

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Binary Cycle Power Plants (BCPP)*

BCPP merupakan salah satu teknologi pembangkit yang memanfaatkan uap sisa PLTP (Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi) untuk menjadi sebuah pembangkit listrik baru. sistem *Binary Cycle* dioperasikan dengan Uap panas pada temperatur lebih rendah yaitu antara 100°-182°C. Pada BCPP uap panas yang berasal dari PLTP tidak pernah menyentuh turbin. Uap panas ini digunakan untuk memanaskan apa yang disebut dengan fluida kerja (biasanya senyawa organik seperti propana, yang mempunyai titik didih rendah dari air. Fluida kerja kemudian menjadi panas dan menghasilkan uap berupa flash. Uap yang dihasilkan di *heat exchanger* tadi lalu dialirkan untuk memutar turbin dan selanjutnya menggerakkan generator untuk menghasilkan sumber daya listrik. Uap panas yang dihasilkan di *heat exchanger* inilah yang disebut sebagai secondary (binary) fluid. *Binary Cycle Power Plants* ini sebenarnya merupakan sistem tertutup. Jadi tidak ada yang dilepas ke atmosfer. Keunggulan dari BCPP ialah dapat dioperasikan pada suhu rendah yaitu 90-175⁰C. Diperkirakan pembangkit listrik panas bumi BCPP akan semakin banyak digunakan dimasa yang akan datang. (Dipippo, 2012)

2.2. *Heat Exchanger*

Heat exchanger atau penukar panas adalah alat yang digunakan untuk menukarkan panas secara kontinyu dari suatu medium ke medium lainnya dengan membawa energi panas. Suatu *heat exchanger* terdiri dari elemen penukar kalor yang disebut sebagai inti atau matrix yang berisikan di dinding penukar panas, dan elemen distribusi fluida seperti tangki, *nozzle* masukan, *nozzle* keluaran, pipa-pipa, dan lain-lain. Biasanya, tidak ada pergerakan pada bagian-bagian dalam *heat exchanger*. Namun, ada pengecualian untuk *regenerator rotary* dimana matriksnya digerakan berputar dengan kecepatan yang dirancang. Dinding permukaan *heat exchanger* adalah bagian yang bersinggungan langsung dengan fluida yang mentransfer panasnya secara konduksi. (Holman, 1994)

Hampir disemua *heat exchanger*, perpindahan panas didominasi oleh konveksi dan konduksi dari fluida panas ke fluida dingin, dimana keduanya dipisahkan oleh dinding. Perpindahan panas secara konveksi sangat dipengaruhi oleh bentuk geometri *heat exchanger* dan tiga bilangan tak berdimensi, yaitu bilangan Reynold, bilangan Nusselt dan bilangan Prandtl fluida. Besar konveksi yang terjadi dalam suatu *double-pipe heat exchanger* akan berbeda dengan *cros-flow heat exchanger* atau *compact heat exchanger* atau *plate heat exchanger* untuk berbeda temperatur yang sama. Sedangkan besar ketiga bilangan tak berdimensi tersebut tergantung pada kecepatan aliran serta properti fluida yang meliputi massa Jenis, viskositas absolut, panas jenis dan konduktivitas panas.



Gambar 2.1 *Heat Exchanger* (<http://www.indiamart.com>)

2.3 Prinsip Kerja *Heat Exchanger*

Heat exchanger bekerja berdasarkan prinsip perpindahan panas (*heat transfer*), dimana terjadi perpindahan panas dari fluida yang temperaturnya lebih tinggi ke fluida yang temperaturnya lebih rendah. Biasanya, ada suatu dinding metal yang menyekat antara kedua cairan yang berlaku sebagai konduktor . Suatu solusi panas yang mengalir pada satu sisi yang mana memindahkan panasnya melalui fluida lebih dingin yang mengalir di sisi lainnya. Energi panas hanya mengalir dari yang lebih panas kepada yang lebih dingin dalam percobaan untuk menjangkau keseimbangan. Permukaan area *heat exchanger* mempengaruhi efisiensi dan kecepatan perpindahan panas yang lebih besar area permukaan panas *exchanger*, lebih efisien dan yang lebih cepat pemindahan panasnya. (Sitompul, 1993)

2.4. *Shell and Tube Heat Exchanger*

Jenis ini merupakan jenis yang paling banyak digunakan dalam industry perminyakan. Alat ini terdiri dari sebuah *shell* (tabung/slinder besar) dimana didalamnya terdapat suatu *bundle* (berkas) pipa dengan diameter yang *relative* kecil. Satu jenis fluida mengalir didalam pipa-pipa sedangkan fluida lainnya mengalir dibagian luar pipa tetapi masih didalam *shell*. Alat penukar panas *shell* dan *tube* terdiri atas suatu bundel pipa yang dihubungkan secara parallel dan ditempatkan dalam sebuah pipa mantel (*Shell*). Fluida yang satu mengalir di dalam bundel pipa, sedangkan fluida yang lain mengalir di luar pipa pada arah yang sama, berlawanan, atau bersilangan. Kedua ujung pipa tersebut dilas pada penunjang pipa yang menempel pada *Shell*. Untuk meningkatkan efisiensi pertukaran panas, biasanya pada alat penukar panas *Shell* dan *Tube* dipasang sekat (*baffle*). Ini bertujuan untuk membuat turbulensi aliran fluida dan menambah waktu tinggal (*residence time*), namun pemasangan sekat akan memperbesar *pressure drop* operasi dan menambah beban kerja pompa, sehingga laju alir fluida yang dipertukarkan panasnya harus diatur. Ada beberapa fitur desain termal yang akan diperhitungkan saat merancang tabung di *shell* dan penukar panas tabung. Ini termasuk:

- a. Diameter pipa : Untuk mengurangi masalah fouling dan pembersihan, diameter tabung yang lebih besar dapat digunakan. Jadi untuk menentukan diameter tabung, ruang yang tersedia, biaya dan sifat fouling dari cairan harus dipertimbangkan.

b. Ketebalan tabung: Ketebalan dinding tabung biasanya ditentukan untuk memastikan:

- Ada ruang yang cukup untuk korosi
- Getaran aliran-diinduksi memiliki ketahanan
- Kekuatan Axial

Kadang-kadang ketebalan dinding ditentukan oleh perbedaan tekanan maksimum di dinding.

c. Panjang tabung : penukar panas biasanya lebih murah ketika mereka memiliki diameter *shell* yang lebih kecil dan panjang tabung panjang. Dengan demikian, biasanya ada tujuan untuk membuat penukar panas sekecil mungkin. Namun, ada banyak keterbatasan untuk ini, termasuk ruang yang tersedia di mana akan digunakan dan kebutuhan untuk memastikan bahwa ada tabung tersedia dalam panjang yang dua kali panjang yang dibutuhkan (sehingga tabung dapat ditarik dan diganti).

d. Tabung *pitch* : ketika mendesain tabung, lebih baik untuk memastikan bahwa tabung *pitch* (yaitu jarak pusat-pusat tabung sebelah) tidak kurang dari 1,25 kali diameter luar tabung

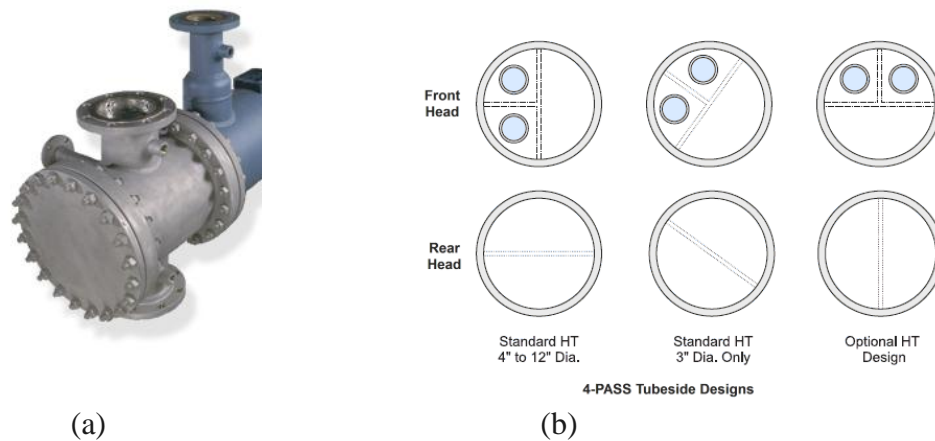
Shell and tube Heat Exchanger terdiri dari serangkaian tabung. Satu set dari tabung berisi cairan yang harus dipanaskan atau didinginkan. Cairan kedua berjalan lebih dari tabung yang sedang dipanaskan atau didinginkan sehingga dapat menyediakan panas atau menyerap panas yang dibutuhkan.

(Kern, 1984)

2.5 Komponen –komponen *Shell and tube Heat Exchanger*

1. *Head*

Head yaitu kepala *heat exchanger* yang berfungsi sebagai penutup bagian depan dan belakang *shell*. Bentuk dari kepala *heat exchanger* ini adalah lingkaran. Tebal plat dari kepala *heat exchanger* ini tergantung dengan hasil perhitungan yang ditentukan dari karakteristik fluida yang akan diproses di dalam *heat exchanger*. *Head* ini dapat dihubungkan dengan dinding bejana (*shell*) *heat exchanger* dengan baut dan *connection tubesheet* dimana ukuran atau diameter dari pada *head* harus sama dengan *shell*, untuk ketebalan bejana akan sedikit lebih tipis dibandingkan dengan ketebalan dinding, sedangkan untuk jenis material sama dengan material yang digunakan pada *shell*. (Kern, 1984) Berikut ini adalah gambar *head heat exchanger* :



Gambar 2.2 (a) *Head*; (b) Desain *Heat Exchanger* (<http://www.wermac.org>)

2. *Shell*

Shell merupakan komponen *heat exchanger* tempat terjadinya proses pertukaran kalor antar fluida. *Shell* berbentuk silinder yang dapat menahan tekanan dari luar. Tebalnya *shell* tergantung dari hasil perhitungan dan dari karakteristik fluida yang akan diproses didalamnya, dimana dinding *shell* terbuat dari plat baja yang di *roll* dibentuk menjadi suatu diameter lingkaran yang berbentuk tabung. Ukuran dan diameter *shell* dapat disesuaikan dengan dengan hasil perhitungan panjang tube dan jumlah *tube* didalamnya. Berikut ini adalah contoh gambar *shell heat exchanger* :



Gambar 2.3 *Shell* (<http://2.bp.blogspot.com>)

3. *Tube*

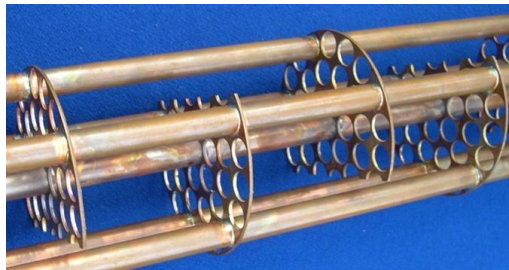
Tube adalah pipa-pipa berukuran kecil sebagai tempat mengalirnya fluida yang akan didinginkan atau dipanaskan pada *heat exchanger*. Ukuran dari pipa ini diperoleh dari asumsi dan perhitungan perpindahan panasnya. Biasanya terbuat dari material yang memiliki konduktivitas thermal yang besar. Bentuk dari tube dapat disesuaikan dengan *heat exchanger* yang akan digunakan seperti terlihat pada gambar 2.4 dibawah ini :



Gambar 2.4 *Tube* (<http://img.directindustry.com>)

4. *Baffles*

Baffles adalah sekat sekat yang dipasang pada tube yang berfungsi untuk mengarahkan aliran sehingga distribusi perpindahan panas merata dan juga sebagai penopang komponen *tube*.



Gambar 2.5 *Baffles* (<http://www.alternative-heating-info.com>)

5. *Nozzle*

Nozzle berfungsi sebagai penghubung antara *shell* dengan proses pemipaan aliran fluida yang akan dialirkan keluar masuk (*nozzle outlet inlet*) dari dan *shell* itu sendiri, dari dan ke proses lanjutan kedalam sistem pemipaan atau *interface* atau alat-alat instrumen pendukung lainnya.

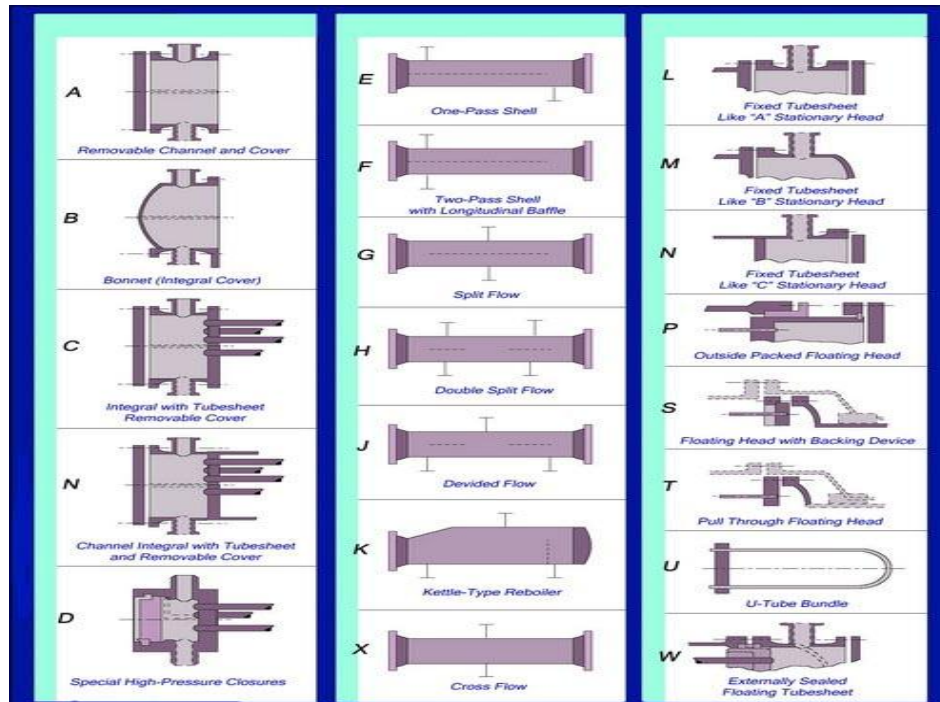


Gambar 2.6 *Nozzle* (<http://www.tradekorea.com>)

2.6 Desain *Shell and Tube Heat Exchanger*

Terdapat banyak variasi pada desain *shell and tube*. Secara khusus, ujung dari tiap tabung dihubungkan ke plenums (terkadang disebut *water boxes*) melalui lubang dalam *tube sheets*. *Shell and Tube Heat Exchanger* adalah jenis *heat exchanger* yang paling umum dipergunakan pada proses *Refinery Oil and Gas* dan *Petrochemical*.

Dalam hal design *Shell and Tube Heat Exchanger* (STHE), standar yang dipakai adalah ASME Section VIII dan TEMA Class R, atau API 660. Ada dua sisi utama dalam *design* STHE, *shell side* dan *tube side*. Berdasarkan konstruksinya, STHE dapat dibagi atas beberapa tipe, masing masing tipe diberi kode berdasarkan kombinasi *type front head, shell, dan rear head*. Gambar berikut adalah *type-type head dan shell* yang dimaksud.

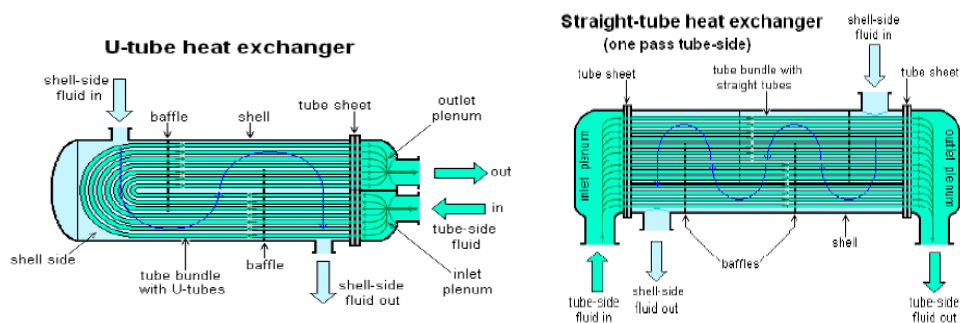


Gambar 2.7 Tipe-tipe *head and shell* berdasarkan koonstruksiny (TEMA, 2007)

Tabel 2.1 Karakteristik masing-masing tipe *shell and tube* (TEMA, 2007)

Karakteristik	L, M, N	U	S	T	W	P	Bayonet tube
1. Kemungkinan untuk arah aliran berbeda antara Shell dan Tube	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya
2. Pelepasan tube bundle	Tidak	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya (a)
3. Menempatkan kembali bundle	Tidak	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya (a)
4. Pelepasan dan pemasangan kembali tube secara individual	Ya	Hanya Tube terluar	Ya	Ya	Ya	Ya	Ya
5. Metode pembersihan bagian dalam	Beragam	Chemical	Beragam	Beragam	Beragam	Beragam	Beragam
6. Metode pembersihan bagian luar (b)	Chemical	Beragam	Beragam	Beragam	Beragam	Beragam	Beragam (a)
7. Jumlah Pass pada tube Side	Lebih dari satu	Lebih dari satu	Satu atau lebih (c)	Satu atau lebih (c)	Satu atau dua (d)	Lebih dari 1 (e)	Satu (Spesial)
8. Kemungkinan konstruksi untuk double TubSheet	Ya	Ya	Tidak	Tidak	Tidak	Ya	Ya
9. Penggunaan Internal Gasket	Tidak	Tidak	Ya	Ya	Tidak	Tidak	Tidak
10. Rata-rata Diametral Clearance (mm)	11 - 18	11 - 18	35 - 50	95 - 160	15 - 35	25 - 50	11 - 18
Notes:							
(a) Dengan asumsi tubesheet untuk tube terluar tidak di las kan ke Shell.							
(b) Mechanical cleaning luar dimungkinkan hanya dengan type pitch square dan rotated square atau wide triangular.							
(c) Konstruksi satu pass packed gland atau Floating Head							
(d) Nozzle untuk tube side musti pada stationary end untuk dua pass							
(e) Axial nozzle dipakai pada Rear head							

Setelah mengetahui karakteristik dari masing masing *type shell and tube heat exchanger*, selanjutnya desain didasarkan atas keperluan atau servicenya. Desain yang kompleks biasanya menimbulkan biaya yang lebih mahal dan perawatan yang lebih sulit sehingga biasanya hanya digunakan untuk keperluan yang tidak memungkinkan penggunaan yang lebih simpel. Tabung mungkin berbentuk lurus atau bengkokkan dimana dengan bentuk U atau sering disebut dengan U-tubes.



Gambar 2.8 *U-tube* dan *Straight Tube Heat Exchanger* (Sitompul, 1993)

Didalam pembangkit daya listrik disebut reactor air bertekanan, *heat exchangers* besar disebut steam generator merupakan berfasa ganda. *Shell and tubes* yang secara khas memiliki *Utubes*. Semua hal tersebut digunakan untuk mendidihkan air dari steam turbin condenser menjadi uap air untuk mengendalikan turbin tersebut untuk menghasilkan tenaga. Kebanyakan *shell and tube heat exchanger* memiliki desain aliran baik 1,2, atau 4 aliran pada sisi tabung. Hal ini bergantung pada frekuensi fluida pada tabung yang melalui fluida pada *shell*.

Pada *heat exchanger* berfasa tunggal, fluida masuk pada satu ujung tabung dan keluar melalui ujung tabung lainnya. *Steam turbin condenser* dalam pembangkit tenaga sering merupakan *1-pass straight tube heat exchanger*. Dua dan empat *pass* merupakan desain yang umum karena fluida dapat masuk dan keluar pada sisi yang sama. Hal tersebut membuat konstruksinya menjadi lebih sederhana. Terdapat *baffles* yang mengarahkan aliran melalui sisi *shell* sehingga fluida tidak mengambil jalan pintas melalui sisi *shell* yang dapat menyebabkan volume arus rendah yang tidak efektif.

Heat exchanger arus berlawanan merupakan yang paling efisien sebab memberikan perbedaan suhu rata-rata yang paling tinggi antara arus dingin dengan arus panas. Banyak perusahaan tidak menggunakannya sebab dapat rusak dengan mudah dan menjadi lebih mahal untuk dibangun. Sering *multiple heat exchanger* dapat digunakan untuk menirukan arus aliran berlawanan dari *exchanger* tunggal yang besar. (Priyono, 1994)

2.7 Pemilihan Material *Shell*

Agar dapat memindahkan panas dengan baik, material *shell* harus mempunyai *thermal conductivity*. Karena panas ditransfer dari suatu sisi yang panas menuju sisi yang dingin melalui *shell*, terdapat perbedaan temperatur sepanjang lebar *shell*. Karena ada kecenderungan material *shell* untuk mengembang berbeda-beda secara *thermal* pada berbagai temperatur *thermal stresses* muncul selama operasi. Hal ini sesuai terhadap tegangan dari tekanan tinggi dari fluida itu sendiri. (Priyono, 1994)

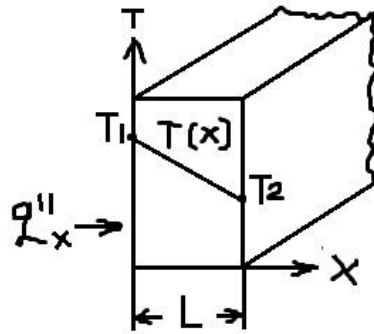
Material *shell* juga harus sesuai dengan kedua hal yaitu sisi *shell* dan sisi tube yang dialiri untuk periode lama dibawah kondisi-kondisi operasi (temperatur, tekanan, pH, dan lain-lain) untuk memperkecil hal yang buruk seperti korosi. Semua yang dibutuhkan yaitu melakukan pemilihan seksama atas bahan yang kuat, *thermal-conductive*, *corrosion resistant*, material *shell* bermutu tinggi, yang secara khas berbahan metal. Pilihan material tabung yang buruk bisa mengakibatkan suatu kebocoran melalui suatu tabung antara sisi *shell* dan *tube* yang menyebabkan fluida yang lewat terkontaminasi dan kemungkinan hilangnya tekanan.

2.8 Heat Transfer

Heat transfer adalah perpindahan panas yang terjadi karena adanya perbedaan temperatur pada suhu sistem. Perpindahan panas dapat terjadi secara konduksi, konveksi dan radiasi. (Cengel, 2003)

2.8.1 Konduksi

Konduksi ialah pemindahan panas yang dihasilkan dari kontak langsung antara permukaan-permukaan benda. Konduksi terjadi hanya dengan menyentuh atau menghubungkan permukaan-permukaan yang mengandung panas. Pada perpindahan panas secara konduksi sangat dipengaruhi oleh sifat *thermal* dari material tersebut. Distribusi temperatur pada perpindahan panas secara konduksi satu dimensi dapat dilihat pada gambar 2.1



Gambar 2.9 Skema distribusi temperatur pada satu dimensi (Priyono, 1994)

Pada analisis *steady state thermal* elemen solid dua dimensi yang mendapatkan panas yang seragam dan permukaan yang lain terisolasi, analisis panas dapat menggunakan hukum Fourier satu dimensi.

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (2.1)$$

Untuk analisis temperatur persamaan data dapat ditulis

$$\Delta T = - \frac{q \Delta x}{kA} \quad (2.2)$$

Dimana :

ΔT = Selisih temperatur

q = heat (W)

k = konduktivitas termal (W/m K)

Δx = tebal

A = Luas penampang (m²)

2.8.2 Konveksi

Pada perpindahan panas secara konveksi, peran media berupa fluida sangat mempengaruhi besarnya panas yang diterima oleh suatu material yang mengalami kontak langsung dengan fluida. Besarnya temperatur

permukaan material yang berkontak langsung dengan fluida secara numerik dapat ditulis. (Incropera, 1986)

$$Q = h A \Delta T \quad (2.3)$$

Dimana :

ΔT = Selisih temperatur ($^{\circ}\text{K}$)

Q = Heat (W)

h = Koefisien perpindahan panas ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)

A = Luas Penampang (m^2)

Pada alat penukar kalor yang memiliki N buah tube maka persamaan diatas menjadi :

$$Q = U N \pi D L \Delta T_{\text{lmtd}} \quad (2.4)$$

Dimana :

N = Jumlah *Tube*

U = Koefisien perpindahan panas Menyeluruh ($\text{W}/\text{m}^2 \text{K}$)

D = Diameter *Tube* (m)

L = Panjang *Tube* (m)

ΔT_{lmtd} = Beda Temperatur Rata-rata Logaritmik

2.8.3 Konveksi Aliran melintang pada silinder

Aliran melintang dari aliran eksternal umumnya melibatkan gerakan fluida normal terhadap sumbu dari silinder yang sirkular. Fluida aliran bebas mengalir ke *forward stagnation point* dengan disertai peningkatan tekanan. Dari point ini, penurunan tekanan dengan peningkatan x , koordinat sumbu aliran dan lapisan batas yang terbentuk dibawah

pengaruh dari gradient tekanan aktif ($dp/dx < 0$). Fenomena transisi lapisan batas sangat tergantung dari bilangan Reynold, Keterpengaruhannya posisi dari separation point. Untuk silinder sirkular karakteristik panjang ialah diameter dan bilangan reynold didefinisikan pada persamaan :
(Dewitt, 1990)

$$Re_D = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (2.5)$$

Dimana :

Re_D = Bilangan Reynold

ρ = Massa jenis (Kg/m^3)

V = Kecepatan aliran (m/s)

D = Diameter (m)

ν = Kecepatan viskositas kinematis (m^2/s)

Kemudian korelasi bilangan reynold dengan bilangan nusselt menurut Zhukauskas untuk silinder sirkular pada aliran melintang sebagai berikut

$$Nu_D = C Re_D^m Pr^n \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.6)$$

Dimana :

Nu_D = bilangan Nusselt

C, m, n = konstanta

Re_D = Bilangan Reynold

Pr = bilangan Prandlt

Pr_s = Bilangan Prandlt surface

Dengan persyaratan bahwa $0,7 < Pr < 500$ dan $1 < Re_D < 10^6$. Kemudian untuk $Pr \leq 10$ maka nilai $n = 0,37$ dan untuk $Pr > 10$ maka nilai $n = 0,36$.

Selanjutnya C berdasarkan tabel.

Tabel 2.2 Konstanta untuk silinder sirkular pada aliran melintang (Kern, 1984)

Re_D	C	M
1 – 40	0,75	0,4
40 – 1000	0,51	0,5
$10^3 - 2 \times 10^5$	0,26	0,6
$2 \times 10^5 - 10^6$	0,076	0,7

2.9 Aliran Fluida dan Distribusi Temperatur Pada Alat Penukar Kalor

Apabila ditinjau aliran fluida alat penukar kalor, maka dapat dibagi dalam

3 macam aliran, yaitu :

1. Aliran sejajar atau paralel *flow*.
2. Aliran berlawanan atau *counter flow*.
3. Aliran kombinasi, gabungan aliran sejajar dan berlawanan.

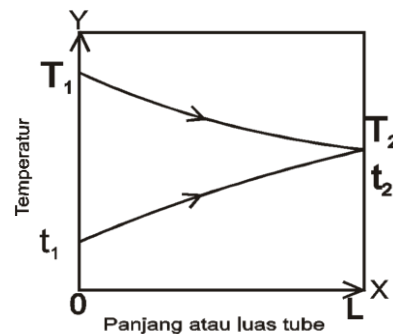
Aliran fluida dan distribusi temperatur pada penukar kalor dapat dibagi atas :

1. Aliran dan Distribusi Temperatur Alat Penukar Kalor yang Langsung

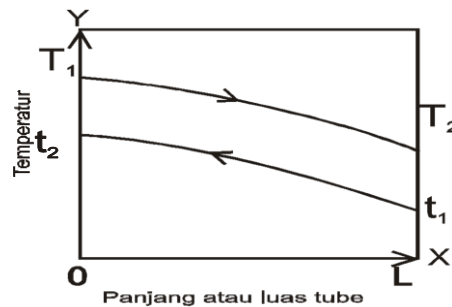
Pada alat penukar , temperatur akhir fluida panas dan fluida dingin menjadi sama karena kedua jenis fluida tersebut akan membentuk campuran (teraduk) keluar dari alat penukar kalor itu. Hal ini berarti,

panas yang diberikan oleh fluida panas diterima secara utuh atau 100% oleh fluida dingin, tanpa ada kerugian panas.

Hubungan antara jenis aliran, distribusi temperatur dan panjang tabung (luas tabung) pada alat penukar kalor yang kontak langsung dapat dilihat pada gambar 2.10



Gambar 2.10. Distribusi temperatur – panjang (luas) tabung alat penukar kalor langsung, dengan aliran fluida parallel. (Kreith, 1968)



Gambar 2.11. Distribusi temperatur – panjang (luas) tabung, alat penukar kalor langsung, dengan aliran fluida berlawanan arah. (Kreith, 1968)

2. Aliran dan Distribusi Temperatur Alat Penukar Kalor yang Tidak Langsung

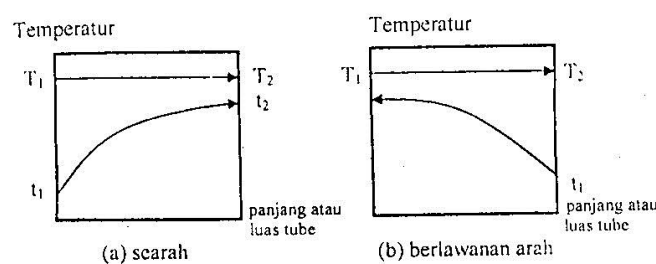
Pada jenis alat penukar kalor ini *tube* berfungsi sebagai pemisah antara fluida panas dengan fluida dingin. Untuk itu perlu pertimbangan yang matang, menentukan fluida mana yang mengalir melalui pipa (*tube*) dan

fluida mana yang mengalir di luar *tube*. Seperti alat penukar yang dibahas pada Tugas Akhir ini, di mana fluida yang bertemperatur rendah mengalir melalui *shell* sedangkan fluida yang bertemperatur tinggi (uap) mengalir di dalam *tube*.

Dilihat dari perubahan fase, maka alat penukar kalor ini dapat dikelompokkan menjadi 2 (dua) kelompok yaitu :

- Aliran dan distribusi temperatur yang mengakibatkan perubahan fase

Dalam hal ini perlakuan umum terjadi kondensasi uap pada kondensor dan penguapan larutan pada *evaporator*. Untuk menggambarkan aliran dan distribusi temperatur kondensor, maka harus diketahui proses yang terjadi di dalam kondensor terjadi perubahan fase uap menjadi fase air (air kondensasi) ini terjadi karena uap (steam) melepaskan panas yang dikandung (*latent heat*) ke air pendingin pada temperatur yang tetap. Maka diagram distribusi temperatur panjang atau luas *tube* dapat digambarkan sebagai berikut :



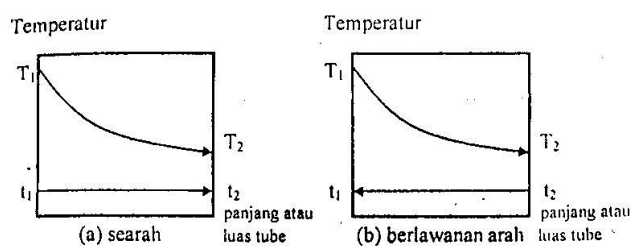
Gambar 2.12 Distribusi temperatur –panjang (luas) *tube* kondensor (Kreith, 1968)

Keterangan gambar 2.12

- Diagram distribusi temperatur-panjang (luas) tube pada kondensor dengan aliran fluida searah (*Parallel flow*).

- b. Diagram distribusi temperatur – panjang (luas) tube pada kondensor dengan aliran fluida berlawanan (*Counter flow*)

Jika pada kondensor terjadi perubahan fase uap menjadi air kondensat, maka pada *evaporator* terjadi sebaliknya, yaitu perubahan fase cairan menjadi uap. Penguapan terjadi pada temperatur tetap, maka distribusi temperatur panjang (luas) tube dapat digambarkan sebagai berikut :



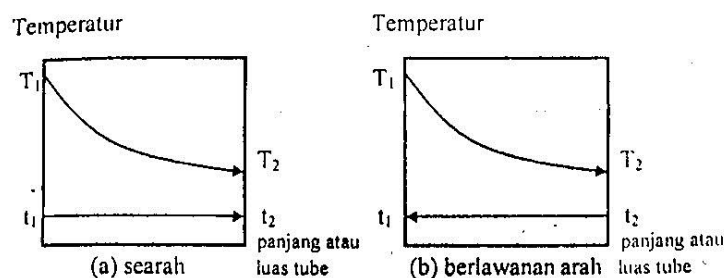
Gambar 2.13 Distribusi temperatur – panjang (luas) tube pada *evaporator* (Kreith, 1968)

Keterangan Gambar 2.13

- Diagram distribusi temperatur – panjang (luas) *tube* pada *evaporator* dengan aliran fluida searah (*Paralel flow*)
- Diagram distribusi temperatur – panjang (luas) *tube* pada *evaporator* dengan aliran fluida berlawanan (*Counter flow*)
- Aliran dan Distribusi Temperatur – Panjang (luas) *tube* pada APK tanpa terjadi Perubahan Fase.

Alat penukar kalor jenis ini sangat banyak dipergunakan pada dunia industri kimia, khusus pada industri penyulingan (distilasi) minyak, alat penukar kalor ini memegang peranan penting pada alat penukar kalor ini, fluida yang bertemperatur tinggi memberikan panas kepada fluida yang

bertemperatur rendah, namun kedua jenis fluida ini tidak mengalami perubahan fase.



Gambar 2.14 Distribusi temperatur – panjang (luas) *tube* pada alat penukar kalor yang tidak mengalami perubahan fase.

(Kreith, 1968)

Keterangan gambar 2.14

- Diagram distribusi temperatur – panjang (luas) *tube* pada alat penukar kalor dengan aliran fluida searah (*Paralel flow*)
- Diagram distribusi temperatur panjang (luas) *tube* pada alat penukar kalor dengan aliran fluida berlawanan (*Counter flow*).

2.10 Analisis Tegangan Bejana Tekan (*Shell*)

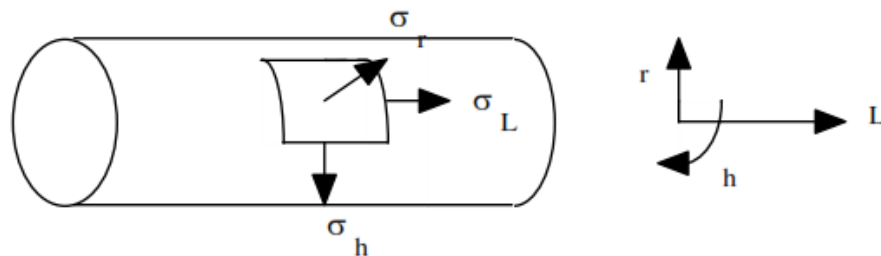
Tujuan utama melakukan evaluasi adalah untuk menentukan apakah komponen dapat bertahan dan aman selama kondisi beroperasi dan tidak mengalami kegagalan atau rusak yang dapat berakibat fatal baik terhadap keseluruhan system atau bahkan terhadap keselamatan operator. Untuk itu yang paling mendasar dalam melakukan evaluasi desain adalah melakukan perhitungan dan analisis tegangan-tegangan yang bekerja pada komponen

dan membandingkan hasil perhitungan tegangannya dengan nilai batas yang diizinkan (*allowable stress*).

Untuk komponen bejana tekan reaktor, tegangan yang terjadi antara lain disebabkan oleh tekanan dalam (*internal pressure*) yang menekan dinding shell dan tegangan *thermal* (*thermal stress*) akibat ekspansi struktur yang disebabkan perbedaan temperatur. (Mardhi, 2011)

2.10.1 Kondisi tegangan pada *Cylindrical Pressure vessel* (*Shell*)

Untuk *shell* dengan dinding tipis ($D/t > 20$) tegangan yang terjadi pada dinding *shell* adalah tegangan kearah memanjang (tegangan longitudinal), tegangan kearah keliling (tegangan tangensial), dan tegangan radial yang diakibatkan oleh tekanan dalam. Karena ketiga tegangan yang bekerja ini beraksi pada arah normal dan dinding, dan dengan tidak terjadinya tegangan geser, maka ketiga tegangan tersebut bisa disebut tegangan-tegangan utama. Tegangan geser tidak terjadi karena pembebanan yang simetri pada dinding *shell*. (Kaminski, 2005)



Gambar 2.15 Kondisi tegangan pada *Pressure Vessel* (Kaminski, 2005)

2.11 Tegangan *Thermal* pada *Tube* (Pipa)

Tegangan yang terjadi pada sistem perpipaan dapat dikelompokkan menjadi dua kategori, yakni Tegangan Normal (*Normal Stress*) dan Tegangan Geser (*Shear Stress*). Tegangan normal terdiri dari tiga komponen tegangan, yaitu:

1. Tegangan Longitudinal (*Longitudinal Stress*), yaitu tegangan yang searah dengan panjang pipa.
2. Tegangan Tangensial atau Tegangan Keliling (*Circumferential Stress* atau *Hoop Stress*), yaitu tegangan yang searah dengan garis singgung penampang pipa.
3. Tegangan Radial (*Radial Stress*), yaitu tegangan yang searah dengan jari-jari penampang pipa.

Tegangan Geser terdiri dari dua komponen tegangan, yaitu:

- a. Tegangan Geser (*Shear Stress*), yaitu tegangan akibat gaya geser.
- b. Tegangan Puntir atau Tegangan Torsi (*Torsional Stress*), yaitu tegangan akibat momen puntir pada pipa.

Salah satu komponen dari Tegangan Longitudinal (*Longitudinal Stress*) adalah Tegangan *Thermal* (*Thermal Stress*). Tegangan thermal pada pipa terjadi karena beban thermal yang dialami oleh pipa. (Kaminski, 2005)

Jika pipa dengan panjang awal L_0 mengalami peningkatan temperatur sebesar (dT), maka besarnya elongasi (dL) yang dialami oleh pipa adalah :

$$dL = A \times dT \quad (2.7)$$

Dimana :

dL : Elongasi pada pipa (m)

A : koefisien ekspansi *thermal* (/K)

L_0 : panjang awal pipa (m)

dT : perubahan temperatur (K)

Sementara itu, besarnya tegangan *thermal* yang dialami oleh pipa adalah :

$$\text{Tegangan } thermal = E \times A \times dT \quad (2.8)$$

E = modulus elastisitas (N/m² atau Pa)

2.12 Teori Kegagalan Elastik

Kegagalan (*failure*) dari suatu elemen mesin yang menerima pembebanan, dinyatakan apabila elemen tersebut tidak dapat berfungsi dengan baik sesuai yang direncanakan. Oleh karena itu, perlu diberikan kriteria-kriteria kapan elemen suatu mesin dapat dikatakan gagal. Untuk pembebanan dengan beban elastik terdapat dua tipe kriteria kegagalan yaitu :

1. Distorsi (*distorsion*) atau *deformasi plastic*. Kegagalan ini menyatakan bahwa bila material dan elemen mesin tersebut sudah mengalami deformasi plastik karena sudah melewati suatu batas harga tertentu. Harga batas ini adalah tegangan atau regangan luluh (*yield point*) material atau bila material tidak mempunyai data *yield point* digunakan standar 0,2% *offset yield point*.
2. Patah/rusak (*fracture*). Kegagalan ini menyatakan bahwa bila material dan elemen mesin tersebut sudah patah atau terpisah menjadi dua bagian atau lebih.

Dan beberapa teori kegagalan elastik yang dikembangkan yang paling banyak digunakan adalah :

1. Teori Tegangan Maksimum (*Maximum Normal Stress Theory-MNST*)
2. Teori Tegangan Geser Maksimum (*Maksimum Shear Stress Theory-MSST*)
3. Teori kegagalan Energi Distorsi Maksimum/ von Mises (*Maximum Distortion energy Theory*)

2.13 Teori Tegangan Normal Maksimum

Teori tegangan normal maksimum (*Maximum Normal Stress Theory-MNST*) diusulkan pertama kali oleh W.J.M. Rankine (1802-1872) sehingga sering juga disebut teori Rankine. Teori ini menyebutkan bahwa suatu material menerima suatu kombinasi pembebanan, akan gagal atau :

1. Luluh, bila tegangan principal positif paling besar, melewati harga tegangan yield tarik material atau bila tegangan *principal negative* paling besar melewati harga tegangan *yield* dari material.
2. Patah atau *fracture*, bila tegangan principal positif (atau negatif) maksimum, melewati harga tegangan tarik (atau tekan) maksimum dari material.
3. Sesuai dengan teori ini, jika luluh dianggap gagal dan material mempunyai tegangan *yield* tarik S_{yt} dan yield S_{yc} serta factor keamanan yang diambil adalah N , maka agar tidak terjadi kegagalan. (Kaminski, 2005)

$$\sigma_t \text{ maksimum} \leq \frac{S_{yt}}{N} \quad \text{dan} \quad \sigma_c \text{ maksimum} \leq \frac{S_{yc}}{N} \quad (2.8)$$

Dengan patah dianggap gagal maka :

$$\sigma_t \text{ maksimum} \leq \frac{S_{ut}}{N} \quad \text{dan} \quad \sigma_c \text{ maksimum} \leq \frac{S_{uc}}{N} \quad (2.9)$$

Dimana :

S_{ut} = Tegangan tarik maksimum material

S_{uc} = Tegangan tekan maksimum material

2.14 Teori Tegangan Geser Maksimum

Teori Tegangan Geser Maksimum (*Maximum Shear Stress Theory-MSST*) diusulkan pertama kali oleh C.A Coulomb (1736-1806), kemudian disempurnakan oleh Tresca (1864) sehingga sering disebut sebagai teori kegagalan tresca. Teori ini secara khusus dipergunakan untuk material ulet (*ductile*) dengan dasar bahwa kegagalan terjadi bila tegangan geser maksimum yang terjadi. Melewati harga tegangan geser yang diijinkan pada material. (Kaminski, 2005)

$$\tau_{\text{maksimum}} \leq \frac{S_{ys}}{N} \quad \text{atau} \quad \tau_{\text{maksimum}} \leq \frac{S_{us}}{N} \quad (2.10)$$

Dimana :

S_{us} = Tegangan yeild geser material

N = Angka keamanan

2.15 Teori Kegagalan Energi Distorsi Maksimum

Dengan suatu pengetahuan hanya pada tegangan yeild dan suatu material, teori kegagalan ini memprediksi “*ductile yielding*” di bawah suatu kombinasi pembebanan, dengan akurasi lebih baik daripada teori-teori kegagalan lainnya. Teori kegagalan ini (*Maximum Distortion Energy Theory*) diusulkan pertama kali oleh M.T. Hueber (1904) kemudian diperbaiki dan diperjelas oleh R.Von Mises (1913) dan oleh H.Hencky (1925). Teori kegagalan ini lebih sering dikenal dengan teori kegagalan Von Mises saja dengan bentuk persamaan sebagai berikut (Anggono, *et al.* 2006)

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{2}}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (2.11)$$

Selanjutnya dengan mengambil angka keamanan N, maka :

$$\sigma_e \leq \frac{S_y}{N} \quad (2.12)$$

2.16 Faktor Keamanan

Faktor keamanan digunakan karena tidak ada proses manufaktur yang bisa menjamin 100% kualitas. Setiap bejana tekan harus memiliki faktor keamanan. Faktor keamanan digunakan untuk memperhitungkan ketidakpastian atau bisa dikatakan ketidaksempurnaan dalam material, perancangan dan fabrikasi. Yang dimaksudkan dengan ketidakpastian dalam material bisa termasuk diskontinuitas yang terjadi pada material. Ketidakpastian dalam perancangan bisa berarti ketidakmampuan untuk memperhitungkan berbagai konsentrasi tegangan yang terjadi.

Ketidakpastian dalam fabrikasi bisa meliputi ketidakmampuan untuk mendeteksi sambungan-sambungan las yang kurang baik. (Stevenlona,2013) Adapun penggolongan faktor keamanan /*safety factor* (Sf) berdasarkan tegangan luluh adalah :

- Sf = 1,25 – 1,5 : kondisi terkontrol dan tegangan yang bekerja dapat ditentukan dengan pasti.
- Sf = 1,5 – 2,0 : Bahan yang sudah diketahui, kondisi lingkungan beban dan tegangan yang tetap dan dapat ditentukan dengan mudah.
- Sf = 2,0 – 2,5 : Bahan yang beroperasi secara rata-rata dengan batasan beban yang diketahui.
- Sf = 2,5 – 3,0 : bahan yang diketahui tanpa mengalami tes. Pada kondisi beban dan tegangan rata-rata.
- Sf = 3,5 – 4,5 : bahan yang sudah diketahui. Kondisi beban, tegangan dan lingkungan yang tidak pasti.

Sedangkan berdasarkan jenis bebannya faktor keamanan / *safety factor* dikelompokkan sebagai berikut :

- Beban statis : 1,25 – 2
- Beban Dinamis : 2-3
- Beban kejut : 3 – 5

2.17 Tegangan *Thermal*

Tegangan *thermal* ialah tegangan yang terjadi akibat adanya perbedaan temperatur pada suatu material dimana besarnya setara dengan regangan yang timbul pada suatu material yang memuai. Pada saat terjadi kenaikan temperatur material akan menerima distribusi panas yang berbeda pada tiap bagian. Distribusi panas yang terjadi menyebabkan terjadinya tegangan panas. Untuk mengetahui besarnya tegangan panas yang terjadi karena pengaruh *heat transfer* dari sistem digunakan persamaan hubungan tegangan regangan material. (Himawan, 2008)

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon^{el}\} \quad (2.13)$$

σ adalah tegangan yang terjadi pada semua arah ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$), D merupakan matriks kekakuan dari material dan ε^{el} adalah vektor regangan elastik. Dari persamaan ini dapat diketahui temperatur mempengaruhi besar kecilnya vektor regangan elastis, karena nilai dari vektor nilai dari vektor regangan elastik mengikuti persamaan dibawah ini :

$$\{\varepsilon^{el}\} = \{\varepsilon\} - \{\varepsilon^{TH}\} \quad (2.14)$$

$\{\varepsilon^{TH}\}$ merupakan thermal strain vector yang nilainya bergantung pada distribusi temperatur pada suatu material dan besarnya termal expansion pada material. Antara *thermal strain vector*, *thermal expansion* (α) dan distribusi temperatur (ΔT) memiliki perbandingan yang sama yaitu semakin besar nilai dari α dan ΔT maka nilai ε^{TH} akan semakin besar pula. Persamaan thermal strain vector adalah (Himawan, 2008)

$$\varepsilon^{TH} = \Delta T [\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z, 0.0, 0] \quad (2.15)$$

2.18 *Finite Element Analysis (FEA)*

Finite Element Analysis (FEA) adalah salah satu ilmu pengetahuan tentang teknik numerik untuk menemukan solusi pendekatan dari partial different equations (PDE) seperti halnya persamaan integral. Pendekatan solusi didasari hal manapun di dalam eliminasi persamaan differensial utuh (kondisi *steady state*) atau mewujudkan PDE ke dalam suatu pendekatan sistem dari persamaan differensial biasa, yang kemudian numerik diintegrasikan menggunakan teknik standar seperti metode Euler, Range Kutta, Newton Raphson dan lain-lain. (Hutton, 2004)

Pada penggunaannya, secara umum perangkat lunak metode elemen hingga memiliki tiga tahapan utama yaitu :

1. *Preprocessing*, pada tahap ini pengguna membuat model yang menjadi bagian untuk dianalisis yang mana geometri tersebut dibagi-bagi menjadi sub-sub bagian yang terdiskritisasi atau disebut “elemen”, dihubungkan pada titik diskritisasi yang disebut “node”. Node tertentu akan ditetapkan sebagai bagian yang melekat kaku (*fix displacement*) dan bagian lain ditentukan sebagai bagian kena beban (*load*).
2. *Analysis*, pada tahap ini data-data yang dimasukkan pada tahap preprocessing sebelumnya akan digunakan sebagai input pada code elemen hingga untuk membangun dan menyelesaikan sistem persamaan aljabar linier atau non linier.

$$\{F\} = [k] \cdot \{u\} \quad (2.16)$$

Dimana u merupakan matriks kolom berisi perpindahan translasi dan rotasi nodal elemen dan F adalah matriks kolom gaya dan momen pada nodal elemen. Informasi matriks k tergantung pada tipe persoalan yang sedang terjadi, dan modul akan mengarah pada pendekatan analisis masalah yang ada.

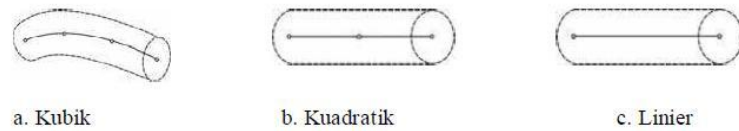
3. *Post-preprocessing* menampilkan hasil akhir setelah penganalisan oleh modul penganalisis dengan menampilkan data displacement dan tregangan pada posisi bagian yang terdiskritisasi pada model geometri. Post-processor biasanya menampilkan grafis dengan kontur warna yang menggambarkan tingkat tegangan yang terjadi pada model geometri, (Roylance, 2001)

2.19 Tipe tipe elemen dalam FEA

Terdapat berbagai tipe bentuk elemen dalam metode elemen hingga yang dapat digunakan untuk memodelkan kasus yang akan dianalisis, yaitu :

1. Elemen satu dimensi

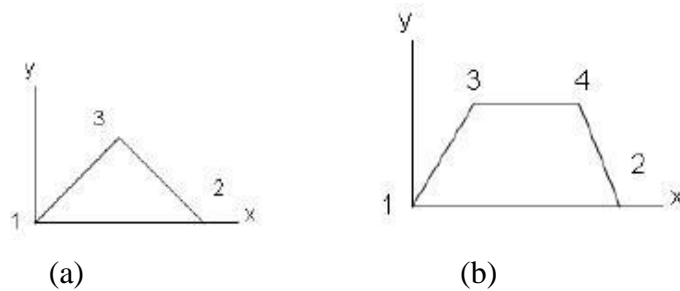
Elemen satu dimensi terdiri dari garis (*line*), tipe elemen ini yang paling sederhana, yakni memiliki dua titik nodal, masing-masing pada ujungnya, disebut elemen garis linier. Dua elemen lainnya dengan orde yang lebih tinggi, yang umum digunakan adalah elemen garis kuadratik dengan tiga titik nodal dan elemen garis kubik dengan empat buah titik nodal.



Gambar 2.16 Elemen satu dimensi (Handayanu, 2005)

2. Elemen dua dimensi

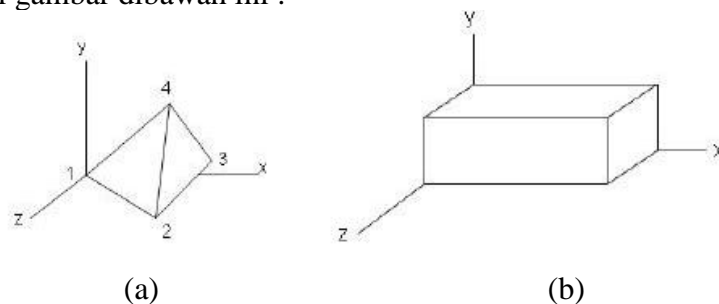
Elemen dua dimensi terdiri dari elemen segitiga (*triangel*) dan elemen segiempat (*quadrilateral*). Elemen orde linier pada masing-masing tipe ini memiliki sisi berupa garis lurus, sedangkan untuk elemen dengan orde yang lebih tinggi dapat memiliki sisi berupa garis lurus, sisi yang berbentuk kurva ataupun dapat pula berupa kedua duanya.



Gambar 2.17 Elemen dua dimensi (a) segitiga; (b) Segi empat (Handayanu, 2005)

3. Elemen tiga dimensi

Elemen tiga dimensi terdiri dari elemen tetrahedron, dan elemen balok seperti gambar dibawah ini :



Gambar 2.18 Elemen Tiga dimensi (a) Tetrahedron; (b) Elemen Balok (Handayanu, 2005)