

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kelapa Sawit

Kelapa sawit (*Elaeis*) adalah tumbuhan industri penting penghasil minyak masak, minyak industri, maupun bahan bakar (*biodiesel*). Perkebunannya menghasilkan keuntungan besar sehingga banyak hutan dan perkebunan lama dikonversi menjadi perkebunan kelapa sawit. Indonesia adalah penghasil minyak kelapa sawit terbesar di dunia. Di Indonesia penyebarannya di daerah Aceh, pantai timur Sumatra, Jawa, dan Sulawesi (Aldo Samulo, 2012).

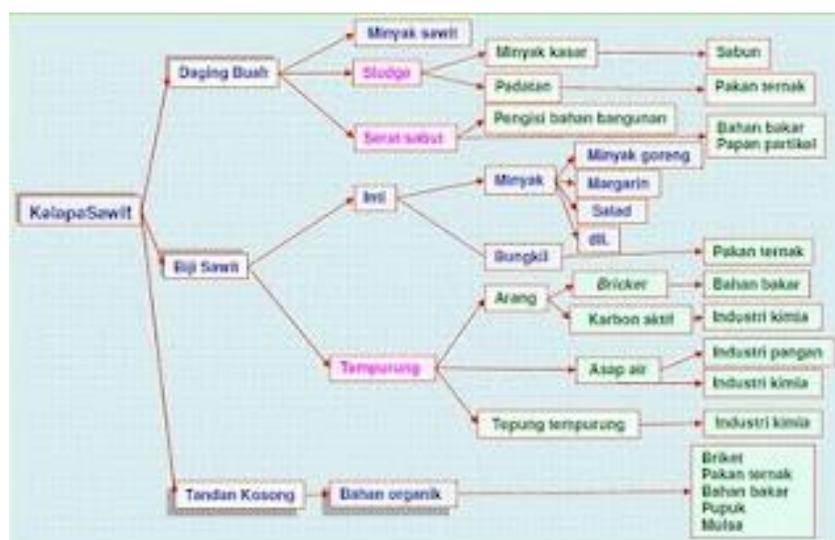
Minyak sawit digunakan sebagai bahan baku minyak makan, margarin, sabun, kosmetika, industri baja, kawat, radio, kulit dan industri farmasi. Minyak sawit dapat digunakan untuk beragam peruntukannya karena keunggulan sifat yang dimilikinya yaitu tahan oksidasi dengan tekanan tinggi, mampu melarutkan bahan kimia yang tidak larut oleh bahan pelarut lainnya, mempunyai daya melapis yang tinggi dan tidak menimbulkan iritasi pada tubuh dalam bidang kosmetik

Bagian yang paling populer untuk diolah dari kelapa sawit adalah buah. Bagian daging buah menghasilkan minyak kelapa sawit mentah yang diolah menjadi bahan baku minyak goreng dan berbagai jenis turunannya. Kelebihan

minyak nabati dari sawit adalah harga yang murah, rendah kolesterol, dan memiliki kandungan karoten tinggi. Minyak sawit juga diolah menjadi bahan baku margarin (Widiantoko, Rizky Kurnia, 2011).

2.2 Jenis dan Potensi Limbah Kelapa Sawit

Jenis limbah kelapa sawit pada generasi pertama adalah limbah padat yang terdiri dari tandan kosong, pelepah, cangkang dan lain-lain. Sedangkan limbah cair yang terjadi pada *housekeeping*. Limbah padat dan limbah cair pada generasi berikutnya dapat dilihat pada Gambar 2.1. Pada Gambar tersebut terlihat bahwa limbah yang terjadi pada generasi pertama dapat dimanfaatkan dan terjadi limbah berikutnya. Terlihat potensi limbah yang dapat dimanfaatkan sehingga mempunyai nilai ekonomi yang tidak sedikit. Salah satunya adalah potensi limbah dapat dimanfaatkan sebagai sumber unsur hara yang mampu menggantikan pupuk sintetis (Urea, TSP dan lain-lain)



Gambar 2.1. Pemanfaatan Limbah Kelapa Sawit
Sumber: (Widiantoko, Rizky Kurnia, 2011)

Tabel 2.1. Jenis, Potensi dan Pemanfaatan Limbah Pabrik Kelapa Sawit
Sumber: (Widiantoko, Rizky Kurnia, 2011)

Jenis	Potensi per ton TBS (%)	Manfaat
Tandan kosong	23,0	Pupuk kompos, pulp kertas, papan partikel, energi
<i>Wet Decanter Solid</i>	4,0	Pupuk, kompos, makanan ternak
Cangkang	6,5	Arang, karbon aktif, papan partikel
Serabut (<i>fiber</i>)	13,0	Energi, pulp kertas, papan, partikel
Limbah cair	50,0	Pupuk, air irigasi
Air kondensat		Air umpan broiler

Limbah padat tandan kosong (TKS) merupakan limbah padat yang jumlahnya cukup besar yaitu sekitar 6 juta ton yang tercatat pada tahun 2004, namun pemanfaatannya masih terbatas. Limbah tersebut selama ini dibakar dan sebagian ditebarkan di lapangan sebagai mulsa. Persentasi tankos terhadap TBS sekitar 20% dan setiap ton tankos mengandung unsur hara N, P, K, dan Mg (Widiantoko, Rizky Kurnia, 2011).

2.3 Bejana Tekan

Bejana tekan (*pressure vessels*) adalah tempat penampungan suatu fluida baik berupa cair maupun gas dengan tekanan yang lebih tinggi dari tekanan atmosfer. *Pressure Vessels* paling sering digunakan sebagai media penampung fluida cairan, uap air, atau gas pada tingkatan tekanan lebih besar dari tekanan udara. *Pressure Vessels* menampung suatu unsur yang digunakan secara luas untuk berbagai aplikasi industri yang mencakup bahan kimia, farmasi, makanan dan minuman, minyak dan bahan bakar, industri nuklir, dan industri plastik. Bejana tekan dapat diklasifikasikan menjadi beberapa jenis berdasarkan konstruksi dan bentuk, ukuran dan penggunaannya. Bejana tekan

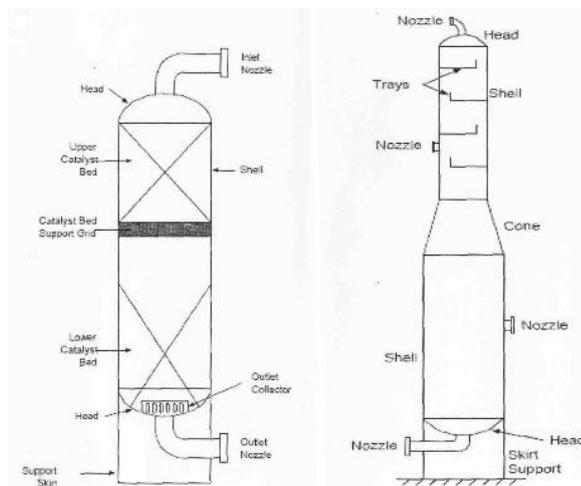
dibuat sesuai dengan ASME *Boiler & Pressure Vessel Code Sec. VIII* Divisi 1, Divisi 2 atau Divisi 3, atau *pressure vessel code* lain yang diakui, atau telah disetujui oleh pihak yang berwenang.

2.4 Klasifikasi Bejana Tekan

Klasifikasi bejana tekan dibagi menurut posisi atau tata letak bejana tekan terdiri dari dua (2) macam posisi yaitu:

1. Posisi *Vertical*

Posisi *vertical* yaitu posisi tegak lurus terhadap sumbu *netral axis*, dimana posisi ini banyak digunakan di dalam instalasi anjungan minyak lepas pantai (*offshore*), yang tidak mempunyai tempat yang tidak begitu luas.



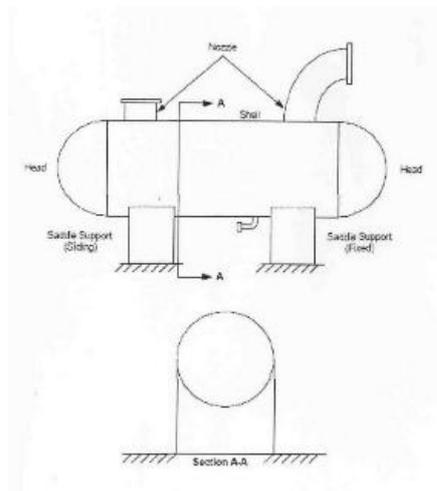
Gambar 2.2. Bejana tekan posisi vertikal
Sumber : (Anonim, 2011)

Jenis bejana tekan ini banyak difungsikan sebagai jenis *2-phase*, yaitu pemisahan antara minyak mentah dan gas saja yang mana pada penggunaan bejana tekan pada posisi *vertical* ini hasil utama yang akan

diproses adalah gas dan cair sehingga gas yang akan dihasilkan lebih kering (*dry gas*) dibandingkan dengan separator pada posisi horizontal.

2. Posisi Horizontal

Bejana tekan pada posisi horizontal banyak ditemukan dan digunakan pada ladang sumur minyak di daratan karena mempunyai kapasitas produksi yang lebih besar. Jenis bejana tekan dengan posisi horizontal ini biasanya berfungsi sebagai separator 3-phase, yaitu pemisahan antara minyak mentah (*crude oil*), air (*water*), dan gas.



Gambar 2.3. Bejana tekan posisi horizontal
Sumber : (Anonim, 2011)

Berdasarkan fungsi dan pemakaiannya, bejana tekan dibagi, antara lain:

1. Tanki Penyimpanan Bahan Bakar

Bejana tekan dapat difungsikan sebagai alat penyimpanan atau penampung bahan bakar cair maupun gas, untuk besar dan ukuran dari tangki penyimpanan bahan bakar tergantung dari kapasitas yang direncanakan berdasarkan kebutuhan, berapa lama bahan bakar tersebut akan digunakan atau simpan.

2. Boiler

Boiler adalah salah satu jenis dari bejana tekan, biasanya digunakan sebagai media penyimpan uap, hasil dari penguapan air yang telah dipanaskan, sebelum uap tersebut digunakan untuk menggerakkan turbin.

3. Tabung Kompresor

Tabung kompresor ini merupakan juga salah satu jenis bejana tekan yang berfungsi sebagai penampung udara yang bertekanan atau dikompresikan.

4. Water Pressure Tank

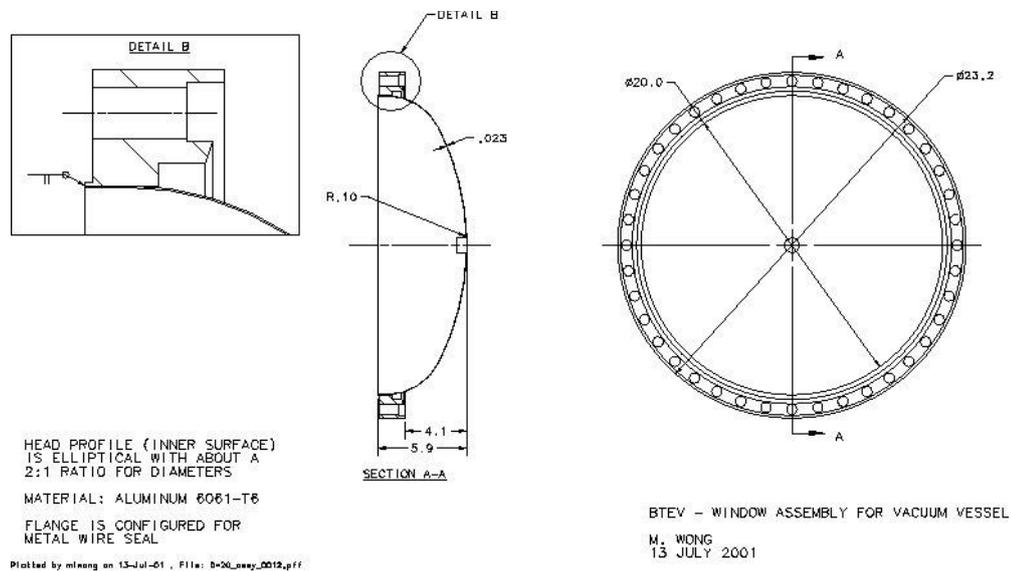
Water pressure tank merupakan salah satu jenis bejana tekan yang berfungsi sebagai penyimpan air yang bertekanan, yang dapat dialirkan melalui pipa-pipa penyalur, dimana dari *water pressure tank* ini dapat diinjeksikan ke dalam suatu sistem yang tekanannya lebih rendah dari tekanan atmosfer.

2.5 Komponen Bejana Tekan

1. Kepala bejana tekan

Kepala bejana tekan yaitu sebagai penutup bagian samping atau bawah dan atas dari suatu bejana tekan tersebut, bentuk dari kepala bejana tekan ini adalah setengah lingkaran atau *ellipsoidal* 2:1. Tebal plat dari kepala bejana tekan ini tergantung dengan hasil perhitungan (*calculation*) yang ditentukan dari karakteristik fluida yang akan diproses di dalam bagian dalam bejana tekan.

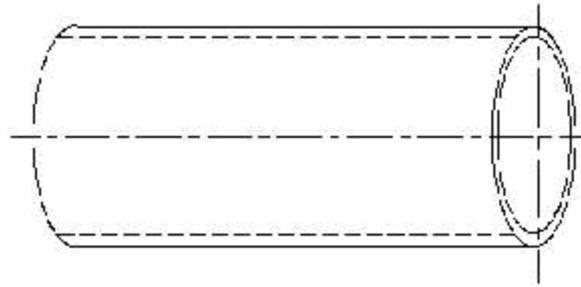
Kepala bejana tekan ini dapat dihubungkan dengan dinding bejana tekan dengan cara pengelasan, dimana ukuran atau diameter dari pada kepala bejana tekan harus sama dengan ukuran dinding bejana tekan, untuk ketebalan kepala bejana tekan lebih tipis sedikit dibandingkan dengan ketebalan dinding, sedangkan untuk jenis material yang digunakan sama dengan material yang digunakan pada dinding. Cara pembuatan dari kepala bejana tekan dengan cara *punch dish*.



Gambar 2.4. Kepala Bejana Tekan
Sumber : (Anonim, 2010)

2. Dinding (*shell*)

Shell berbentuk silindar yang dapat menahan tekanan dari dalam maupun tekanan dari luar. Tebalnya dinding tergantung dari hasil perhitungan dan dari karakteristik dari fluida yang akan diproses di dalam bejana tekan tersebut, dimana dinding bejana tekan terbuat dari plat baja yang di-*roll* dibentuk menjadi suatu diameter lingkaran yang berbentuk tabung. Pada ujung-ujung arah horizontal disambungkan dengan cara pengelasan.



Gambar 2.5. Dinding Bejana Tekan

Sumber : (Anonim, 2011)

Ukuran dan diameter dari dinding bejana tekan jenis separator dapat disesuaikan dengan hasil perhitungan kapasitas dan volume fluida yang akan diproses untuk dipisahkan di dalam alat pemisah ini.

3. Lubang orang (*manhole*)

Manhole yaitu suatu lubang yang berfungsi untuk keluar masuknya orang untuk membersihkan atau merawat. Besar dan ukuran dapat ditentukan sesuai ukuran badan orang dewasa yaitu sekitar 20''~24'' atau 500mm ~ 600 mm untuk diameter lubangnya, untuk *rating* ditentukan sesuai dengan *rating* dari nosel *inlet* atau *outlet* dari bejana tekan yang akan direncanakan.

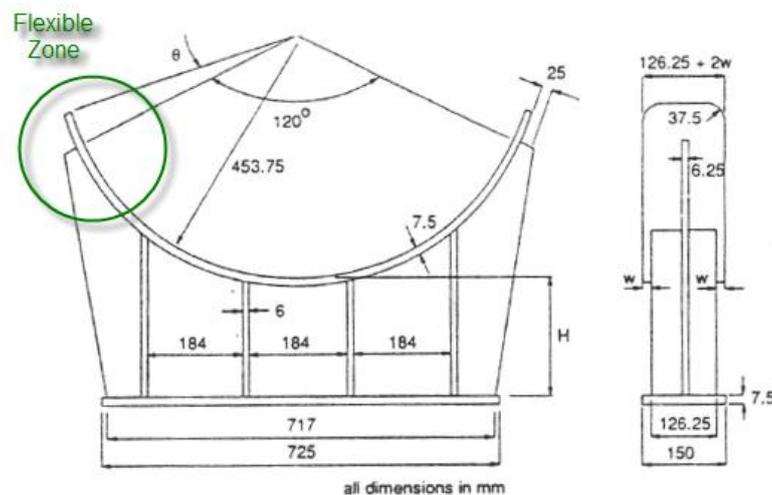


Gambar 2.6. *Manhole*

Sumber : (Anonim, 2012)

4. Penyangga (*saddle*)

Saddle yaitu penyangga berbentuk *saddle* yang direncanakan berdasarkan bentuk $\frac{1}{2}$ lingkaran yang ditempatkan pada bagian bawah dinding bejana tekan yang berbentuk silinder sebagaimana terlihat pada Gambar 2.7, yang berfungsi sebagai penyangga bejana tekan. Penyangga terdiri dari dua tipe yaitu:

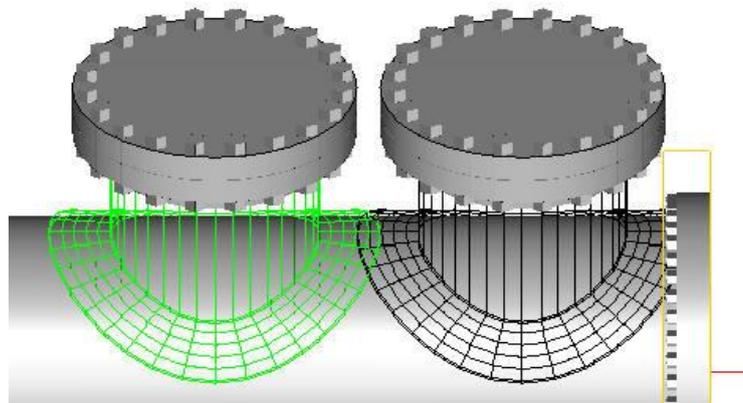


Gambar 2.7. Contoh *Saddle*
Sumber : (Anonim, 2012)

- Penyangga permanen (*fix saddle*) yaitu dipasang di salah satu sisi separator disambung dengan cara pengelasan sedang bagian satu sisi (bawah) disediakan lubang baut guna untuk menyambung penyangga tersebut dengan cara dipasang baut untuk menghubungkan antara pondasi atau kedudukan *saddle*.
- Penyangga peluncur (*sliding saddle*) yaitu cara penyambungan sama dengan bejana tekan sama dengan poin "a". Sedangkan sistem penyambungan dengan penyangga juga menggunakan baut cara

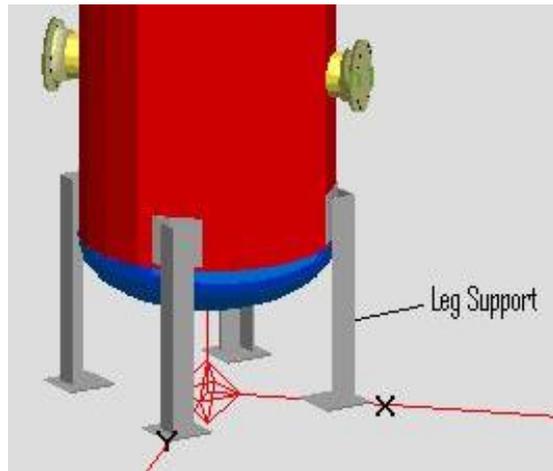
pemasangan diberi rengganan (*sliding*), ini berfungsi sebagai peluncur sewaktu-waktu adanya pertambahan panjang pada separator akibat adanya tegangan tarik yang timbul akibat adanya tekanan dan temperatur yang diakibatkan dari bagian dalam bejana dan untuk menghindari terjadinya pecah atau keretakan pada dinding bejana tekan jenis separator.

5. *Nozzle* atau *flanges* yaitu yang berfungsi sebagai penghubung antara bejana tekan itu sendiri dengan proses pemipaan aliran fluida yang akan dialirkan keluar masuk (*nozzle outlet inlet*) dari dan ke bejana tekan itu sendiri, dari dan ke proses lanjutan ke dalam sistim pemipaan atau *interface* dengan alat-alat *instrument* pendukung lainnya.



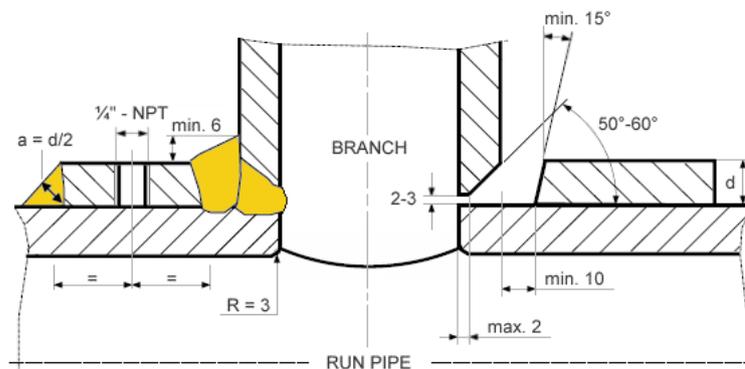
Gambar 2.8. *Nozzle*
Sumber : (Anonim, 2012)

6. *Leg* (kaki) merupakan alat penunpu pada *vertical vessel*. Perbandingan maksimum antara panjang kaki dengan diameter *vessel* biasanya 2:1. Jumlah kaki, ukuran dan detail tambahan tergantung besar beban yang diterima *vessel* tersebut Gambar 2.9 berikut ini merupakan contoh gambar dari suatu *leg* (Megyesy, Eugene F, 1972).



Gambar 2.9. *Leg*
Sumber : (Anonim, 2012)

7. *Reinforcement Pad* merupakan penguat yang diletakan di sekeliling *nozzle* dan di atas *shell* atau *head*, sebagai kompensasi atas daerah yang hilang karena adanya lubang yang dipakai untuk penyambungan suatu *nozzle*



Gambar 2.10. *Reinforcement Pad*
Sumber : (Anonim, 2012)

8. *Lifting lug* adalah bagian dari *vessel* yang berfungsi sebagai tempat untuk mengaitkan alat pemindah yang biasanya berupa *crane*. Perhitungan *lifting lug* didasarkan pada tiga macam kekuatan yaitu kekuatan lubang *lug*, kekuatan kaki *lug* dan kekuatan las *lug*. *Lifting lug* harus dapat menahan berat *vessel* dalam keadaan kosong ditambah dengan berat *saddle*.

2.6 Analisis Tegangan Bejana Tekan

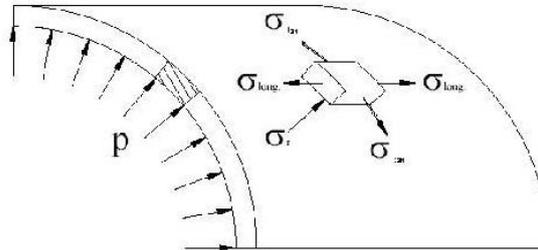
Tujuan utama melakukan evaluasi desain adalah untuk menentukan apakah komponen dapat bertahan dan aman selama kondisi beroperasi dan tidak mengalami kegagalan atau rusak yang dapat berakibat fatal baik terhadap keseluruhan sistem atau bahkan terhadap keselamatan operator. Untuk itu yang paling mendasar 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 bejana tekan dan tegangan termal (*thermal stress*) akibat ekspansi struktur yang disebabkan perbedaan temperatur (Alim Mardhi dan Roziq Himawan. 2011).

1. Kondisi Tegangan pada *Cylindrical Pressure Vessel*

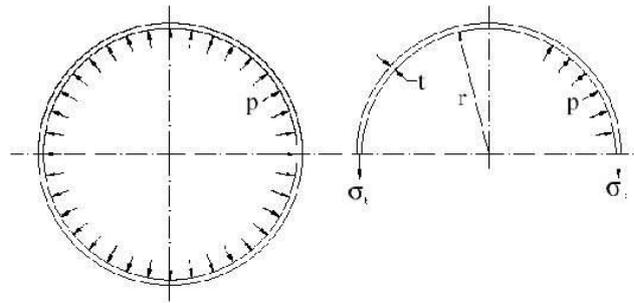
Untuk *cylindrical pressure vessel* dengan dinding tipis ($D/t > 20$). tegangan yang terjadi pada dinding *shell* adalah tegangan ke arah memanjang dan bejana (tegangan longitudinal), tegangan ke arah keliling (tegangan tangensial), dan tegangan radial yang diakibatkan oleh tekanan dalam. Karena ketiga 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 kondisi pembebanan yang simetri pada dinding bejana (Clemens Kaminski, 2005).



Gambar 2.11. Tegangan-tegangan utama pada bejana tekan dinding tipis. Sumber: (Clemens Kaminski, 2005).

- Tegangan tangensial (*tangensial stress*)



Gambar 2.12. Tegangan Tangensial (σ_t) dan Tekanan Dalam (p)
Sumber: (Clemens Kaminski, 2005).

$$\sum F=0$$

$$(2 \cdot \sigma_t \cdot t \cdot dx) - (p \cdot 2 \cdot r \cdot dx) = 0$$

$$\sigma_t = \frac{pr}{t} \quad (1)$$

Dimana:

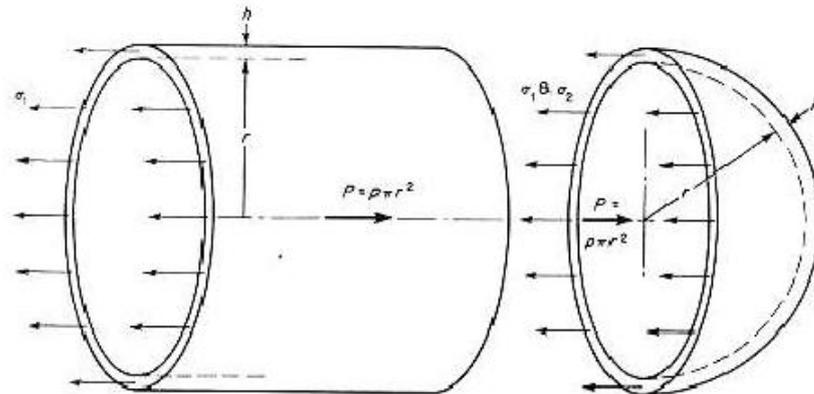
σ_t , Tegangan Tangensial (Pa)

p , Tekanan Internal (Pa)

r , Radius silinder (m)

t , Ketebalan Silinder (m).

- Tegangan membujur (*longitudinal stress*)



Gambar 2.13. Tegangan Longitudinal pada Bejana Tekan
Sumber: (Clemens Kaminski, 2005).

$$\sum F=0$$

$$(2 \cdot \sigma_l \cdot \pi \cdot r \cdot t) - (p \cdot \pi \cdot r^2) = 0$$

$$\sigma_l = \frac{pr}{2t} \quad (2)$$

Dimana:

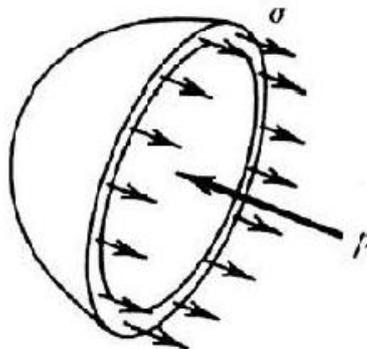
σ_l = σ_{long} =tegangan longitudinal (Pa)

p = tekanan internal (Pa)

r = radius internal (m)

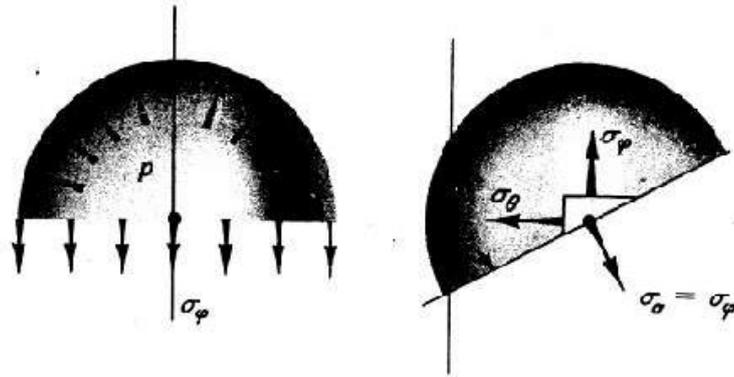
t = ketebalan silinder (m) (Clemens Kaminski, 2005).

2. Kondisi Tegangan Pada *Spherical Pressure Vessel*



Gambar 2.14. Tegangan yang Terjadi pada *Head*
Sumber: (Clemens Kaminski, 2005).

Karena *spherical pressure vessel* memiliki geometri yang *axissymmetric* pada sembarang sumbu, maka tegangan pada dindingnya apabila diiris secara sembarang akan sama. Pada bejana tekan bentuk bola ini tidak terjadi tegangan geser (*Clemens Kaminski, 2005*).



Gambar 2.15. Tegangan pada Dinding *Head* Bejana Tekan.
Sumber: (*Clemens Kaminski, 2005*)

Pada bejana ini tidak ditemukan adanya tegangan geser ($\sigma_{\theta} = \sigma_{\phi}$). Dengan menerapkan konsep kesetimbangan benda tegar pada bejana tekan, dapat dirumuskan:

$$\sigma_{\theta} = \sigma_{\phi} = \frac{pr}{2t} \quad (3)$$

Dimana:

p = tekanan internal (Pa)

r = radius silinder (Pa)

t = tebal silinder (m) (*Clemens Kaminski, 2005*).

2.7 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 plastik (*plastic strain*). 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* maka dapat 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. Untuk tipe kegagalan ini dipergunakan batas harga tegangan maksimum (tarik maupun tekan) yang diijinkan pada material (Clemens Kaminski, 2005).

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

1. Teori Tegangan Normal Maksimum (*Maximum Normal Stress Theory-MNST*)

2. Teori Tegangan Geser Maksimum (*Maximum Shear Stress Theory* - MSST)
3. Teori Kegagalan Energi Distorsi Maksimum / Von Mises (*Maximum Distortion Energy Theory*).

2.8 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 prinsipal positif paling besar, melewati harga tegangan *yield* tarik material atau bila tegangan prinsipal *negative* paling besar melewati harga tegangan *yield* tekan dari material.
2. Patah atau *fracture*. bila tegangan prinsipal 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 tegangan *yield* tekan S_{yc} serta faktor keamanan yang diambil adalah N , maka agar tidak terjadi kegagalan (Clemens Kaminski, 2005) :

$$\sigma_t \text{ maksimum} \leq \frac{S_{yt}}{N} \text{ dan } \sigma_c \text{ maksimum} \leq \frac{S_{yc}}{N} \quad (4)$$

Dengan patah dianggap gagal maka:

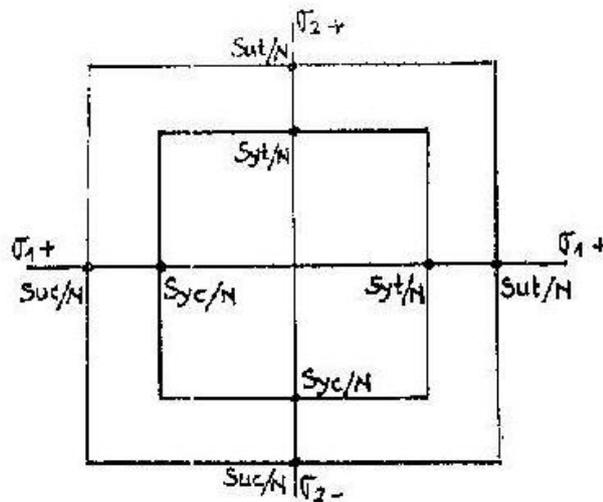
$$\sigma_t \text{ maksimum} \leq \frac{S_{ut}}{N} \text{ dan } \sigma_c \text{ maksimum} \leq \frac{S_{uc}}{N} \quad (5)$$

Dimana:

S_{ut} = tegangan tarik maksimum material

S_{uc} = tegangan tekan maksimum material.

σ_t -maksimum atau σ_c -maksimum adalah tegangan-tegangan prinsipal maksimum, yang merupakan salah satu dan $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ (untuk 3 dimensi) yang secara aljabar adalah $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ dan $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ masing-masing bisa mempunyai harga positif (tegangan tarik) atau negatif (tegangan tekan). Gambar 2.16 menunjukkan secara grafis dalam 2 dimensi tentang teori kegagalan tegangan normal maksimum (Clemens Kaminski, 2005).



Gambar 2.16. Teori kegagalan normal maksimum dalam koordinat σ_1 dan σ_2
Sumber: (Clemens Kaminski, 2005)

2.9 Teori Tegangan Geser Maksimum

Teori tegangan geser maksimum (*Maximum Shear stress Theory* - MSST) diusulkan pertama kali oleh C.A. Coulumb (1736-1806), kemudian

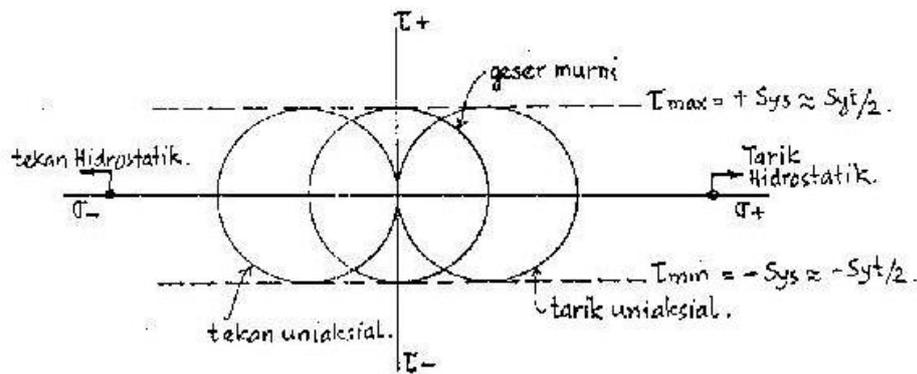
disempurnakan oleh Tresca (1864) sehingga sering disebut sebagai teori kegagalan Tresca. Teori ini secara khusus dipergunakan untuk material ulet (*ductile*) dengan dasar bahwa kegagalan terjadi bila tegangan geser maksimum yang terjadi, melewati harga tegangan geser yang diijinkan pada material (Clemens Kaminski, 2005).

$$\tau_{maksimum} \leq \frac{S_{ys}}{N} \text{ atau } \tau_{maksimum} \leq \frac{S_{us}}{N} \quad (6)$$

Dimana:

S_{ys} = tegangan *yield* geser material

N = angka keamanan.



Gambar 2.17. Lingkaran mohr principal sebagai teori kegagalan geser maksimum. Sumber: (Clemens Kaminski, 2005)

Gambar 2.17 menunjukkan kondisi tegangan dengan metode grafis lingkaran Mohr. Dapat dicatat disini bahwa batas-batas dan semua lingkaran Mohr prinsipal tidak menunjukkan kegagalan pada arah garis horisontal $\pm S_{ys}$ ataupun $\pm S_{us}$. Teori ini memprediksi bahwa kegagalan tidak terjadi oleh tegangan hidrostatik murni.

2.10 Teori Kegagalan Energi Distorsi Maksimum

Dengan suatu pengetahuan hanya pada tegangan *yield* dan suatu material, teori kegagalan ini memprediksikan “*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 (Willyanto Anggono, *et al.* 2006) :

$$\sigma_e = \frac{\sqrt{2}}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{1/2} \quad (7)$$

Selanjutnya dengan mengambil angka keamanan N, maka :

$$\sigma_e \leq \frac{S_y}{N} \quad (8)$$

2.11 Faktor Keamanan

Faktor keamanan digunakan karena tidak ada proses manufaktur yang bisa menjamin 100 % kualitas. Setiap benda 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 (Joseph P Vidosic, 1957):

- $sf = 1,25 - 1,5$: 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.
- $sf = 3,0 - 4,5$: bahan yang sudah diketahui. Kondisi beban, tegangan dan lingkungan yang tidak pasti.

Sedangkan berdasarkan jenis bebannya faktor keamanan / *safety factor* dikelompokkan sebagai berikut (Dobrovolskiĭ, Viktor Afanas'evich *et al.* 1968):

- Beban Statis : 1,25 – 2
- Beban Dinamis : 2 – 3
- Beban Kejut : 3 – 5

2.12 Uji Hipotesis dan Signifikansi atau Aturan-Aturan Keputusan

Jika kita misalkan suatu hipotesis tertentu benar, tetapi menemukan bahwa hasil-hasil yang teramati sangat berbeda dari hasil yang diperkirakan oleh hipotesis ini maka dikatakan bahwa perbedaan-perbedaan yang teramati tersebut signifikan dan oleh karenanya memiliki kecenderungan untuk menolak hipotesis tersebut.

Prosedur yang memungkinkan kita menentukan apakah hasil-hasil yang teramati pada sampel berbeda secara signifikan dari hasil-hasil yang diperkirakan, yang demikian akan menolong kita untuk memutuskan apakah akan menerima atau menolak hipotesis yang diberikan, disebut uji hipotesis, uji signifikansi atau aturan aturan.

Jika kita menolak sebuah hipotesis ketika seharusnya hipotesis tersebut diterima maka kita katakan bahwa telah terjadi *error I*. Sebaliknya, jika kita menerima sebuah hipotesis ketika seharusnya hipotesis itu ditolak, maka kita katakan bahwa kita telah membuat *error II*.

2.12.1 Tingkat Signifikansi

Dalam menguji suatu hipotesis, probabilitas maksimum dengan mana kita bersedia menanggung resiko terjadinya *error* tipe I disebut sebagai tingkat signifikansi (*level of significance*) dari pengujian tersebut. Probabilitas ini, sering disimbolkan sebagai α , biasanya dispesifikasikan sebelum sampel diambil dari suatu populasi sehingga hasil-hasil yang diperoleh tidak akan mempengaruhi pilihan kita. Dalam praktiknya, tingkat signifikansi 0,05 (5%)

atau 0,1 (10%) adalah tingkat signifikansi yang umum, meskipun nilai-nilai yang lain dapat juga digunakan (Murray R. Spiegel Larry J. Stephens. 2007).

2.13 Tegangan Panas

Tegangan panas 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 (Roziq Himawan, *et al*, 2008).

$$\{\sigma\} = [D] \{\varepsilon^{el}\} \quad (9)$$

σ ialah 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(10) di bawah ini :

$$[\varepsilon^{el}] = \{\varepsilon\} - \{\varepsilon^{TH}\} \quad (10)$$

ε^{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 (Roziq Himawan, *et al*, 2008).

$$\varepsilon^{TH} = \Delta T [\alpha_x, \alpha_y, \alpha_z, 0, 0, 0]^T \quad (11)$$

2.14 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.

2.14.1 Konduksi

Pada perpindahan panas secara konduksi sangat dipengaruhi oleh sifat *thermal* dari material tersebut. Distribusi temperatur pada perpindahan panas secara konduksi dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (12) distribusi temperatur pada benda pejal berikut:

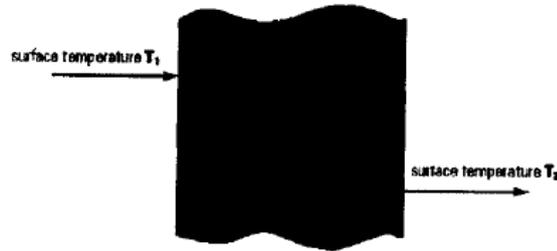
$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \bar{q} + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (12)$$

Pada *software* ANSYS persamaan di atas dinyatakan dalam persamaan (13) berikut:

$$\rho c \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \{v\}^T \{L\} T \right) + \{L\}^T \{q\} = \ddot{q} \quad (13)$$

Dimana, ρ adalah massa jenis, c *specific heat*, v ialah vektor kecepatan untuk transfer panas dan L merupakan vektor operator. Persamaan transfer panas pada kondisi seperti di atas dalam bentuk baku tidaklah tersedia, sehingga

diperlukan suatu metode untuk menyelesaikannya. Salah satu metode yang digunakan ialah metode elemen hingga (Roziq Himawan,*et al*, 2008).



Gambar 2.18. Skema distribusi temperature pada satu dimensi

Sumber: (Roziq Himawan,*et al*, 2008).

Dari dua persamaan di atas diketahui jika *transfer* panas terjadi pada material yang sama dan jarak (x) semakin besar maka nilai T yang ada akan semakin kecil. Pada analisis *thermal steady state* elemen solid dua dimensi yang mendapatkan panas yang seragam dan permukaan yang lain terisolasi, analisis panas dapat menggunakan hukum fourier satu dimensi (Roziq Himawan,*et al*, 2008).

$$q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (14)$$

Untuk analisis temperatur persamaan diatas dapat ditulis

$$\Delta T = -\frac{q \Delta x}{kA} \quad (15)$$

Dimana :

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

q = *heat* (W)

k = konduktivitas termal (W/m K)

Δx = Tebal (m)

A = Luas penampang (m^2).

2.14.2 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, *et al*, 1986).

$$q = h A \Delta T \quad (16)$$

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).

2.14.3 Konveksi Aliran Melintang pada Silinder

Aliran lain 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 peningkatan x , koordinat sumbu aliran dan lapisan batas yang terbentuk di bawah pengaruh dari gradient tekanan aktif ($dp/dx < 0$). Fenomena transisi lapisan batas sangat tergantung pada bilangan *reynold*, keterpengaruhannya posisi dari *separation point*. Untuk silinder sirkular karakteristik panjang ialah diameter dan bilangan *reynold*

didefinisikan pada Persamaan (17) (Frank P. Incropera dan David P. Dewitt, 1990).

$$\text{Re}_D \equiv \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{V D}{\nu} \quad (17)$$

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 (Frank P. Incropera dan David P. Dewitt, 1990):

$$\overline{\text{Nu}}_D = C \text{Re}_D^m \text{Pr}^n \left(\frac{\text{Pr}}{\text{Pr}_s} \right)^{1/4} \quad (18)$$

Dimana :

Nu_D = Bilangan *Nusselt*

C, m, n = Konstanta

Re_D = Bilangan *Reynold*

Pr = Bilangan Prandlt

Pr_s = Bilangan *Prandlt surface*.

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

Selanjutnya nilai C dan m ditentukan berdasarkan Tabel 2.2.

Tabel 2.2 Konstanta untuk Silinder Sirkular pada Aliran Melintang

Sumber : (Frank P. Incropera dan David P. Dewitt, 1990)

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

2.15 Finite Elements Analysis (FEA)

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

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

1. *Preprocessing*, Pada tahap ini pengguna membuat model yang menjadi bagian untuk dianalisis yang mana geometri tersebut dibagi-bagi menjadi

sub-bagian-sub-bagian yang terdiskritisasi atau disebut “elemen”, dihubungkan pada titik diskritisasi yang disebut “*node*”. *Node* tertentu akan ditetapkan sebagai bagian melekat yang 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.

$$\{F\} = [k] \cdot \{u\} \quad (19)$$

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

3. *Post-processing*, menampilkan hasil akhir setelah penganalisisan oleh modul penganalisis dengan menampilkan data *displacements* dan tegangan pada posisi bagian yang terdiskritisasi pada model geometri. *Post-processor* biasanya menampilkan grafis dengan kontur warna yang menggambarkan tingkatan tegangan yang terjadi pada model geometri (Roylance , David. 2001).

Adapun keuntungan dari *finite elements analysis* ialah dapat memodelkan bentuk yang kompleks, menyelesaikan kondisi pembebanan umum, memodelkan objek/struktur dengan jenis material yang banyak (karena

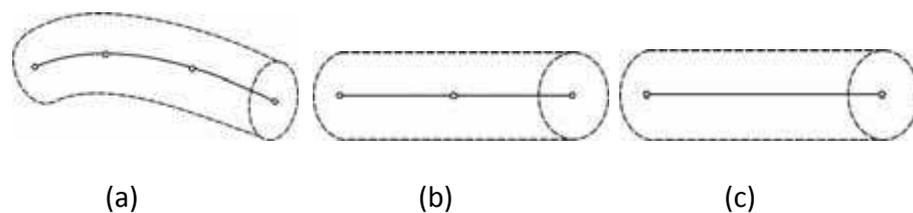
persamaan pada tingkat elemen), memodelkan banyak macam syarat batas, dapat dengan mudah menggunakan bermacam ukuran elemen dalam *meshing*/diskritisasi, menyelesaikan model dengan mudah dan murah, dapat memodelkan efek dimanis dan dapat menyelesaikan kelakuan tidak linier dari geometri dan material (Handayanu, 2005).

2.15.1 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.



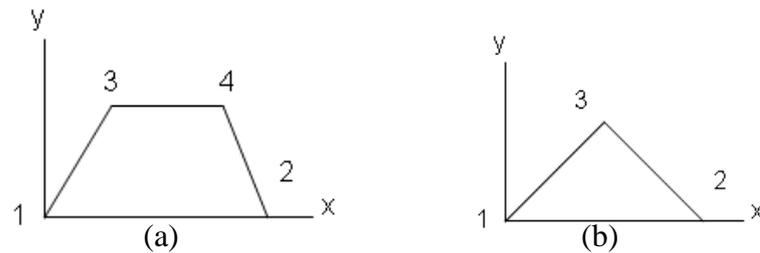
Gambar 2.19. Elemen Satu Dimensi (a) Kubik; (b) Kuadratik; (c) Linier

Sumber : (Handayanu, 2005).

2. Elemen dua dimensi

Elemen dua dimensi terdiri dari elemen segitiga (*triangle*) 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.

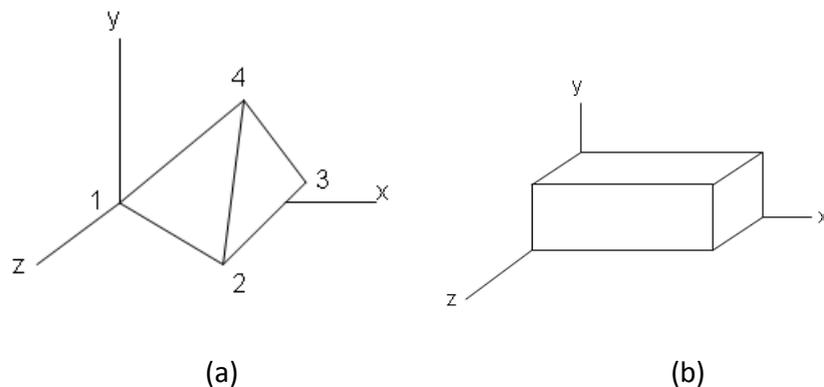


Gambar 2.20. Elemen Dua Dimensi (a) Segitiga; (b) Segi Empat

Sumber : (Handayanu, 2005).

3. Elemen tiga dimensi

Elemen tiga dimensi terdiri dari elemen *tetrahedron*, dan elemen balok seperti terlihat pada Gambar 21 berikut:



Gambar 2.21. Elemen Tiga Dimensi (a) Tetrahedron; (b) Elemen Balok

Sumber : (Handayanu, 2005).

2.15.2 Permodelan *Pressure Vessels*

Berdasarkan geometrinya, pressure vessel dapat dimodelkan sebagai *three dimensional, symmetric* dan *axisymmetric* (Heckman, David. 1998).

1. *Three dimensional model*

Three dimensional model adalah permodelan utuh dari suatu *pressure vessel*.

2. *Symmentric model*

Symmentric model adalah suatu permodelan dimana hanya separuh dari *pressure vessel* yang dimodelkan. *symmetric boundary conditions* diaplikasikan sepanjang sudut

3. *Axisymmetric model*

Axisymmetric model mengambil bentuk dua dimensi. hal ini dilakukan karena geometri yang simetri sepanjang sumbu-z' (David Heckman, 1998).

Guna mengurangi kalkulasi numerik yang dibutuhkan untuk menyelesaikan *finite element* model yang simetris dan kondisi batas yang teraplikasi sama maka model dipotong setengahnya atau disebut *symmetric boundary conditions* (Forde Tjelta, 2012).

2.16 Metode Newton Raphson

Dalam analisis numerik, metode Newton (juga dikenal sebagai metode Newton-Raphson), yang mendapat nama dari Isaac Newton dan Joseph Raphson, merupakan metode yang paling dikenal untuk mencari hampiran terhadap akar fungsi riil. Metode Newton sering konvergen dengan cepat, terutama bila iterasi dimulai "cukup dekat" dengan akar yang diinginkan. Namun bila iterasi dimulai jauh dari akar yang dicari, metode ini dapat

meleset tanpa peringatan. Implementasi metode ini biasanya mendeteksi dan mengatasi kegagalan konvergensi.

Diketahui fungsi $f(x)$ dan turunannya $f'(x)$, kita memulai dengan estimasi pertama, x_n . Hampiran yang lebih baik dari estimasi awal x_{n+1} adalah (Anonim):

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f_{x_n}}{f'_{x_n}} \quad (20)$$

Dimana:

x_{n+1} = akar estimasi berikutnya

x_n = akar estimasi awal

f_{x_n} = fungsi x_n

f'_{x_n} = turunan fungsi x_n .