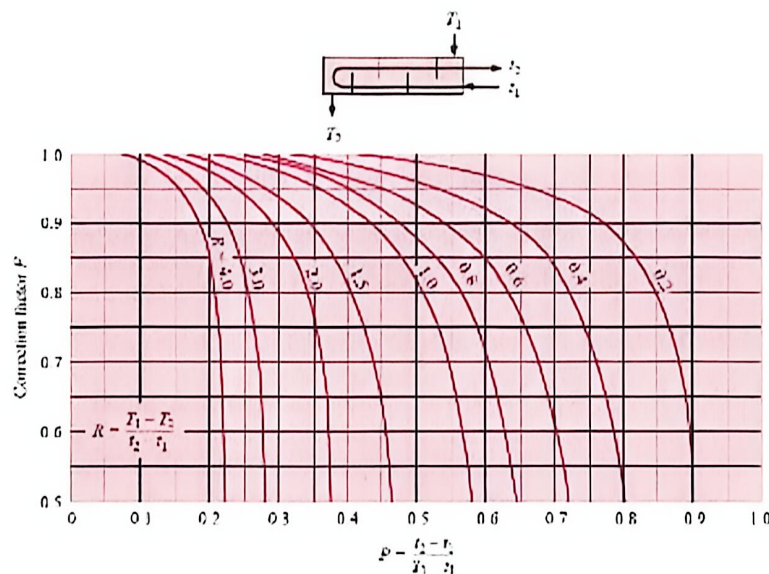
Faktor koreksi (F_1) untuk konfigurasi aliran silang didapat dengan membandingkan dua temperatur rasio P dan R yang didefinisikan sebagai :

$$P = \frac{t_{c2} - t_{c1}}{t_{h1} - t_{c1}} \dots \dots \dots (2.9)$$

(G.F.Hewitt, G.L. Shires, T.R. Bott, 1994)

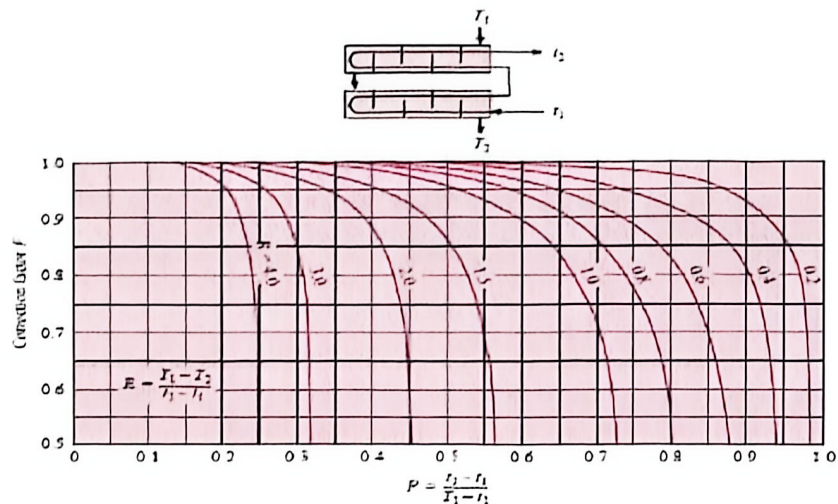
$$R = \frac{t_{h1} - t_{h2}}{t_{c2} - t_{c1}} \dots \dots \dots (2.10)$$

(G.F.Hewitt, G.L. Shires, T.R. Bott, 1994)



Gambar 2.16. Grafik faktor koreksi untuk penukar kalor dengan 1 lintasan shell dan 2, 4, atau masing-masing kelipatan dari lintas tabung tersebut.

(Sumber : J.P.Holman, 2010)



Gambar 2.17. Grafik faktor koreksi untuk penukar kalor dengan 2 lintasan shell dan 4, 8, atau masing-masing kelipatan dari lintasan tabung tersebut.

(Sumber : J.P.Holman, 2010)

Didalam alat penukar kalor cairan atau gas yang melewati tabung atau tube biasanya digunakan dalam proses pemanasan ataupun pendinginan. Fluida yang digunakan dalam banyak aplikasi tersebut dipaksa untuk mengalir dengan menggunakan kipas ataupun pompa melalui sebuah pipa yang panjang yang diharapkan terjadi perpindahan panas. Pada aliran dalam dibatasi oleh luas permukaan bagian dalam pipa, dan terdapat batasan seberapa besar lapisan batas dapat berkembang. Aliran dalam adalah bukan aliran yang bebas sehingga kita membutuhkan suatu alternatif. Kecepatan fluida didalam pipa berubah dari nol pada permukaan karena tidak ada slip yang terjadi, sampai kecepatan maksimum pada pusat pipa. Dimana kecepatan aliran didalam pipa dapat diketahui dengan persamaan :

$$V = \frac{Q}{A} \dots \dots \dots (2.11)$$

(Bruce R Munson, 2009)

Dimana : V = Kecepatan aliran (m/s)
 Q = Debit aliran (m³/s)
 A = luas permukaan pipa (m²)

Disisi lain, untuk menghitung perpindahan kalor pada suatu alat penukar kalor membutuhkan laju aliran massa. Persamaan untuk menghitung laju aliran massa, yakni :

$$\dot{m} = \rho \cdot V \cdot A \dots \dots \dots (2.12)$$

(J.P. Holman, 2010)

Dimana :

$\dot{m}$	= Laju aliran massa fluida panas (kg/s)
ρ	= Massa jenis fluida panas (kg/m ³)
V	= Kecepatan aliran (m/s)
A	= luas permukaan pipa (m ²)

Dan laju aliran massa volumetrik didefinisikan sebagai berikut :

$$G = \frac{\dot{m}}{a} = \rho \cdot V \dots \dots \dots (2.13)$$

(J.P. Holman, 2010)

Dimana :

G	= Laju aliran massa volumetrik (kg/m ² .s)
$\dot{m}$	= Laju aliran massa fluida panas (kg/s)
a	= Luas daerah aliran (m ²)

Dimana untuk menentukan laju aliran massa volumetrik memerlukan luas daerah aliran (flow area) dengan persamaan :

Flow area untuk sisi tube :

$$at = Nt \frac{A}{n} \dots \dots \dots (2.14)$$

(G.F.Hewitt, G.L. Shires, T.R. Bott, 1994)

Dimana :

at	= Luas daerah aliran tube (m ²)
Nt	= Jumlah tube
A	= Luas permukaan pipa (m ²)
n	= Jumlah lintasan

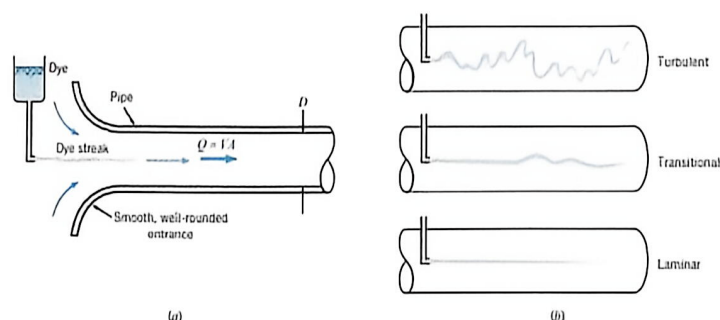
Flow area untuk sisi shell :

$$a_s = \frac{D_i \cdot C' \cdot L_b}{P_t} \dots \dots \dots (2.15)$$

(G.F.Hewitt,G.L.Shires,T.R.Bott, 1994)

Dimana : a_s = Luas daerah aliran shell (m²)
 D_i = Diameter dalam shell (m)
 L_b = Jarak antar baffle (m)
 P_t = Jarak antara 2 pusat tube (m)
 C' = P_t – Diamter luar tube (m)

Aliran didalam pipa dapat berupa aliran laminar ataupun turbulen, bergantung pada kondisi aliran. Aliran fluida digambarkan dengan menggunakan garis arus dan pada kecepatan yang rendah terjadi aliran laminar, tetapi berubah menjadi aliran turbulen ketika kecepatannya meningkat melalui nilai kritis. Transisi dari aliran laminar ke aliran turbulen tidak terjadi dalam waktu yang singkat, namun itu terjadi melalui rentang kecepatan yang fluktuatif diantara laminar dan turbulen sebelum aliran tersebut menjadi aliran yang turbulen. Kebanyakan aliran yang masuk kedalam pipa adalah turbulen. Aliran laminar terjadi ketika fluida yang mengalir memiliki viskositas yang tinggi seperti minyak yang mengalir didalam pipa yang memiliki diameter yang kecil, ataupun pada jarak yang dekat. Osborne Reynolds (1841-1912), ilmuwan dan ahli matematika inggris, adalah orang yang pertama kali membedakan dua kasifikasi aliran ini dengan menggunakan sebuah peralatan sederhana seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.18 dibawah ini.



Gambar 2.18. Eksperimen untuk menentukan jenis aliran

(Sumber : Bruce R Munson, 2009)

Gambar 2.18 menunjukkan jenis aliran tersebut tergantung pada kecepatan fluida yang melalui pipa dan dapat ditentukan dengan bilangan Reynolds (Re), yaitu perbandingan antara efek inersia dan viskos dalam aliran. Dari percobaan tersebut

Osborne Reynolds menentukan rumus empiris untuk menentukan besarnya nilai bilangan Reynold dalam sebuah pipa. Untuk aliran didalam pipa yang memiliki penampang lingkaran, bilangan Reynold didefinisikan sebagai :

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D_i}{\mu} = \frac{G \cdot D_i}{\mu} \dots \dots \dots (2.16)$$

(J.P. Holman, 2010)

Dimana : ρ = kerapatan fluida (kg/m³)
 V = kecepatan aliran (m/s)
 D_i = diameter dalam pipa (m)
 μ = viskositas dinamik (kg/m.s)

Dimana diameter untuk sisi shell digunakan persamaan diameter hidraulik (D_h) diameter untuk bentuk penampang saluran tempat fluida itu mengalir tidak bulat maka koefisien perpindahan kalor itu didasarkan atas diameter hidraulik (D_h) yang didefinisikan dengan persamaan :

$$D_h = \frac{4 \cdot A}{P} \dots \dots \dots (2.17)$$

(G.F.Hewitt, G.L. Shires, T.R. Bott, 1994)

Dimana : D_h = diameter hidraulik (m)
 A = luas penampang aliran (m²)
 P = perimeter yang basah (m)

Tetapi diameter hidraulik untuk susunan Square pitch menggunakan persamaan :

$$D_h = \frac{4 \left(P t^2 - \frac{\pi D_o t^2}{4} \right)}{\pi \cdot D_o t} \dots \dots \dots (2.18)$$

(G.F.Hewitt, G.L. Shires, T.R. Bott, 1994)

Dimana D_{ot} adalah diameter luar tube. Dan untuk susunan Triangular pitch menggunakan persamaan :

$$D_h = \frac{4 \left(\frac{P_t}{2} \times 0,86 \cdot P_t - \frac{1}{2} \left(\frac{\pi D_{ot}^2}{4} \right) \right)}{\pi \cdot \frac{D_{ot}}{2}} \dots\dots\dots(2.19)$$

(G.F.Hewitt,G.L.Shires,T.R.Bott, 1994)

Angka Reynolds digunakan sebagai kriteria untuk menunjukan apakah aliran dalam tabung atau pipa itu laminar atau turbulen dimana :

$Re < 2300$	Aliran Laminar
$2000 \leq Re \leq 4000$	Aliran Transisi
$Re > 4000$	Aliran Turbulen

(J.P. Holman, 2010)

Ketika perbedaan temperatur antara permukaan pipa dengan fluida kerja besar, sangat penting untuk menghitung variasi kekentalan dengan temperatur. Bilangan Nusselt rata-rata untuk aliran laminar yang berkembang pada sebuah pipa berpenampang lingkaran dapat ditentukan dengan persamaan :

$$Nu = 1,86 (Re Pr)^{1/3} \left(\frac{D}{L} \right)^{1/3} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \dots\dots\dots(2.20)$$

(J.P. Holman, 2010)

Untuk aliran turbulen berkembang penuh didalam pipa yang halus, sebuah persamaan sederhana untuk menghitung bilangan Nusselt dapat diperoleh dari :

$$Nu = \frac{h \cdot D}{k_f} = C (Re)^{0,8} (Pr)^n \dots\dots\dots(2.21)$$

(J.P. Holman, 2010)

Dimana :	Nu	= Bilangan Nusselt
	h	= Koefisien perpindahan panas ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
	D	= Diameter pipa (m)
	k_f	= Konduktivitas termal pada fluida ($W/m \cdot ^\circ C$)

dan, n untuk ketentuan :	0,4	= Untuk fluida yang dipanaskan
	0,3	= Untuk fluida yang didinginkan
C untuk ketentuan aliran :	0,021	= Untuk Gas
	0,023	= Untuk cairan tidak viscos
	0,027	= Untuk cairan viscos

Dan untuk bilangan Prandl (Pr) diperoleh dari :

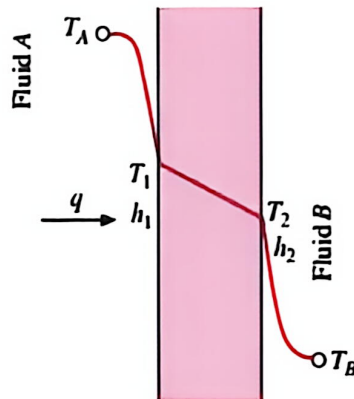
$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k_f} \dots\dots\dots(2.22)$$

(J.P. Holman, 2010)

Dimana :	Pr	= Bilangan Prandl
	C_p	= Panas jenis air (J/kg .°C)
	μ	= viskositas dinamik (kg/m.s)
	k_f	= Konduktivitas termal pada fluida (W/m.°C)

2.11. Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh

Dalam alat penukar kalor terdapat dua jenis fluida yang mengalir dan dipisahkan oleh dinding material berupa pipa. Dimana perpindahan panas terjadi terhadap kedua fluida dengan perantara dinding solid tersebut, yaitu pertama dari fluida panas akan berpindah panasnya menuju permukaan dinding yang terjadi secara konveksi, selanjutnya panas akan berpindah melewati dinding solid menuju permukaan dinding fluida dingin yang terjadi secara konduksi, kemudian panas dari akan berpindah ke fluida dingin yang terjadi secara konveksi sehingga temperatur fluida dingin menjadi naik. Berikut pada gambar 2.19 ini adalah perpindahan panas menyeluruh pada bidang datar.



Gambar 2.19. Perpindahan panas menyeluruh melalui bidang datar
(Sumber : J.P.Holman, 2010)

Dalam penghitungan koefisien pindahan panas menyeluruh efek radiasi apapun biasanya termasuk didalam koefisien perpindahan panas konveksi. Dimana koefisien pindahan panas menyeluruh melalui bidang datar seperti gambar 2.19 dinyatakan sebagai berikut :

$$U = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{\Delta x}{kA} + \frac{1}{h_2 A}} \dots \dots \dots (2.23)$$

(J.P. Holman, 2010)

Dimana T_A dan T_B masing-masing adalah suhu fluida pada kedua sisi dinding itu. Koefisien pindah panas menyeluruh U didefinisikan oleh hubungan persamaan :

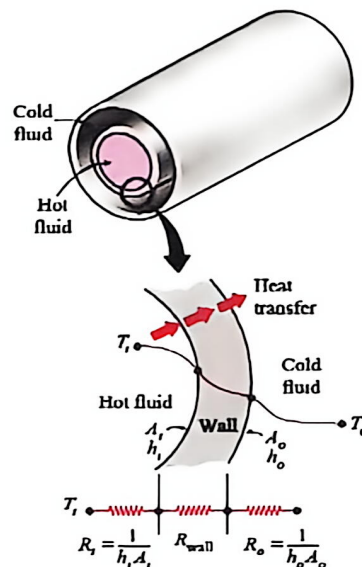
$$q = U.A..LMTD \dots \dots \dots (2.24)$$

(J.P. Holman, 2010)

Dimana :

- q = Perpindahan kalor total secara pindahan panas (Watt)
- U = Koefisien perpindahan panas menyeluruh ($W/m^2 \cdot ^\circ C$)
- A = Luas permukaan perpindahan panas (m^2)
- $LMTD$ = Log Mean Temperatur Difference ($^\circ C$)

Dimana A merupakan luas bidang aliran kalor. Jaringan tahanan panas dihubungkan dengan proses perpindahan panas ini yang terdiri dari dua tahanan panas konveksi dan satu tahanan panas konduksi seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.20.



Gambar 2.20. Jaringan tahanan panas pada alat penukar kalor

(Sumber : Yunus. A Cengel, 2003)

k adalah konduktifitas thermal dinding dan L adalah panjang tabung sehingga tahanan thermal total menjadi :

$$R = R_{\text{total}} = R_i + R_{\text{dinding}} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o} \dots \dots \dots (2.25)$$

(Yunus. A Cengel, 2003)

Dalam menganalisis alat penukar kalor sangat penting diperlukan untuk mengabungkan semua tahanan panas yang terjadi pada fluida panas sampai dingin menjadi sebuah tahanan panas R , maka koefisien pindahan panas menyeluruh melalui bidang silindris seperti gambar 2.20 dinyatakan sebagai berikut :

$$U = \frac{1}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o}} \dots \dots \dots (2.26)$$

(J.P. Holman, 2010)

Dimana :

- U = Koefisien perpindahan panas menyeluruh ($\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$)
- h = Koefisien perpindahan panas pipa ($\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$)
- A = Luas penampang pipa (m^2)
- L = Panjang tube (m)
- k = Konduktivitas termal pipa ($\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$)
- r = Jari-jari pipa (m)

Dimana subskrip i dan o menunjukan bagian dalam dan luar tabung. Koefisien perpindahan kalor menyeluruh bisa didasarkan atas luas dalam dan luas luar tabung sesuai selera perancang dengan persamaan :

$$U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{A_i}{A_o} \frac{1}{h_o}} \dots\dots\dots (2.27)$$

(J.P. Holman, 2010)

$$U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i} \frac{1}{h_i} + \frac{A_o \ln\left(\frac{r_o}{r_i}\right)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o}} \dots\dots\dots (2.28)$$

(J.P. Holman, 2010)

2.12. Efektivitas Shell and Tube Heat Exchanger

Pendekatan LMTD dalam analisis penukar kalor berguna bila suhu masuk dan keluar diketahui atau dapat ditentukan dengan mudah sehingga LMTD dapat dengan mudah dihitung dan aliran kalor, luas permukaan, dan koefisien perpindahan panas kalor menyeluruh dapat ditentukan. Bila kita harus menentukan suhu masuk atau keluar, analisis kita akan melibatkan prosedur iterasi karena LMTD itu suatu fungsi logaritma. Dengan demikian, analisis akan lebih mudah dilaksanakan dengan menggunakan metode yang berdasarkan atas efektivitas penukar kalordalam memindahkan sejumlah kalor tertentu. Metode efektivitas ini juga mempunyai beberapa keuntungan untuk menganalisis soal-soal dimana kita harus membandingkan berbagai jenis penukar kalor gua memilih jenis terbaik untuk melaksanakan sesuatu tugas pemindahan kalor tertentu.

Efektivitas penukar kalor didefinisikan sebagai perbandingan antara perpindahan kalor aktual dengan perpindahan kalor maksimum yang mungkin.

$$\varepsilon = \frac{Q_{\text{aktual}}}{Q_{\text{maksimum}}} \dots \dots \dots (2.29)$$

(J.P. Holman, 2010)

Dimana kalor sebenarnya (aktual) dapat dihitung dari energi yang dilepaskan oleh fluida panas atau energi yang diterima oleh fluida dingin.

Dimana persamaan untuk perpindahan kalornya adalah :

$$q = \dot{m}_h \cdot C_{ph} \cdot (T_{h1} - T_{h2}) = \dot{m}_c \cdot C_{pc} \cdot (T_{c2} - T_{c1}) \dots \dots \dots (2.30)$$

(J.P. Holman, 2010)

Dimana :

q	= Perpindahan kalor (Watt)
$\dot{m}$	= Laju aliran massa fluida (kg/s)
C_p	= Panas jenis fluida (J/kg . °C)
T_1	= Temperatur fluida masuk (°C)
T_2	= Temperatur fluida keluar (°C)

Dimana untuk subskrip h dan c menunjukan fluida panas dan fluida dingin. Untuk menentukan perpindahan kalor maksimum bagi penukar kalor, pertamanya kita harus memahami bahwa nilai maksimum akan didapat bila salah satu fluida mengalami perubahan suhu sebesar suhu maksimum yang terdapat dalam penukar kalor itu, yaitu selisih antara suhu masuk fluida panas dan fluida dingin. Fluida yang mungkin mengalami beda suhu maksimum ini ialah yang nilai $\dot{m}c$ -nya minimum, karena neraca energi mensyaratkan bahwa energi yang diterima oleh fluida yang satu mesti sama dengan energi yang dilepas oleh fluida yang satu lagi. Jika fluida yang mempunyai nilai $\dot{m}c$ yang lebih besar yang kita buat mengalami perubahan suhu yang lebih besar dari maksimum dan ini tentu saja tidak mungkin. (J.P.Holman, 2010)

perpindahan kalor maksimum yang mungkin dinyatakan sebagai :

$$q_{\text{maks}} = C_{\text{min}} (T_{\text{h,in}} - T_{\text{c,in}}) \dots \dots \dots (2.31)$$

(J.P. Holman, 2010)

Dimana kapasitas minimum dipilih dari persamaan laju kapasitas kalor sebagai berikut :

$$C_c = \dot{m}_c \times C_{p_c} \dots \dots \dots (2.32)$$

(J.P. Holman, 2010)

$$C_h = \dot{m}_h \times C_{p_h} \dots \dots \dots (2.33)$$

(J.P. Holman, 2010)

Dimana C_{min} dipilih dari laju kapasitas kalor yang lebih kecil antara C_c dan C_h .

2.13. Penentuan Fluida dalam Shell and Tube Heat Exchanger

Penentuan fluida dalam shell and tube Heat Exchanger yaitu :

- a. Fluida bertekanan tinggi dialirkan di dalam tube karena tube standar cukup kuat menahan tekanan yang tinggi
- b. Fluida berpotensi fouling dialirkan di dalam tube agar pembersihan lebih mudah dilakukan.
- c. Fluida korosif dialirkan di dalam tube karena pengaliran di dalam shell membutuhkan bahan konstruksi yang mahal yang lebih banyak.
- d. Fluida bertemperatur tinggi dan diinginkan untuk memanfaatkan panasnya dialirkan di dalam tube karena dengan ini kehilangan panas dapat dihindarkan.

- e. Fluida dengan viskositas yang lebih rendah dialirkan di dalam tube karena pengaliran fluida dengan viskositas tinggi di dalam penampang alir yang kecil membutuhkan energi yang lebih besar. Fluida dengan viskositas tinggi ditempatkan di shell karena dapat digunakan baffle untuk menambah laju perpindahan.
- f. Fluida dengan laju alir rendah dialirkan di dalam tube. Diameter tube yang kecil menyebabkan kecepatan linier fluida (*velocity*) masih cukup tinggi, sehingga menghambat fouling dan mempercepat perpindahan panas. (Indra Wibawa Dwi, 2012)

2.14. Analisis Regresi dan Korelasi Sederhana

2.14.1 Analisis Regresi

Analisis regresi merupakan salah satu analisis yang bertujuan untuk mengetahui pengaruh suatu variabel terhadap variabel lain. Dalam analisis regresi, variabel yang mempengaruhi disebut *Independent Variable* (variabel bebas) dan variabel yang dipengaruhi disebut *Dependent Variable* (variabel terikat). Jika dalam persamaan regresi hanya terdapat satu variabel bebas dan satu variabel terikat, maka disebut sebagai persamaan regresi sederhana, sedangkan jika variabel bebasnya lebih dari satu, maka disebut sebagai persamaan regresi berganda. (Taufik Rochim, 2001)

Tujuan Analisis Regresi :

1. Untuk memperoleh suatu persamaan garis yang menunjukkan persamaan hubungan antara dua variabel. Persamaan garis yang diperoleh disebut persamaan regresi.
2. Untuk mengetahui besarnya pengaruh perubahan tiap unit variabel bebas terhadap perubahan variabel terikatnya. Pengaruh perubahan tiap unit variabel bebas ditunjukkan oleh nilai koefisien regresinya.
3. Untuk menaksir nilai variabel terikat (y) berdasarkan variabel bebas (x) yang nilainya telah diketahui. Penaksiran disini bersifat *deterministik* (pasti) atau

non-stokastik, maksudnya penaksiran atau pendugaan yang dilakukan mengabaikan faktor ketidakpastian. (Taufik Rochim, 2001)

Bentuk Umum Regresi Linier Sederhana adalah :

$$Y = a_0 + bx_i \dots\dots\dots(2.34)$$

(Taufik Rochim, 2001)

Dimana : Y = Variabel Dependen (nilai yang diprediksikan)
 x = Variabel Bebas
 a_0 = Konstanta (nilai Y apabila $x = 0$)
 b = Koefisien regresi

2.14.2 Analisis Korelasi Sederhana

Korelasi Sederhana merupakan suatu teknik statistik yang dipergunakan untuk mengukur kekuatan hubungan antara 2 variabel dan juga untuk dapat mengetahui bentuk hubungan keduanya dengan hasil yang bersifat kuantitatif. Kekuatan hubungan antara 2 variabel yang dimaksud adalah apakah hubungan tersebut erat, lemah, ataupun tidak erat. Sedangkan bentuk hubungannya adalah apakah bentuk korelasinya linear positif ataupun linear negatif.

Nilai korelasi berkisar antara 1 sampai -1, nilai semakin mendekati 1 atau -1 berarti hubungan antara dua variabel semakin kuat. Sebaliknya, jika nilai mendekati 0 berarti hubungan antara dua variabel semakin lemah. Nilai positif menunjukkan hubungan searah (x naik, maka y naik) sementara nilai negatif menunjukkan hubungan terbalik (x naik, maka y turun). (Taufik Rochim, 2001)

Maka nilai korelasi dapat dicari dari rumus berikut :

$$R_{xy} = \frac{SPD_{xy}}{\sqrt{SSD_x \times SSD_y}} \dots\dots\dots(2.35)$$

(Taufik Rochim, 2001)

Dimana :	0.00 - 0,199	= sangat rendah
	0,20 - 0,3999	= rendah
	0,40 - 0,5999	= sedang
	0,60 - 0,799	= kuat
	0,80 - 1,000	= sangat kuat