

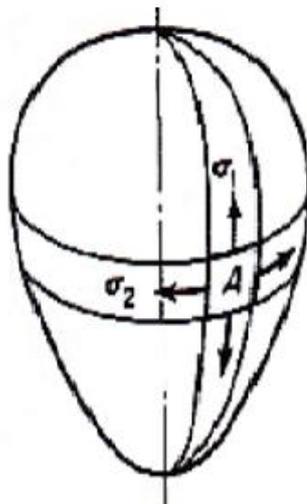
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Bejana Tekan

Bejana tekan merupakan suatu tempat tertutup yang berfungsi sebagai penyimpanan fluida bertekanan, dimana fluida yang disimpan dapat berubah fasa saat berada di dalam bejana tekan (Putra, 2005). Fluida dapat berupa gas atau udara maupun cairan. Fluida yang disimpan dalam bejana tekan merupakan fluida dengan karakteristik atau perlakuan khusus seperti, fluida bertekanan, fluida dalam temperatur rendah ataupun temperatur tinggi dan lain-lain.

(Aziz et al, 2014) Bejana tekan merupakan tabung tertutup yang berbentuk silinder yang mampu menahan *internal pressure* (tekanan dalam) ataupun *eksternal pressure* (tekanan luar). Contoh dari bejana tekan adalah *storage tank*, tabung gas, instalasi pipa gas, instalasi pendingin reactor dan lain lain. Tekanan dalam bejana biasanya lebih tinggi dari pada tekanan luar. Penggunaan bejana tekan biasa digunakan untuk menggabungkan antara tekanan tinggi dan temperatur tinggi, *flammable fluid*, atau material dengan tingkat radio aktif tinggi.



Gambar 2.1 Silinder Bertekanan (Bethalembah, 2015)

Pada gambar 2.1 menunjukkan sebuah silinder dinding tipis dengan intensitas tekanan fluida di ruang dalamnya P. Sebuah benda yang diberi tekanan akan mengalami tegangan. Dimana tegangan yang terjadi secara bersamaan tarik tekan pada dua arah yang saling tegak lurus satu sama lain. Tegangan yang terjadi

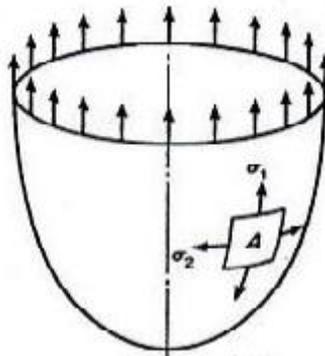
Siti Mutmainah, 2020

Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]

adalah pada arah tangensial terhadap permukaan tengah dinding dan terdistribusi secara merata pada seluruh ketebalan dindingnya. Untuk memperjelas bentuk dari silinder bertekanan yang mengalami tegangan akibat tekanan internal fluida, silinder dipotong menjadi dua bagian secara simetri terhadap sumbu normal seperti gambar 2.2. Dengan mengisolasi elemen A pada dindingnya, dapat disimpulkan dari kondisi simetri bahwa hanya tegangan σ_1 dan σ_2 yang timbul pada sisinya.



Gambar 2.2 Tegangan Pada Dinding Silinder Bertekanan (Bethalembah, 2015)

2.2 Komponen Bejana Tekan

Bejana tekan terdiri dari komponen utama dan komponen pendukung, dengan fungsinya masing-masing untuk menunjang kinerja bejana tekan. Komponen-komponen bejana tekan diantaranya adalah *shell*, *head* dan *nossel*. Dalam pemilihan komponen bejana tekan disesuaikan dengan kinerja maupun pemeliharaan bejana, dengan pertimbangan utama rancangan, yaitu tekanan operasi dan temperatur operasi (Aziz et al, 2014).

2.2.1 *Shell*

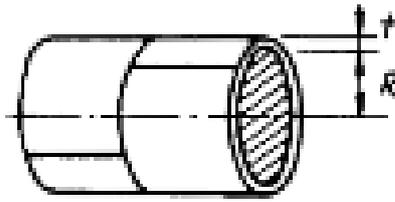
Merupakan dinding bejana tekan dengan geometri tabung, spherikal atau gabungan tabung dan spherikal. Dalam merancang bejana tekan, langkah awal yang dilakukan adalah menentukan dimensi dinding bejana berdasarkan tekanan internal dan tegangan yang diijinkan oleh material.

Siti Mutmainah, 2020

Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]



Gambar 2.3 Tebal *Shell* (Satrijo dan Habsy, 2012)

Pada gambar 2.3 ditunjukkan tebal dinding silinder t dengan radius luar silinder R . Selisih dari diameter luar silinder dengan diameter dalam silinder dinamakan tebal dinding silinder. Tebal dinding dipengaruhi oleh tekanan *internal* atau *eksternal* ditambah dengan beban-beban relevan lainnya. Kekuatan material juga mempengaruhi tebal dinding bejana tekan, sehingga tekanan maksimal yang diterima oleh bejana tekan dibatasi oleh kekuatan materialnya. Analisis tegangan pada dinding dan tegangan yang diizinkan oleh material yang digunakan dapat menentukan tebal bejana tekan.

(ASME, 2017) Untuk menentukan ketebalan dinding bejana dapat menggunakan persamaan berikut ini :

- a. Jika diameter dalam yang digunakan, maka :

$$t = \frac{P R}{S E - 0.6 P}$$

- b. Jika diameter luar yang digunakan maka :

$$t = \frac{P R}{S E + 0.4 P}$$

Dimana : t = tebal bejana, in

P = tekanan internal, psi

S = tegangan yang diizinkan pada material pada suhu tertentu, psi

R = jari jari dalam silinder, in

E = efesiensi sambungan

2.2.2 Head

Siti Mutmainah, 2020

Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]

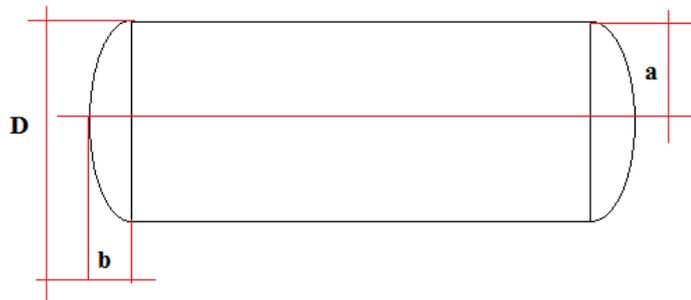
Ujung-ujung bejana tekan dan penutup sebuah dinding silinder. *Head* mempunyai variasi bentuk yaitu, *hemisphere*, kerucut, datar, *ellipsoidal* dan lainnya. (ASME, 2017) Untuk ketebalan dinding *head* bejana tekan berbentuk setengah lingkaran (*Sphere dan Hermispher*) dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

- a. Jika diameter dalam yang digunakan maka :

$$t = \frac{P R}{2 S E - 0.2 P}$$

- b. Jika diameter luar yang digunakan maka :

$$t = \frac{P R}{2 S E + 1.8 P}$$



Gambar 2.4 Elliptical Head (Penulis)

Dimana : $a = \frac{1}{2} D$

$$b = \frac{1}{4} D$$

(ASME, 2017) Untuk ketebalan dinding kepala bejana tekan bentuk setengah lingkaran (*Ellipsoidal*) dimana perbandingan axis mayor dan axis minor adalah 2:1 sehingga didapat kekuatan *head* mendekati dengan kekuatan *shell* silinder yang sesuai dengan diameter dalam dan diameter luarnya. Adapun ketebalan dari *elliptical head* dapat kita cari dengan persamaan berikut ini :

- a. Jika diameter dalam yang digunakan maka :

$$t = \frac{P D}{2 S E - 0.2 P}$$

- b. Jika diameter luar yang digunakan maka :

$$t = \frac{P D}{2 S E + 1.8 P}$$

Siti Mutmainah, 2020

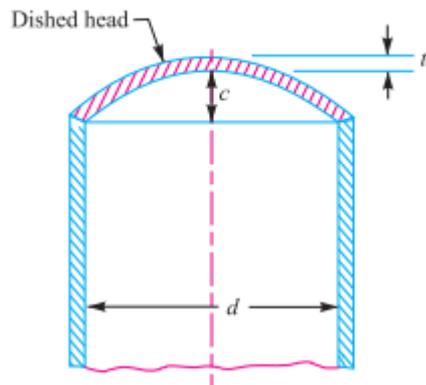
Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]

Sehingga volume head yang berbentuk ellipsoidal dengan perbandingan axis mayor dan axis minor 2:1 adalah sebagai berikut :

$$V = \left(\frac{\pi D^2}{4}\right) \left(\frac{D}{6}\right) 2 = \frac{\pi D^3}{12}$$



Gambar 2.5 Kepala Silinder Dilas (Khurmi, 2005: 254)

(Khurmi, 2005: 254) Ketika plat dished dipasang secara integral atau dilas ke silinder seperti yang ditunjukkan pada gambar 2.5, maka ketebalan plat dished yang diberikan adalah :

$$t = \frac{pd}{4\sigma t}$$

Dimana : p = tekanan *internal*, psi

d = diameter dalam, in

σt = tensile stress yang diijinkan oleh material, psi

2.2.3 Nozzle

Lubang yang menembus dinding atau kepala bejana tekan. Nossel mempunyai beberapa fungsi yaitu menyambungkan pipa untuk mengalirkan fluida dari atau menuju bejana tekan, tempat masuk operator unuk memudahkan

Siti Mutmainah, 2020

Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]

maintenance, tempat akses langsung ke peralatan lain (*heat exchanger*) dan lain lain (Cahyono, 2004).

2.3 Klasifikasi bejana tekan

2.3.1 Berdasarkan dimensi dinding

(Satrijo dan Habsya, 2012) Berdasarkan dimesi dinding silinder bejana tekan diklasifikasikan menjadi dua, yaitu :

a. Bejana tekan dinding tebal

Apabila diameter internal (D) kurang dari dua puluh kali tebal dindingnya (t), yaitu $\frac{D}{t} < 20$. Biasanya digunakan untuk silinder tekanan tinggi, tangki, barel senapan dan lain lain.

b. Bejana tekan dinding tipis

Diameter internal (D) lebih dari dua puluh kali tebal dindingnya (t) , yaitu $\frac{D}{t} > 20$. Dinding tipis biasanya digunakan untuk boiler, tangki dan pipa.

Bejana tekan dinding tipis dengan dinding tebal memiliki perbedaan yaitu pada distribusi tegangan pada dinding bejana tekan tersebut. Pada bejana tekan dinding tipis, distribusi tegangan dapat diabaikan karena selisih diameter luar dengan diameter dalam sangat kecil sehingga distribusi tegangan yang terjadi sangat kecil, sedangkan pada bejana tekan dinding tebal distribusi tegangan perlu diperhitungkan (Mukhlisin, 2016).

2.3.2 Berdasarkan bentuknya

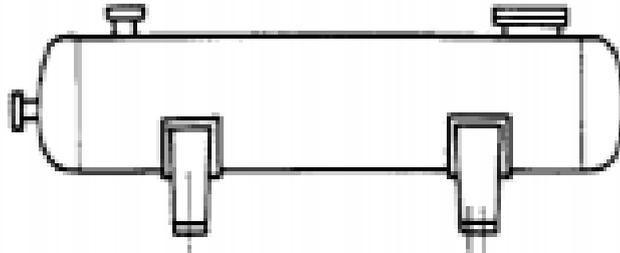
- a. Bejana tekan horizontal, posisi sejajar dengan sumbu netral axis seperti pada gambar 2.6.
- b. Bejana tekan vertikal, posisi tegak lurus terhadap sumbu netral axis seperti pada gambar 2.7.
- c. Bejana tekan sperikal, memiliki bentuk menyerupai bola seperti pada gambar 2.8.

Siti Mutmainah, 2020

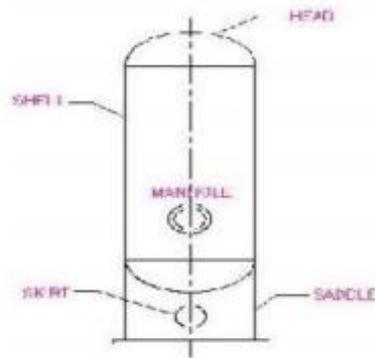
Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

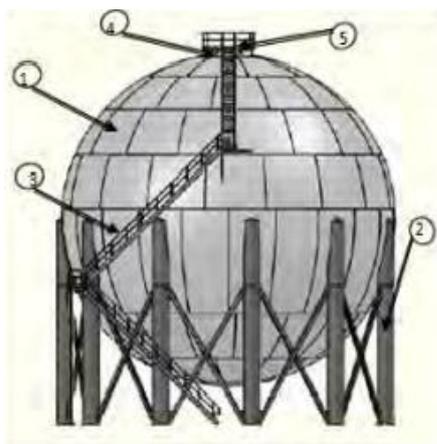
[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]



Gambar 2.6 Bejana Tekan Horizontal (Aziz et al, 2014)



Gambar 2.7 Bejana Tekan Vertikal (Aziz et al, 2014)



Gambar 2.8 Bejana Tekan Horizontal (Mukhlisin, 2016)

2.3.3 Berdasarkan konstruksi penutup

Siti Mutmainah, 2020

Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]

Bejana tekan, menurut konstruksi ujung, dapat diklasifikasikan sebagai ujung terbuka atau ujung tertutup. Silinder sederhana dengan piston, seperti silinder pengepres adalah contoh bejana ujung terbuka, sedangkan tangki adalah contoh bejana ujung tertutup. Dalam kasus bejana yang memiliki ujung terbuka, tegangan melingkar atau *circumferential* diinduksi oleh tekanan fluida, sedangkan dalam kasus bejana ujung tertutup, tegangan melingkar atau *circumferential* diikuti oleh tegangan longitudinal.

2.4 Klasifikasi Dinding Silinder

Menentukan tebal dinding silinder merupakan langkah awal yang dilakukan untuk merancang bejana tekan. Sebelum menghitung tebal dinding hal yang perlu diperhatikan adalah kriteria dari dinding tersebut, termasuk dinding tipis atau dinding tebal. Persamaan persamaan yang akan digunakan untuk perhitungan dinding tebal berbeda dengan dinding tipis, maka dari itu perhitungan yang digunakan harus tepat. Hal ini dipengaruhi oleh tekanan internal yang bekerja pada dinding silinder dan tegangan yang diijinkan (σ_t). (R.S.Khurmi, 2005: 262) Berdasarkan pengaruh tegangan yang diijinkan dan tekanan internal maka dapat ditentukan kriteria dari dinding silinder sebagai berikut ini :

- a. Jika tegangan yang diijinkan kurang dari enam kali tekanan internal pada dinding silinder, yaitu silinder dinding tebal.

$$\frac{\sigma_t}{P} < 6$$

- b. Jika tegangan yang diijinkan lebih dari enam kali tekanan internal pada dinding silinder (σ_t), yaitu silinder dinding tipis.

$$\frac{\sigma_t}{P} > 6$$

2.5 Tegangan Normal

(Khurmi, 2005: 225) Saat silinder diberi tekanan (P) maka ada kemungkinan untuk terjadi kegagalan. Kegagalan tersebut bisa terjadi dalam dua hal :

- a. Kemungkinan gagal sepanjang bagian longitudinal membelah silinder menjadi dua (melingkar). Dapat dilihat pada gambar 2.9.

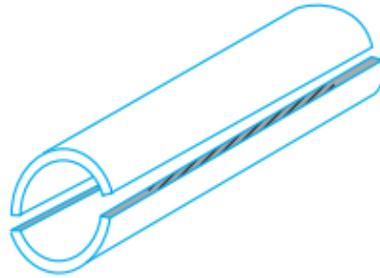
Siti Mutmainah, 2020

Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

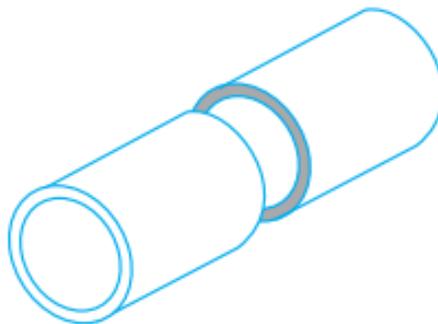
UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]

- b. Kemungkinan gagal melintasi bagian melintang, memecah silinder menjadi dua dinding silinder (longitudinal). Dapat dilihat pada gambar 2.10.

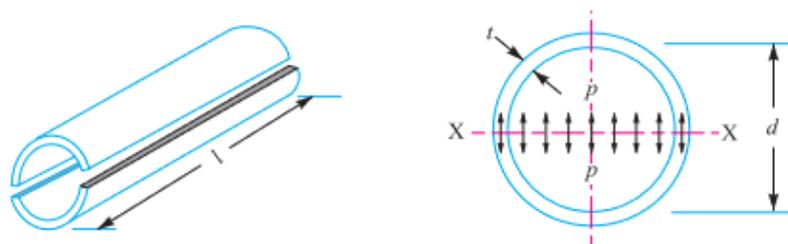


Gambar 2.9 Kegagalan Sepanjang Bagian Longitudinal (Khurmi, 2005)



Gambar 2.10 Kegagalan Melintasi Bagian Melingkar (Khurmi, 2005)

2.5.1 Tegangan Melingkar atau *Circumferential*



Gambar 2.11 Tegangan Melingkar atau *Circumferential* (Khurmi, 2005)

Dimana: p = tekanan internal dinding silinder,

Siti Mutmainah, 2020

Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]

d = diameter dalam dinding silinder,

l = panjang dinding silinder

t = tebal dinding silinder

σ_{tl} = tegangan circumferential dari material dinding silinder

Tegangan tarik yang bekerja dalam arah tangensial secara melingkar disebut tegangan melingkar atau *circumferential*. Dengan istilah lain adalah tegangan tarik pada bagian memanjang (atau pada dinding silinder). Berdasarkan gambar 2. adanya gaya yang bekerja secara melintang dan gaya penahan yang ditulis sebagai persamaan berikut :

$$\sigma_{tl} l = \frac{P \times d}{2t} \quad \text{atau} \quad t = \frac{P \times d}{2\sigma_{tl} l}$$

Hal hal yang perlu diperhatikan:

- a. Dalam desain silinder mesin, nilai 6 mm sampai 12 mm ditambahkan pada persamaan di atas untuk memungkinkan reboring setelah aus terjadi. Maka dari itu persamaannya menjadi :

$$t = \frac{P \times d}{2\sigma_{tl} l} + 6 \text{ sampai } 12 \text{ mm}$$

- b. Dalam konstruksi bejana bertekanan besar seperti ketel uap, sambungan paku keling (*riveted join*) atau sambungan las digunakan untuk menyatukan ujung pelat baja. Dalam kasus sambungan paku keling, ketebalan dinding silinder,

$$t = \frac{P \times d}{2\sigma_{tl} \times \eta l}$$

Dimana : ηl = efisiensi dari sambungan paku keling

- c. Untuk *ductile* material, besar tegangan melingkar atau *circumferential* (σ_{tl}) nilainya 0,8 kali tegangan titik leleh (σ_y) dan untuk *brittle* material σ_{tl} besarnya 0,125 kali tegangan tarik *ultimate* (σ_u).

$$\sigma_{tl} = 0,8 \sigma_y \text{ (ductile material)}$$

Siti Mutmainah, 2020

Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]

$$\sigma_{tl} = 0,125 \sigma_u \text{ (brittle material)}$$

- d. Dalam merancang ketel uap, ketebalan dinding yang dihitung oleh persamaan di atas mungkin dibandingkan dengan ketebalan plat minimum seperti yang disediakan dalam kode boiler seperti yang diberikan dalam tabel berikut :

Tabel 2.1 Ketebalan Plat Minimal Untuk Sistem Boiler

Diameter Boiler	Ketebalan Plat Minimal
0.9 m atau kurang	6 mm
0.9 m sampai 1.35 m	7.5 mm
1.35 m sampai 1.8 m	9 mm
Lebih dari 1.8 m	12 mm

Sumber : Khurmi, 2005.

Jika nilai t yang dihitung kurang dari persyaratan kode, maka diambil hasil yang terakhir. Jika tidak, nilai yang dihitung dapat digunakan.

Kode boiler juga menyatakan bahwa faktor keselamatan harus sekurang-kurangnya 5, untuk baja pelat dan paku keling harus memiliki minimum tekanan utama berikut :

Tensile stress, $\sigma_t = 385 \text{ MPa}$

Stres tekan, $\sigma_c = 665 \text{ MPa}$

Stres geser, $\tau = 308 \text{ MPa}$

2.5.2 Tegangan longitudinal

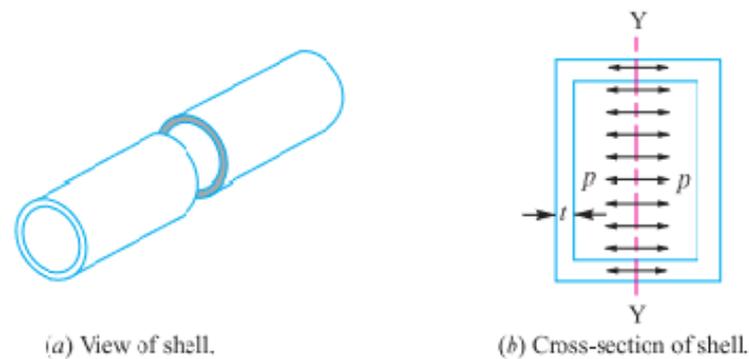
Gambaran mengenai silinder dinding tipis tertutup yang mengalami tekanan internal seperti yang ditunjukkan pada gambar berikut ini

Siti Mutmainah, 2020

Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]



Gambar 2.12 Tegangan Longitudinal (Khurmi, 2005)

Tegangan tarik yang bekerja secara melintang atau keliling bagian Y-Y (atau di ujung silinder) dinamakan tegangan longitudinal.

Misalkan σ_{l2} = tegangan longitudinal.

Berdasarkan gambar 2.12 dapat dibuat pernyataan gaya keseluruhan yang bekerja pada bagian melintang sama dengan jumlah gaya penahan yang ditulis sebagai persamaan berikut :

$$\sigma_{l2} = \frac{p \times d}{4t} \quad \text{atau} \quad t = \frac{p \times d}{4\sigma_{l2}}$$

Jika η_c merupakan efisiensi sambungan paku keling maka dapat ditulis persamaan sebagai berikut :

$$t = \frac{p \times d}{4\sigma_{l2} \times \eta_c}$$

Dari penjelasan di atas dapat disimpulkan bahwa tegangan longitudinal adalah tegangan melingkar dikalikan satu per dua atau setengah dari tegangan melingkar (*circumferential*). Maka dari itu, desain bejana tekan harus didasarkan pada tegangan maksimum, yaitu tegangan melingkar (*circumferential*).

2.6 Beban Yang Bekerja Pada Bejana

(Cahyono, 2004) Bejana tekan memiliki berbagai pembebanan yang berbeda-beda pada setiap komponennya. Jenis dan intensitas gaya-gaya ini menjadi fungsi dari pembebanan dan geometri serta konstruksi dari komponen bejana :

Siti Mutmainah, 2020

Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]

2.6.1 Bobot Mati Bejana (*Dead Load*)

Berat bejana itu sendiri dan elemen-elemen yang sudah terpasang secara permanen. Berat bejana dapat digolongkan menjadi tiga yaitu :

a. Bobot kosong

Berat bejana yang hanya memiliki dinding dan kepala, tanpa insulasi luar.

b. Bobot operasi

Berat yang ditambahkan insulasi internal maupun eksternal, pada saat kondisi terpasang dan beroperasi penuh.

c. Shop test dead load

Hanya memiliki dinding saja dan diisi oleh fluida *tester* setelah proses *welding* selesai.

2.6.2 Beban Karena Gempa Bumi

Kekuatan seismik pada bejana berasal dari pergerakan secara tiba tiba dan tidak teratur yang mempengaruhinya di dalam tanah tempat bejana berada. Intesitas dan durasi gempa yang terjadi adalah faktor utama yang merusak struktur bejana akibat getaran. Gaya transien, tegangan dinamik alami, serta tegangan kompleks adalah gaya dan tegangan yang terjadi selama gempa pada struktur bejana.

Gaya aksi akibat gempa arah horizontal pada bejana direduksi dalam gaya *static equivalen*. Hal yang sangat penting untuk mengatasi kekuatan gempa pada sebuah struktur adalah mendesain struktur untuk menahan gaya geser horizontal minimum yang diterima pada bagian dasar bejana pada segala arah, agar mengurangi risiko kegagalan terhadap pengaruh seismik gempa.

2.6.3 Beban Angin

Beban angin yang dimaksud adalah angin dengan aliran turbulen dipermukaan bumi dengan kecepatan yang beraneka ragam. Angin yang mempengaruhi kecepatan rata rata tertentu pada fluktuasi aliran tiga dimensi lokal juga diasumsikan dalam beban ini. Arah alirannya horizontal, namun bisa menjadi vertikal ketika melalui permukaan yang berintangan.

Siti Mutmainah, 2020

Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]

2.6.4 Tekanan Desain

Tekanan yang digunakan untuk menentukan nilai ketebalan dinding atau shell minimum yang diperlukan bejana dinamakan tekanan desain. Tekanan desain nilainya lebih besar atau di atas tekanan operasi(10% dari tekanan operasi atau minimum 10 psi) ditambah dengan besarnya static head dari fluida kerja, yang dapat ditulis sebagai berikut :

$$P_d = P_o + a + \text{StaticHead}$$

Dimana : P_d = tekanan desain, psi

P_o = tekanan operasi, psi

$a = 0,1P_o$ atau minimum 10 psi

$$\text{StaticHead} = \rho gh$$

ρ = densitas udara, lbm/ft³

g = percepatan gravitasi bumi, ft/sec²

h = tinggi bejana,ft

2.7 Deformasi

Jika suatu benda diberikan atau dikenai gaya akan terjadi perubahan bentuk dan ukuran yang dinamakan deformasi. Deformasi yang terjadi karena adanya energi yang diserap oleh suatu benda. Deformasi dibedakan menjadi dua yaitu, deformasi elastis dan deformasi plastis.

Suatu benda dapat dikatakan mengalami deformasi elastis apabila benda tersebut menerima sebuah beban dan jika beban tersebut dihilangkan atau ditiadakan, maka kembali pada bentuk semula. Dan dikatakan deformasi plastis apabila mengalami perubahan bentuk maupun ukuran jika beban dihilangkan.

Pemberian beban pada material yang memiliki kekuatan tinggi tidak dapat dilakukan, karena pada kondisi seperti ini material telah mengalami deformasi total. Apabila penambahan beban tetap diberikan maka akan terjadi penambahan

Siti Mutmainah, 2020

Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]

regangan yang menyebabkan material seakan menguat yang dinamakan penguatan regangan(*strain hardening*) yang selanjutnya benda akan mengalami putus pada kekuatan patah(*fatigue*).

Berdasarkan hubungan tegangan-regangan, deformasi dapat dihitung dengan persamaan berikut ini:

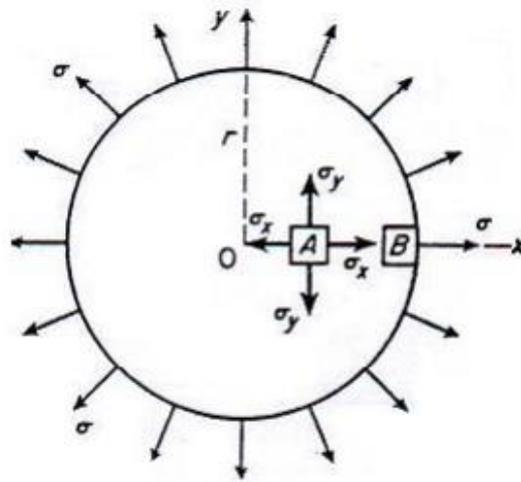
$$\delta = \frac{P \times L}{A \times E}$$

Dimana : P = beban (N)

L = panjang awal (mm)

A = luas penampang (mm²)

E = *young's modulus* (N/mm²)



Gambar 2.13 Tegangan Radial Pada Silinder (Bethalembah, 2015: 80)

(Bethalembah, 2015: 80) Sebuah Silinder dengan jari-jari r dan tebal t mendapat tegangan radial σ terdistribusi merata pada sembarang elemen diseluruh kelilingnya sebagaimana ditunjukkan oleh gambar 2.13 Ketika terjadi tegangan-tegangan σ_x dan σ_y pada dua arah x dan y, regangan pada kedua arah ini bukan dipengaruhi oleh tegangan pada arah itu saja tapi juga dipengaruhi oleh tegangan pada arah orthogonal karena perbandingan poisson.

Siti Mutmainah, 2020

Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]

Berdasarkan hubungan tegangan-regangan maka besarnya tegangan yang terjadi pada sumbu-x dan sumbu-y dapat ditulis sebagai berikut ini :

$$\sigma_x = \frac{(\varepsilon_x + \mu\varepsilon_y)E}{1 - \mu^2}$$

$$\sigma_y = \frac{(\varepsilon_y + \mu\varepsilon_x)E}{1 - \mu^2}$$

Pada arah x dalam batas elastis, plat mengalami regangan positif dan disaat yang sama terjadi pula regangan negatif akibat kontraksi lateral yang berhubungan dengan tegangan tarik σ_y . Dengan alasan yang sama maka berlaku pula pada regangan total pada arah y. Sehingga dari uraian di atas dapat dibuat pernyataan :

$$\sigma_x = \sigma_y = \sigma$$

Untuk menentukan besarnya nilai regangan pada arah ini berdasarkan hubungan tegangan-regangan persamaannya ditulis sebagai berikut ini:

$$\varepsilon_x = \varepsilon_y = \frac{\sigma}{E}(1-\mu)$$

Pada arah z normal bidang plat akan terjadi kontraksi aksial akibat pengaruh dari perbandingan poisson yang berhubungan dengan terjadinya masing-masing tegangan prinsip σ_x dan σ_y , sehingga besarnya nilai regangan pada arah ini dapat ditulis sebagai berikut ini :

$$\varepsilon_z = -\frac{2\mu}{E} \sigma$$

Dimana : σ = tegangan radial

μ = perbandingan poisson

E = modulus elastisitas

Penambahan atau peningkatan jari jari silinder karena deformasi yang dipengaruhi oleh tegangan pada arah sumbu-x σ_x , dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini:

$$r = r(1 + \varepsilon_x)$$

Penambahan tebal dinding silinder karena deformasi yang dipengaruhi oleh tegangan pada arah sumbu-x σ_x , dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini:

Siti Mutmainah, 2020

Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]

$$t = t(1 + \varepsilon x)$$

Perubahan dimensi panjang atau tinggi silinder (memendek) karena deformasi yang dipengaruhi oleh tegangan pada arah sumbu-z σ_z , dapat dihitung menggunakan persamaan berikut ini :

$$l = l(1 + \varepsilon z)$$

Perubahan pada jari-jari silinder diikuti dengan tebal dinding silinder dan tinggi silinder menyebabkan terjadinya perubahan pula pada volume silinder sehingga persamaannya menjadi :

$$\text{volume akhir} = \pi r^2 l (1 + \varepsilon z + 2\varepsilon x)$$

Perbandingan selisih volume ΔV dengan volume mula-mula dinamakan deformasi volume. Besarnya nilai deformasi volume dapat dihitung dengan persamaan berikut ini :

$$\frac{\Delta V}{V} = \varepsilon z + 2\varepsilon x$$

2.8 Faktor Keamanan

Angka keamanan yang harus dipenuhi dalam mendesain tegangan struktur. Faktor keamanan harus diasumsikan ke dalam desain melalui *ultimate stress*, *endurance limit*, *yield limit*, atau kriteria kekuatan lainnya. Tegangan yang digunakan dalam mendesain sebuah mesin harus memiliki faktor keamanan untuk meminimalisir dan mencegah terjadinya kegagalan. Tegangan tersebut biasa disebut *safe stress*, *permissible stress*, atau *allowable stress*.

Tegangan luluh terjadi karena adanya deformasi plastis akibat beban yang dikenakan. Tegangan maksimum yang mampu dicapai oleh material sebelum mengalami patah (*fatigue*) dinamakan *ultimate stress*. Kegagalan terjadi ketika sebuah mesin tidak mampu beroperasi sesuai dengan fungsinya dan sebagian besar elemen mesin tidak beroperasi sebagaimana mestinya setelah menerima deformasi tetap sehingga dibutuhkan faktor keamanan dari bagian-bagian elemen mesin dengan kriteria batas luluh.

Siti Mutmainah, 2020

Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]

Adapun tujuan dari menggunakan faktor keamanan adalah untuk menentukan hal berikut ini :

- a. Antisipasi terhadap beban berlebih yang mungkin akan terjadi saat perlakuan tertentu
- b. Pembebanan maksimum yang terjadi pada struktur atau mesin
- c. Memprediksi kekuatan dari materi yang digunakan
- d. Penentuan dimensi dari suatu struktur yang akan dirancang

Untuk menentukan nilai dari faktor keamanan dari suatu struktur maka dapat menggunakan rumus sebagai berikut :

$$\text{Safety factor} = \frac{\text{tegangan yang diizinkan}}{\text{tegangan yield}}$$

2.9 Korosi

Korosi berasal dari bahas latin “corroder” yang artinya merusak logam atau berkarat. Korosi adalah penurunan kualitas logam yang disebabkan oleh reaksi elektrokimia antar logam dengan lingkungan sekitarnya. Korosi juga dapat diartikan sebagai peristiwa alamiah yang terjadi pada logam dan merupakan kembalinya logam korosi ke kondisi semula saat logam ditemukan dan diolah dari alam. Untuk mengetahui umur operasi dari suatu produk dengan asumsi kondisi lingkungan korosi dapat dihitung sebagai berikut :

$$\text{Umur operasi} = \frac{CA}{CR}$$

Dimana : CA = *corrosion allowance*, mm

CR = *corrosion rate*, mpy

Budianto et al (2009) dalam Rukmana (2017) Bentuk-bentuk korosi dapat dibedakan sebagai berikut :

a. *Uniform Corrosion*

Korosi yang terjadi secara merata diseluruh permukaan logam. Logam yang mengalami hal ini akan terjadi pengurangan dimensi yang relatif

Siti Mutmainah, 2020

Rancangan “Air Compressor Tank” Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]

besar per satuan waktu. Selain itu juga akan mengalami kerugian langsung berupa kehilangan material konstruksi, keselamatan kerja, dan pencemaran lingkungan. Sedangkan kerugian tidak langsung, antara lain berupa penurunan kapasitas dan peningkatan biaya perawatan (preventive maintenance).

b. Pitting Corrosion

Korosi lokal yang terjadi pada permukaan yang terbuka akibat pecahnya lapisan pasif. Korosi ini sangat berbahaya karena lokasi terjadinya sangat kecil tetapi dalam, sehingga dapat menyebabkan tstruktur patah secara mendadak.

c. Stress Corrosion Cracking

Material mengalami keretakan karena pengaruh lingkungannya. Biasanya terjadi pada paduan logam yang mengalami tegangan tarik statis di lingkungan tertentu, seperti baja tahan karat sangat rentan terhadap lingkungan klorida panas.

d. Erosion Corrosion

Peningkatan laju kerusakan logam karena adanya aliran fluida yang bersifat korosif pada permukaan logam. Biasanya aliran ini sangat cepat seperti aliran fluida dalam pipa, sehingga dapat menimbulkan keausan atau abrasi.

e. Galvanic Corrosion

Apabila dua logam yang tidak sama dihubungkan dan berada dilingkungan korosif maka akan terjadi korosi galvanik. Logam yang memiliki potensial lebih rendah akan mengalami korosi, begitupun sebaliknya. Logam yang memiliki potensial lebih tinggi akan terlindungi.

f. Crevice Corrosion

Korosi lokal yang terjadi pada celah diantara dua komponen. Hal ini disebabkan oleh uniform corrosion yang terjadi di luar dan di dalam celah, sehingga terjadi proses oksidasi logam dan reduksi oksigen. Oksigen yang berada di dalam celah habis, sedangkan oksigen yang berada di luar celah masih banyak, akibatnya permukaan logam yang berhubungan dengan

bagian luar menjadi katoda dan permukaan logam bagian dalam menjadi anoda sehingga terbentuk celah yang terkorosi.

g. *Selective Leaching*

Korosi yang terjadi pada paduan logam karena pelarutan salah satu unsur paduan yang lebih aktif, misal tembaga-seng.

Laju korosi adalah kecepatan rambatan atau kecepatan penurunan kualitas bahan terhadap waktu. Pada umumnya, kondisi lingkungan sangat berpengaruh dalam menetapkan besarnya laju korosi suatu material. Oleh karena itu, mengetahui kondisi lingkungan merupakan hal penting dalam merancang suatu produk untuk menentukan daya tahan desain terhadap korosi. Berikut kondisi lingkungan yang mempengaruhi laju korosi :

a. Atmosfer

Lingkungan paparan yang paling umum untuk korosi logam adalah atmosfer. Baja, tembaga, aluminium dan logam lainnya mengalami kontak langsung dengan atmosfer, bereaksi dengan udara dan kelembaban sehingga menjadi oksida. Kinerja logam yang mengalami kontak langsung dengan atmosfer dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti, temperatur, kelembaban, curah hujan, konsentrasi sulfur dioksida di udara, dan salinitas udara.

Korosi baja karbon terjadi ketika kelembaban relatif udara sekitar 70% sampai 80% dan temperatur udara di atas 32F. Cepat atau lambatnya laju korosi disebabkan oleh kotoran udara yang larut dalam air dan tekondensasi atau air hujan dan debu atau kotoran yang menempel pada permukaan logam. Laju korosi umum baja karbon lainnya tertera pada tabel berikut ini :

Tabel 2.2 Tingkat Korosi Merata (*uniform corrosion*) Baja di Atmosfer

Atmosphere	Corrosion Rate ($\mu\text{m}/\text{year}$)
Rural	4 – 60

Siti Mutmainah, 2020

Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]

Urban	30 – 70
Industrial	40 – 160
Marine	60 – 170

Sumber : galvanizeit.org

b. Di Tanah

Kekuatan korosif pada baja dalam tanah berbeda dengan kondisi paparan lingkungan atmosfer. Baja membutuhkan oksigen, kelembaban, dan garam terlarut untuk menimbulkan korosi. Jika salah satu dari ini tidak ada, reaksi akan berhenti atau berjalan sangat lambat. Baja terkorosi dengan cepat di lingkungan asam dan lambat atau tidak sama sekali karena alkalinitas meningkat. Laju korosi baja dapat berkisar kurang dari $0,2 \mu\text{m}$ per tahun dalam kondisi yang bagus hingga $20 \mu\text{m}$ per tahun di tanah yang sangat agresif.

Faktor utama yang menentukan korosifitas tanah adalah kadar air, tingkat pH, dan klorida. Kondisi tanah ini dipengaruhi oleh karakteristik lain seperti, aerasi, temperatur, resistivitas, dan ukuran partikel.

c. Air

Kelembaban sangat korosif untuk sebagian besar logam termasuk baja, aluminium, dan seng. Ada beberapa jenis air yaitu air murni, air tawar alami, air minum (air minum olahan) dan air laut, masing masing memiliki mekanisme berbeda yang menentukan laju korosi. Faktor yang mempengaruhi korosi logam dalam air meliputi tingkat pH, kadar oksigen, suhu air, agitasi, adanya inhibitor dan kondisi pasang surut.

2.10 Software CAD

(Triyadi, 2020) *Computer Aided Design (CAD)* adalah suatu program komputer untuk menggambar suatu produk atau bagian dari suatu produk. Produk yang ingin digambarkan bisa diwakili oleh garis-garis maupun simbol-simbol

Siti Mutmainah, 2020

Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]

yang memiliki makna tertentu. CAD bisa berupa gambar 2 dimensi dan gambar 3 dimensi.

2.11 *Finite Element Analysis*

Metode numerik menyediakan alat umum untuk menganalisis geometri arbitrer dan kondisi pemuatan. Di antara metode numerik, *Finite Element Analysis* (FEA) telah banyak digunakan. Namun, analisis semacam ini membutuhkan pembuatan set data dalam jumlah besar untuk mendapatkan hasil yang cukup akurat dan menghabiskan banyak waktu dan sumber daya teknik komputer.

FEA adalah pilihan yang baik untuk menganalisis karena membantu menghilangkan kebutuhan akan eksperimen yang menghabiskan waktu untuk mengoptimalkan parameter proses. Simulasi FEA semakin banyak digunakan untuk menyelidiki dan mengoptimalkan proses blanking. Banyak percobaan yang menghabiskan waktu dapat digantikan oleh simulasi komputer. Oleh karena itu, hasil analisis yang sangat akurat dapat diperoleh dengan menggunakan simulasi FEA. FEA memberikan solusi perkiraan dengan akurasi yang tergantung terutama pada jenis elemen dan kehalusan elemen mesh hingga (Triyadi, 2020).

Tahapan-tahapan dalam melakukan FEA dapat dijabarkan secara garis besar menjadi sebagai berikut:

- a. Pembuatan geometri awal struktur yang akan dianalisis.
- b. Pembuatan elemen dari hasil pemodelan geometri struktur yang akan dianalisa (mesh generation).
- c. Pemberian kondisi batas (*constraint / boundary condition*) Kondisi batas diperlukan untuk menentukan bagaimana model tersebut tertumpu padaudukanya dalam kondisi nyata. Hal ini sangat menentukan bagaimana hasil dari analisa model geometri tersebut. Berbagai macam kondisi batas yang biasa digunakan antara lain *fixed-fixed*, *fixedfree*, *free*, dsb.
- d. Penentuan jenis material dan properti material yang digunakan, hal ini berkenaan dengan massa jenis, modulus elastisitas (*young modulus*, E), poisson's ratio, tegangan tarik, tegangan geser, dan lain sebagainya.

Siti Mutmainah, 2020

Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]

- e. Pemberian kondisi pembebanan (*loading condition*). Kondisi pembebanan yang diberikan pada model struktur sama dengan beban pada kondisi nyatanya. Hal ini dilakukan untuk mendapat hasil yang sedekat mungkin dengan kondisi kenyataan. Beban yang biasa diberikan dapat berupa beban gaya, momen, atau tekanan baik statik ataupun dinamik.
- f. Analisa. Langkah ini merupakan langkah terakhir dalam tahapan FEA. Analisa dilakukan menggunakan perangkat lunak. Jenis analisa yang dapat dilakukan juga bervariasi dari jenis analisa statik, dinamis, buckling, maupun analisa perpindahan panas

Berikut ini adalah persamaan matematika yang digunakan dengan bantuan program CAE :

Maksimum *Von Misses Stress* :

$$\frac{\sigma \text{ limit}}{\sigma \text{ vonmisses}}$$

Tegangan Geser Maksimum :

$$\frac{\sigma \text{ limit}}{2T \text{ maks}}$$

Tegangan Normal Maksimum :

$$\frac{\sigma \text{ limit}}{\sigma_1}$$

Maksimum *Stress Criterion (Composite)*:

$$F.I = \text{Max}\left(\frac{\sigma_1}{X_1}, \frac{\sigma_2}{X_2}, \left| \frac{\sigma_{12}}{S_{12}} \right| \right)$$

$$FOS = 1/ \text{SQRT}(F.I)$$

T-sai Hill *Failure Criterion (Composite)*:

$$F.I = \frac{\sigma_1^2}{X_1^2} - \frac{\sigma_1 \sigma_2}{X_1^2} + \frac{\sigma_2^2}{X_2^2} + \frac{\tau^2_{12}}{S_{12}}$$

$$FOS = 1/ \text{SQRT}(F.I)$$

Siti Mutmainah, 2020

Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]

T-sai Wu Failure Criterion (Composite):

$$F_1 \sigma_1 + F_2 \sigma_2 + 2F_{12} \sigma_1 \sigma_2 + F_{11} \sigma_1^2 + F_{22} \sigma_2^2 + F_6 \tau_{12} + F_{66} \tau_{12}^2 = 1$$

$$F_1 = \left(\frac{1}{X_1^T} - \frac{1}{X_1^C} \right), F_2 = \left(\frac{1}{X_2^T} - \frac{1}{X_2^C} \right), F_6 = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{1}{(X_1^T)(X_1^C)} \times \frac{1}{(X_2^T)(X_2^C)}}$$

$$F_{11} = \left(\frac{1}{X_1^T} - \frac{1}{X_1^C} \right), F_{22} = \left(\frac{1}{X_2^T} - \frac{1}{X_2^C} \right), F_6 = \frac{1}{X_{12}^T} - \frac{1}{X_{12}^C}, F_{66} = \frac{1}{X_{12}^T \times X_{12}^C}$$

Siti Mutmainah, 2020

Rancangan "Air Compressor Tank" Kapasitas 500 Dm³ Dan Tekanan Maksimum 10 Kg/Cm² Dengan Pendekatan Optimasi Secara Teoritis, Empirik Dan Simulasi

UPN Veteran Jakarta, Fakultas Teknik, S-1 Teknik Mesin

[www.upnvj.ac.id – www.library.upnvj.ac.id – www.repository.upnvj.ac.id]