

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Bejana tekan merupakan suatu wadah yang berfungsi sebagai penampung fluida, baik fluida cair maupun gas. Dalam perancangan suatu bejana tekan ada beberapa hal yang harus diperhatikan, yaitu tegangan-tegangan yang muncul pada dinding bejana tersebut akibat tekanan yang dihasilkan karena fluida yang berada dalam bejana, berat bejana itu sendiri, maupun tekanan yang muncul akibat faktor eksternal, seperti beban angin dan gempa yang diperoleh oleh bejana.

Tegangan yang timbul pada bejana tekan akan menjadi suatu pertimbangan pada saat perancangan bejana tekan itu sendiri. Pemilihan ketebalan dinding yang akan dibuat untuk bejana tekan tersebut dipengaruhi oleh tegangan yang timbul. Seperti diketahui, perancangan bejana tekan memiliki standar perancangan yang telah dibuat untuk mengurangi resiko terjadinya kegagalan atau kesalahan perencanaan konstruksi yang dapat membahayakan keselamatan manusia. Standar tersebut dibuat dengan faktor keamanan yang sedemikian rupa sehingga kemungkinan terjadinya kegagalan dapat dihindari. Dalam standar yang telah dibuat, terdapat acuan-acuan yang harus diperhatikan agar kemungkinan terjadinya kegagalan di daerah kritis dapat dihindari seperti pada bagian *opening* dan sambungan pada setiap bagian konstruksi bejana tekan tersebut.

Pada perkembangan zaman saat ini, penggunaan bejana tekan sebagai wadah fluida bertekanan meningkat seiring dengan perkembangan industri. Oleh karena itu, suatu perancangan bejana tekan disertai analisa tegangan yang muncul akan sangat membantu dalam pembuatan bejana tekan itu sendiri, sehingga dapat ditentukan pemilihan tebal dinding yang sesuai, karena ketebalan dinding bejana tekan sangat mempengaruhi biaya pembuatan bejana tekan. Perancangan bejana tekan yang baik berdasarkan standar yang telah ditentukan serta pendekatan secara analitis dengan *software* diharapkan mampu memberikan analisa tegangan perancangan bejana tekan yang mendekati tegangan yang sesuai pada kenyataan.

## 1.2 Perumusan Masalah

Bejana tekan merupakan salah satu alat proses dalam suatu industri yang penting, khususnya untuk industri kimia, perminyakan, dan pembangkit listrik seperti pada pembangkit tenaga nuklir. Pada industri tersebut, bejana yang digunakan kerap kali merupakan bejana yang memiliki tekanan yang tinggi. Kegagalan yang terjadi pada bejana tekan dapat menyebabkan suatu kerusakan yang cukup besar baik dalam keselamatan manusia ataupun kerusakan alat lainnya di sekitar bejana tersebut.

Perancangan bejana tekan menjadi suatu aspek yang sangat penting dalam memenuhi kebutuhan suatu proses yang memerlukan suatu wadah sebagai alat penampung fluida dengan tekanan operasi yang relatif tinggi maupun sebagai wadah suatu proses dalam industri. Pemilihan ketebalan pelat bejana tekan dengan pertimbangan beban yang diterima harus diperhitungkan sesuai dengan peraturan yang telah dibuat sehingga kegagalan yang dapat menyebabkan kerusakan dapat dihindari.

Pendekatan perhitungan dalam analisa matematis sebagai rancangan awal dan membandingkannya dengan analisa *software* dengan pendekatan metode elemen hingga diharapkan mampu memprediksi besarnya tegangan dan mengetahui daerah kritis yang terdapat pada bejana tekan tersebut.

## 1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian kali ini adalah:

1. Mampu merancang suatu bejana tekan untuk memenuhi kebutuhan dengan pertimbangan tekanan operasi, suhu, dan kapasitasnya. Sehingga dapat menentukan ketebalan dinding, konstruksi penopang (*skirt*), pipa, *flange*, *lifting lug*, dan komponen lainnya yang dibutuhkan dalam konstruksi bejana tekan tersebut, serta menentukan sambungan yang digunakan bejana tekan tersebut sesuai ketentuan.
2. Mampu menganalisa adanya tegangan pada bagian kritis bejana tekan.

#### 1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah yang diberikan pada penelitian ini dimaksudkan agar pembahasan penelitian lebih maksimal dan terfokus. Adapun batasan masalah pada penelitian ini adalah :

1. Bejana tekan yang dirancang merupakan bejana tekan tipe vertikal.
2. Perancangan bejana tekan mengacu pada ketentuan standar yang berlaku yaitu *ASME section VII Rules for Construction of Pressure Vessels*.
3. Analisa tegangan pada bejana tekan menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software*, untuk pemodelan digunakan *SolidWork 2010* dan analisa *ANSYS Workbench 12*.

#### 1.5 Metode Penelitian

Adapun langkah-langkah yang penulis lakukan dalam membuat tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Pustaka

Adapun studi pustaka ini diperoleh dari beberapa literatur, baik berupa buku-buku perpustakaan, jurnal-jurnal yang diperoleh dari internet, serta laporan tugas akhir yang berkaitan dengan tugas sarjana ini.

2. Analisa Data

Mencari data tentang sebuah bejana tekan yang beroperasi pada suatu perusahaan agar memperoleh data berupa kapasitas, tekanan, dan suhu operasi bejana tekan tersebut. Menghitung data-data yang dirancang pada pembuatan bejana tekan, serta menganalisa data-data tersebut dengan *software* sehingga dapat diketahui jenis dan besarnya tegangan yang muncul pada bejana tekan tersebut. Proses pemasukkan data mengacu pada referensi serta ketentuan standar *ASME Section VII Rules for Construction of Pressure Vessels*.

3. Bimbingan

Bertujuan untuk mendapatkan tambahan pengetahuan dan masukan dari dosen pembimbing serta koreksi terhadap kesalahan-kesalahan yang terjadi dalam pembuatan tugas akhir dan penyusunan laporan.

## **1.6 Sistematika Penulisan**

Laporan tugas akhir ini dibagi menjadi lima bagian yang saling berhubungan antara satu dengan lainnya, adapun sistematika penulisan laporan tugas akhir ini yaitu sebagai berikut :

### **BAB I PENDAHULUAN**

Berisi tentang latar belakang masalah, tujuan penelitian, pembatasan masalah, metode penelitian dan sistematika penulisan.

### **BAB II DASAR TEORI**

Berisi tentang jenis-jenis tegangan yang muncul pada bejana tekan, komponen-komponen pada bejana tekan dan sambungan pada bejana tekan.

### **BAB III METODOLOGI**

Berisi tentang tahapan dalam merancang bejana tekan, memodelkan bejana tekan, dan tahapan pada saat analisa.

### **BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN**

Berisi tentang hasil rancangan geometri bejana tekan yang digunakan, hasil analisa metode elemen hingga, sehingga dapat diketahui besarnya tegangan tegangan yang muncul pada bejana tekan.

### **BAB V PENUTUP**

Berisi tentang kesimpulan dari hasil pengujian serta saran yang dapat memperbaiki penelitian selanjutnya.

### **DAFTAR PUSTAKA**

Berisi tentang referensi yang digunakan dalam laporan tugas akhir yang disusun.

### **LAMPIRAN**

Berisi tentang grafik, tabel yang digunakan, validasi software, dan gambar teknik bejana tekan.

## **BAB II DASAR TEORI**

### **2.1 Perancangan Produk**

#### **2.1.1 Pendahuluan Perancangan**

Kesejahteraan dan kualitas hidup manusia yang telah dapat mencapai tingkat yang sangat tinggi pada saat ini, yang dapat dilihat antara lain pada kesejahteraan materi dan kesehatan fisik masyarakat, sebagian besar adalah diciptakan, dibuat, dan dimanfaatkannya berbagai produk dan jasa yang tak terhitung macam dan jumlahnya dan yang kini telah menjadi bagian yang tak terpisahkan lagi dari kehidupan manusia sehari-hari, oleh para insinyur dan ahli-ahli teknik lainnya.

Perancangan dan pembuatan produk merupakan bagian yang sangat besar dari semua kegiatan teknik yang ada. Kegiatan perancangan dimulai dengan didaptkannya persepsi tentang kebutuhan manusia, kemudian disusul oleh penciptaan konsep produk, disusul kemudian dengan perancangan, pengembangan, dan penyempurnaan produk, kemudian diakhiri dengan pembuatan dan pendistribusian produk.

Perancangan adalah kegiatan awal dari suatu rangkaian kegiatan dalam proses pembuatan produk. Dalam tahap perancangan dibuat keputusan-keputusan penting yang mempengaruhi kegiatan-kegiatan lain yang menyusul. Di antara keputusan penting tersebut termasuk keputusan yang membawa akibat apakah industri dalam negeri dapat berpartisipasi atau tidak dalam pembangunan proyek. Dalam melaksanakan tugas merancang, perancang memakai dan memanfaatkan ilmu pengetahuan, ilmu dasar teknik, pengetahuan empiris, hasil-hasil penelitian, informasi dan teknologi, yang semuanya dalam versi perkembangan dan kemajuan mutakhir. [Ref.8 hal 1]

#### **2.1.2 Perancangan dan Gambar Teknik**

Sebelum sebuah produk dibuat, maka produk tersebut haruslah dirancang terlebih dahulu. Dalam bentuknya yang paling sederhana, hasil desain tersebut dapat berupa sebuah sketsa atau gambar sederhana dari produk atau benda teknik yang

akan dibuat. Dalam hal si pembuat produk adalah si perancangnya sendiri, maka sketsa atau gambar yang dibuat cukup sederhana asal dapat dimengerti dirinya sendiri. Pada zaman modern ini sebagian besar produk merupakan benda teknik yang rumit yang mempunyai banyak elemen dan pada umumnya sudah tidak dapat lagi dibuat oleh hanya satu orang saja. Gambar yang dibuat pun sudah tidak sederhana lagi tetapi cukup rumit dan harus dibuat dengan aturan atau cara menggambar yang jelas agar dapat dimengerti oleh semua orang yang terlibat dalam kegiatan pembuatan produk. Gambar hasil desain produk adalah hasil akhir proses perancangan dan sebuah produk barulah dapat dibuat setelah dibuat gambar-gambar desainnya. Gambar adalah alat penghubung atau alat komunikasi antara perancang dan pembuat produk, dan antara semua orang yang terlibat dalam kegiatan perancangan dan pembuatan. Bahkan gambar teknik adalah bahasa universal yang dipakai dalam kegiatan dan komunikasi antara orang-orang teknik.

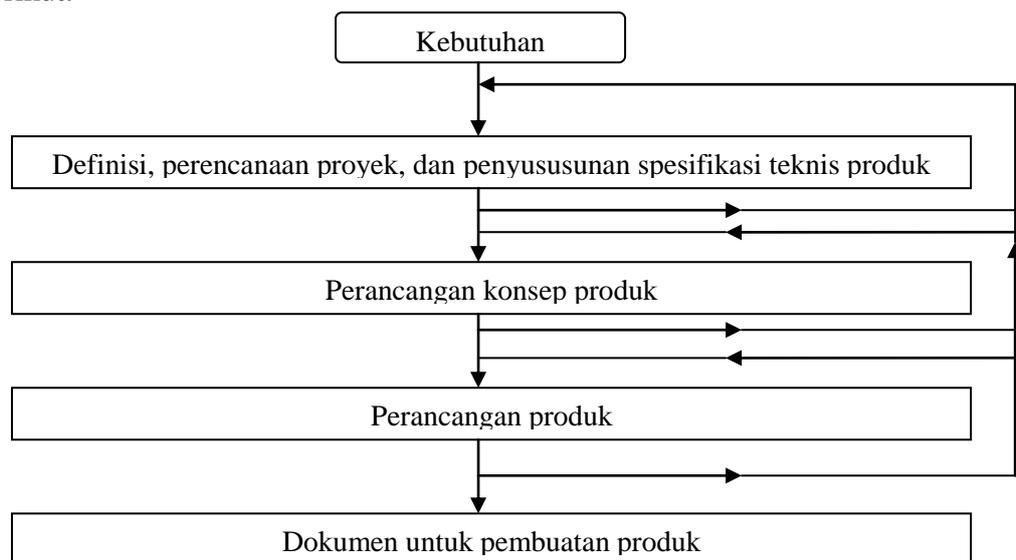
Perancangan dan pembuatan produk adalah dua kegiatan tunggal, artinya desain hasil kerja perancang tidak ada gunanya jika desain tersebut tidak dibuat, sebaliknya pembuat tidak dapat merealisasikan benda teknik tanpa terlebih dahulu dibuat gambar desainnya. Hasil kreasi berupa benda teknik dalam bentuk gambar merupakan tanggung jawab perancang, sedangkan realisasi fisik benda teknik tersebut adalah tanggung jawab pembuat. Sehingga gambar teknik merupakan bahasa penghubung antara keduanya dan merupakan elemen yang penting dalam suatu proses perancangan. [Ref.8 hal1-2]

### **2.1.3 Fase Dalam Perancangan**

Proses perancangan dimulai dengan ditemukannya kebutuhan manusia akan suatu produk yang dapat dimanfaatkannya untuk meringankan beban hidupnya. Kebutuhan akan suatu produk tersebut pada umumnya tidak ditemukan oleh perancang, meskipun perancang dapat melakukannya. Kebutuhan tersebut dapat pula berupa pesanan yang diterima dari instansi atau perusahaan lain untuk dibuatkan produk, atau dapat pula ditemukan ketika sedang melakukan survei pasar yang menghasilkan kesimpulan perlunya dibuat suatu produk yang dapat dijual ke

pasar. Kebutuhan akan suatu produk tersebut kemudian diberikan pada tim perancang untuk membuat desain produknya. Inilah awal proses perancangan.

Proses perancangan itu sendiri kemudian berlangsung melalui kegiatan kegiatan dalam fase yang berurutan, yaitu: 1) fase definisi proyek, perencanaan proyek, analisa masalah, dan penyusunan spesifikasi teknis produk, 2) fase perancangan konsep produk, 3) fase perancangan produk, 4) fase penyusunan dokumen atau pembuatan produk. Fase tersebut dapat dilihat pada diagram alir berikut.



Gambar 2.1 Diagram alir proses perancangan [Ref.8 hal 20]

Fase pertama merupakan kebutuhan produk. Kebutuhan akan produk ditemukan oleh bagian pemasaran atau siapa saja yang mengusulkan pada perusahaan. Produk baru yang akan diusulkan untuk dibuat tersebut haruslah dikaji lebih lanjut tentang kebenaran akan kebutuhannya, tentang kelayakan pembuatan dan pemasarannya dan lain-lain.

Ide produk yang telah dipilih kemudian dilakukan survei diantara pengguna dan pelanggan untuk mengetahui keinginan-keinginan pengguna terhadap produk tersebut. Berdasarkan keinginan pengguna tersebut kemudian disusun spesifikasi teknis produk yang selanjutnya akan dijadikan dasar fase perancangan berikutnya yaitu perancangan konsep produk. Tujuan fase perancangan konsep produk adalah menghasilkan alternatif konsep produk sebanyak mungkin. Konsep produk yang dihasilkan fase ini masih berupa skema atau dalam bentuk sketsa atau *skeleton*. Pada

prinsipnya, semua alternatif konsep produk tersebut memenuhi spesifikasi teknis produk. Pada akhir fase perancangan konsep produk, dilakukan evaluasi pada hasil desain konsep produk untuk memilih salah satu atau beberapa konsep produk terbaik untuk dikembangkan pada fase selanjutnya.

Fase perancangan produk merupakan fase setelah perancangan konsep produk dan terdiri dari beberapa langkah, tetapi pada intinya pada fase ini solusi-solusi alternatif dalam bentuk sketsa dikembangkan lebih lanjut menjadi produk atau benda teknik atau yang bentuk, material, dan dimensi elemennya telah ditentukan. Fase perancangan produk diakhiri dengan perancangan detail elemen-elemen produk yang kemudian dituangkan dalam gambar detail untuk proses pembuatan.

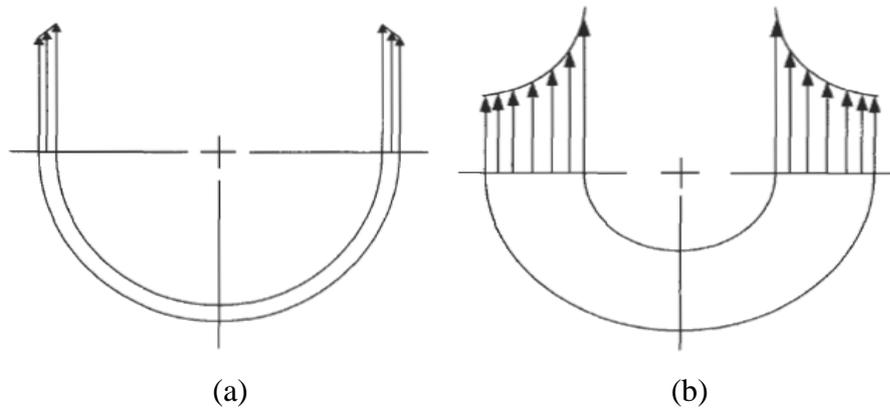
Gambar hasil perancangan produk terdiri dari : 1) gambar semua elemen lengkap dengan bentuk geometrinya, dimensi, kekerasan/kehalusan permukaan, dan material, 2) gambar (susunan) komponen (*assembly*). 3) gambar susunan produk. 4) spesifikasi yang memuat keterangan-keterangan yang tidak dapat dimuat pada gambar dan 6) *bill of material*. Gambar perancangan produk dapat dituangkan dalam bentuk gambar tradisional di atas kertas (2-dimensi) atau dalam informasi digital yang disimpan dalam memori komputer. Informasi dalam bentuk digital tersebut dapat di *print-out* untuk menghasilkan gambar tradisional atau dapat dibaca oleh sebuah *software* ke komputer, yang mengendalikan alat produksi yang akan membuat produk. [Ref.8 hal 20-23]

## **2.2 Definisi Bejana Tekan**

### **2.2.1 Definisi Bejana Tekan**

Bejana tekan merupakan suatu wadah untuk menyimpan fluida bertekanan. Fluida yang disimpan dapat mengalami perubahan keadaan pada saat berada di dalam seperti pada kasus boiler atau dapat digabungkan dengan suatu reagen lainnya seperti pada pabrik kimia. Bejana tekan dirancang dengan pertimbangan yang perlu diperhatikan karena pecahnya bejana tekan berarti terjadinya ledakan yang dapat menyebabkan hilangnya nyawa dan kerusakan benda sekitar. Berdasarkan dimensinya bejana tekan dapat dibagi menjadi 2, yaitu :

1. Bejana tekan dinding tebal yaitu bejana yang memiliki ketebalan dinding *shell* lebih dari  $1/20$  diameter *shell*.
2. Bejana tekan dinding tipis yaitu bejana yang memiliki ketebalan dinding *shell* kurang dari  $1/20$  diameter *shell*. [Ref.9 hal 2]



Gambar 2.2 (a) Bejana tekan dinding tipis (b) Bejana tekan dinding tebal [Ref. 9]

Perbedaan bejana tekan dinding tipis dengan dinding tebal berada pada distribusi tegangan yang terjadi pada dinding bejana tekan tersebut, bejana tekan dinding tebal memiliki distribusi tegangan yang harus diperhitungkan sedangkan pada bejana tekan dinding tipis distribusi tegangan dapat diabaikan karena perbedaan diameter luar dengan diameter dalam sangat tipis sehingga distribusi tegangan yang terjadi sangat kecil, dapat dilihat seperti pada Gambar 2.2 di atas. [Ref.9 hal 12]

Bejana tekan dapat didefinisikan sebagai wadah yang memiliki perbedaan tekanan antara tekanan yang berada di dalam dan di luar. Tekanan dalam biasanya lebih tinggi daripada tekanan luar, kecuali untuk beberapa keadaan yang terisolasi. Bejana tekan kerap menggabungkan antara tekanan yang tinggi dengan suhu yang tinggi, dan dalam kasus lainnya fluida yang mudah terbakar atau material dengan tingkat radio aktif yang tinggi. Karena bahaya tersebut, harus sangat diperhatikan pada saat perancangan sehingga kebocoran dalam bejana tidak terjadi. Selain itu bejana tekan ini harus dirancang dengan baik dalam mengatasi suhu dan tekanan operasi. Perlu diingat bahwa pecahnya suatu bejana tekan memiliki potensi untuk menyebabkan cedera fisik dan kerusakan pada benda di sekitarnya. Merencanakan

keamanan dan kesesuaian merupakan dasar pemikiran yang harus lebih diperhatikan dalam merancang bejana tekan dan tentu saja semua ini berdasarkan ketentuan dan peraturan yang telah dibuat dalam standar perancangan.

Bejana tekan digunakan dalam sejumlah industri, seperti industri pembangkit listrik dengan bahan bakar fosil dan nuklir, industri petrokimia sebagai tempat penyimpanan dan pengolahan minyak bumi dalam tangki seperti tempat penyimpanan pada stasiun bahan bakar, dan beberapa industri kimia (pada reaktor kimia). Penggunaannya telah berkembang di seluruh dunia. Bejana tekan dan tangki faktanya merupakan elemen penting pada industri perminyakan, kimia, petrokimia, dan industri nuklir. Hal ini dikarenakan peralatan tersebut merupakan tempat terjadinya suatu proses, pemisahan, dan penyimpanan bahan baku.

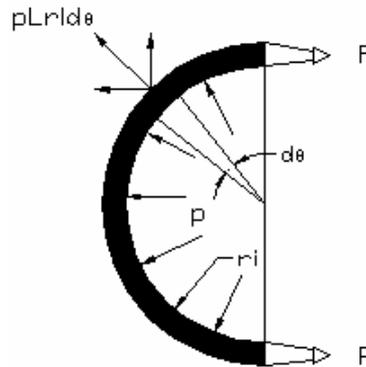
Ukuran dan bentuk dari bejana tekan sangat bermacam seperti bejana silindris besar yang digunakan pada tekanan tinggi sebagai penyimpanan gas sampai kepada ukuran yang kecil yang digunakan sebagai bagian hidrolis pada pesawat udara. Beberapa terkubur dalam tanah atau jauh di dalam laut, tetapi sebagian besar berada di atas tanah atau ditumpu pada *platform*. Bejana tekan seringkali berbentuk bola atau silinder dengan ujung berkubah. Bejana tekan silinder lebih sering dipilih karena lebih sederhana dalam pembangunannya dan memiliki kesesuaian ruang yang lebih baik. Ketel uap, perubah panas, reaktor kimia, dan yang lainnya seringkali berbentuk silinder. Bejana tekan bola memiliki keuntungan dalam ketebalan dinding yang dibutuhkan berdasarkan tekanan yang diberikan. Oleh karena itu, seringkali bejana tekan bola digunakan pada penyimpanan gas atau fluida skala besar, pendingin gas pada reaktor, bangunan pada pembangkit nuklir dan lainnya. [Ref.6]

### 2.2.2 Analisa Tegangan pada Bejana Tekan

Misalkan tekanan dalam yang melebihi tekanan luar  $P$  (tekanan terukur), dan radius dalam silinder sebesar  $r_i$ . Kemudian gaya pada suatu luasan yang kecil tak berhingga  $Lr_i d\theta$  (dimana  $d\theta$  adalah sudut kecil tak berhingga) dari silinder tersebut yang disebabkan oleh tekanan dalam yang bekerja tegak lurus adalah  $PLr_i d\theta$  seperti Gambar 2.3. Komponen gaya yang bekerja dalam arah mendatar adalah

$(PLr_i d\theta)\cos\theta$ . Jadi gaya perlawanan total sebesar  $2p$  yang bekerja pada segmen silindris adalah

$$2p = \int_0^{\pi/2} PLr_i \cos\theta d\theta = 2Pr_i L \text{ [Ref.11 hal 318]}$$



Gambar 2.3 Gaya dan tekanan pada bejana tekan [Ref. 11 hal 318]

Karena bentuk bejana yang simetri, maka setengah gaya total ini mendapatkan perlawanan pada potongan melalui silinder sebelah atas dan setengah lagi pada sebelah bawah. Tegangan normal  $\sigma_y$  yang bekerja sejajar dengan sumbu silinder tidak masuk dalam integrasi di atas.

Selain memperoleh gaya  $2p$  yang disebabkan oleh tekanan dalam integrasi, seperti yang dapat dilihat di atas, dapat pula melakukan prosedur yang sederhana yang setara. Dari sudut tinjauan lain, kedua gaya  $p$  melawan gaya yang terbentuk oleh tekanan dalam  $P$ , yang bekerja tegak lurus terhadap luas proyeksi  $A_1$  dari segmen silindris kepada bidang garis tengah silinder. Luas adalah  $2r_i L$ , jadi  $2p = A_1 P = 2r_i L P$ . Gaya ini mendapat perlawanan dari gaya yang terbentuk dalam bahan dalam potongan yang membujur, dan berhubung radius luar silinder adalah  $r_o$ , maka luas kedua potongan yang membujur adalah  $2A = 2L(r_o - r_i)$ . Selanjutnya, jika tegangan normal rata-rata yang bekerja pada potongan yang membujur adalah  $\sigma_y$ , maka gaya yang mendapat perlawanan dari dinding silinder adalah  $2L(r_o - r_i)\sigma_y$ . Dengan mempersamakan kedua gaya, maka

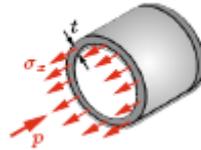
$$2r_i L P = 2L(r_o - r_i)\sigma_y$$

Karena  $(r_o - r_i)$  adalah  $t$  maka persamaan perhitungan tegangan pada bejana tekan dapat dituliskan sebagai berikut

$$\sigma_y = \frac{Pr_i}{t}$$

Tegangan normal yang diberikan oleh persamaan di atas biasa disebut tegangan *circumferential* atau *hoop stress*. Persamaan tersebut hanya berlaku pada bejana tekan berdinding tipis karena memberikan tegangan rata-rata dalam kelilingnya. [Ref 11 hal 319]

Tegangan normal lain yang bekerja pada bejana tekan secara membujur adalah  $\sigma_x$  yang dapat ditentukan dengan persoalan gaya aksial sederhana. Dengan membuat irisan melalui bejana yang tegak lurus terhadap sumbu silinder, maka diagram benda bebas dapat dilihat pada Gambar 2.4 di bawah ini.



Gambar 2.4 Tegangan *longitudinal* dan tekanan pada bejana tekan [Ref.7 hal 68]

Karena tekanan yang bekerja tersebut tidak tergantung pada lokasinya, maka tekanan pada bagian luas penampangnya adalah  $\pi r_i^2$  dan memiliki tekanan konstan  $P$ . Dengan  $\sigma_x$  adalah konstan melalui dinding karena tebalnya jauh lebih kecil dari radius bejana tekan tersebut.

$$\sigma_x 2\pi r_i t - p\pi r_i^2 = 0$$

$$\sigma_x = \frac{Pr_i}{2t} = 0$$

Maka persamaan tegangan *longitudinal* dapat dituliskan pada persamaan di atas, persamaan tersebut hanya berlaku pada bejana tekan dinding tipis tanpa adanya distribusi tegangan pada dindingnya. [Ref 7 hal 68]

### 2.3 Analisa Kegagalan

Dalam suatu rekayasa teknik, merupakan hal yang penting menentukan batasan tegangan yang menyebabkan kegagalan dari material tersebut. Dalam menggunakan teori kegagalan yang penting adalah menentukan tegangan utama (*principal stress*).

- Kriteria kegagalan statis

Ada tiga teori kegagalan yang biasa dipakai antara lain:

a. Teori tegangan normal maksimum

Teori ini menyatakan bahwa kegagalan terjadi bila salah satu dari tegangan utama (*principal stress*) sama dengan kekuatan dari material. Sebagai contoh untuk tegangan utama setiap keadaan disusun dalam bentuk :  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$

Jika kriteria kegagalan adalah titik luluh (*yield*), teori ini memperkirakan kegagalan akan terjadi bila :

$$\sigma_1 = S_{yr} \text{ atau } \sigma_3 = -S_{yc}$$

Dimana  $S_{yr}$  dan  $S_{yc}$  adalah kekuatan luluh terhadap gaya tarik dan gaya tekan. Kalau yang dipakai adalah kekuatan akhir, seperti pada bahan yang rapuh, maka kegagalan terjadi jika :

$$\sigma_1 = S_{ur} \text{ atau } \sigma_3 = -S_{uc}$$

b. Teori tegangan geser maksimum

Teori ini mengatakan bahwa kegagalan akan terjadi bila tegangan geser maksimum pada setiap elemen mesin sama dengan kekuatan geser dari material. Jika tegangan utama disusun dalam bentuk  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$  teori tegangan geser maksimal memperkirakan bahwa kegagalan akan terjadi bila :

$$\tau_{maks} = \frac{S_y}{2} \text{ atau } \sigma_1 - \sigma_3 \geq S_y$$

Teori ini menyatakan bahwa kekuatan luluh pada kekuatan geser diberikan oleh persamaan :

$$S_{sy} = 0.5S_y$$

c. Teori tegangan *Von Misses*

Teori ini memperkirakan suatu kegagalan mengalah dalam tegangan geser yang memadai lebih besar dari yang diperkirakan oleh teori tegangan geser maksimal. Untuk analisis perancangan akan lebih mudah jika kita menggunakan

tegangan *Von Misses* yaitu : (Persamaan yang berkaitan dengan suatu tegangan dalam tiga sumbu) adalah:

$$\sigma' = \sqrt{\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2}{2}}$$

Hal ini akan terjadi kegagalan jika:

$$\sigma' \geq S_y$$

Dari percobaan – percobaan yang telah dilakukan, menunjukkan bahwa teori energi distorsi (*Von Misses*) memperkirakan kegagalan dengan ketelitian tertinggi pada semua kuadran. [Ref 4]

## 2.4 Perancangan Bejana Tekan

### 2.4.1 Dasar Perancangan Bejana Tekan

Gaya yang diberikan kepada bejana atau struktur yang terdapat pada bejana biasa disebut beban, dan pada setiap desain mekanis, kebutuhan dalam perancangan bejana tekan adalah menentukan nilai beban aktual yang diberikan pada bejana tekan tersebut pada saat kondisi operasi. Hal tersebut dapat ditentukan berdasarkan pengalaman pada masa lampau, kode desain, perhitungan, dan percobaan. Beban utama yang diterima pada bejana tekan tersebut antara lain adalah sebagai berikut,

1. Beban akibat tekanan (internal atau eksternal)
2. Beban mati
3. Beban angin
4. Beban akibat gempa
5. Beban akibat temperatur
6. Beban akibat perpipaan
7. Beban akibat impak

Kombinasi beban tersebut harus diperkirakan kemungkinan yang paling tepat saat menentukan desain bejana tekan agar dapat diperoleh desain yang baik secara ekonomi dan faktor keselamatan.

Secara umum kegagalan dalam bejana tekan dapat ditelusuri menjadi beberapa bagian yaitu,

1. Material bejana tekan, seleksi yang tidak tepat saat menentukan material yang digunakan.
2. Desain bejana tekan, penentuan kondisi desain yang tidak tepat sehingga penentuan dan perhitungan yang dilakukan tidak memadai.
3. Pembuatan atau pembangunan bejana tekan, prosedur yang digunakan tidak tepat, perhatian yang lebih harus diberikan pada hal tertentu. [Ref.1 hal 1]

#### **2.4.2 Tekanan Desain**

Tekanan desain merupakan tekanan yang digunakan dalam penentuan ketebalan dinding bejana tekan, menunjukkan perbedaan antara tekanan internal maupun eksternal, dan penentuan seluruh komponen pada bejana tekan sebagai dasar pemilihannya. Tekanan desain minimum dalam undang-undang bejana tekan tidak hampa adalah 15 psi, sehingga untuk tekanan yang kurang dari nilai tersebut, undang-undang tidak berlaku dalam perancangan. Untuk bejana tekan yang bekerja dalam tekanan negatif, harus menggunakan undang-undang perancangan bejana tekan ruang hampa.

Tekanan izin kerja maksimum berdasarkan undang-undang yang berlaku merupakan tekanan yang bekerja pada alat ukur tekanan pada kondisi operasi dalam temperatur desain. Dasar dari penentuan tekanan izin kerja maksimum adalah ketebalan dinding bejana tekan, termasuk tingkat korosi yang diizinkan, dan ketebalan akibat pembebanan lainnya dalam bejana tekan tersebut.

Penentuan tekanan desain yaitu pemberian tambahan pada tekanan operasi sebesar 10 persen dan penambahan tekanan statis fluida yang bekerja pada bejana tekan tersebut. [Ref.1 hal 2]

#### **2.4.3 Temperatur Desain**

Temperatur desain lebih mengarah kepada kondisi lingkungan apabila dibandingkan dengan beban yang terjadi pada bejana tekan.

karena hanya perubahan suhu yang dikombinasikan dengan beberapa pengendalian pada badan atau gradien suhu tertentu akan berasal tegangan termal. Namun, kondisi desain penting yang mempengaruhi untuk gelar besar yang suitability dari bahan yang dipilih untuk konstruksi. [Ref.1 hal 3]

#### **2.4.4 Beban yang diterima pada Bejana Tekan**

Secara umum beban yang terjadi pada bejana tekan dibagi dalam beberapa bagian, yaitu beban mati, beban angin, dan beban gempa. Beban tersebut akan memberikan pengaruh terhadap bejana tekan karena akan memberikan gaya, tekanan, ataupun momen terhadap bejana tekan itu sendiri, oleh karena itu pemilihan dan perhitungan beban pada bejana tekan sangat penting dalam perancangan bejana tekan karena akan mempengaruhi ketebalan bejana tekan yang berarti akan mempengaruhi biaya konstruksi dari bejana tekan itu sendiri. Berikut penjelasan untuk masing-masing beban yang terjadi pada bejana tekan pada bejana tekan.

##### **2.4.4.1 Beban Mati**

Beban mati yaitu beban yang akibat berat dari bejana tekan itu sendiri dan komponen yang terhubung pada bejana tekan secara permanen. Berdasarkan keadaannya beban mati dapat dibagi menjadi 3 yaitu beban mati kosong, beban mati operasi, dan beban mati *shop test*. Beban mati kosong adalah beban yang diberikan oleh bejana tekan itu sendiri tanpa konten operasi, perpipaan, dan struktur eksternal lainnya. Beban mati operasi yaitu beban mati bejana tekan ditambah dengan beban konten pada saat operasi berupa *tray*, perpipaan, dan struktur eksternal lainnya. Beban mati *shop test* adalah berat bejana tekan itu sendiri terdiri hanya dari bejana tekan yang telah selesai proses pengelasan dan diisi oleh cairan uji. [Ref.1 hal 4]

##### **2.4.4.2 Beban Angin**

Beban angin yaitu beban yang diberikan pada bejana tekan akibat tekanan aliran turbulen yang terjadi pada alam, biasanya arah angin berupa horizontal.

Hubungan antara kecepatan angin dengan tekanan angin saat penampang horizontal melingkar dapat dicari dengan persamaan berikut,

$$P_w = 0,0025 \times V_w^2$$

Dimana,  $P_w$  = Tekanan Angin, lb/ft<sup>2</sup>.

$V_w$  = Kecepatan Angin, mil/jam. [Ref.5 hal 56]

Adapun momen akan timbul pada struktur akibat tekanan dari angin tersebut, untuk mencari nilai momen yang terjadi dapat diperoleh dari persamaan sebagai berikut,

$$M = P_w D H h$$

Dimana,  $M$  = Momen maksimal, lb.in.

$P_w$  = Tekanan Angin, lb/ft<sup>2</sup>

$D$  = Lebar bejana tekan, ft.

$H$  = Tinggi bejana tekan, ft.

$h$  = Panjang lengan, ft. [Ref.5 hal58]

#### 2.4.4.3 Beban Gempa

Beban gempa yaitu gaya akibat gempa yang diterima oleh bejana tekan itu sendiri atau penopangnya berupa getaran tiba-tiba dari permukaan tanah. Tegangan yang terjadi saat gempa berupa dinamis, *transient*, dan kompleks. Untuk menyederhanakan prosedur desain komponen vertikal pergerakan gempa biasanya diabaikan dengan asumsi pada arah vertikal struktur memiliki kekuatan yang cukup untuk menahan pergerakan gempa. [Ref.1 hal 13]

Hal yang perlu diperhatikan dari beban gempa adalah momen yang terjadi pada sambungan *skirt* dengan bejana tekan. Untuk mencari momen akibat angin dapat diperoleh dari persamaan di bawah ini,

$$M_x = \frac{CWX^2(3H - X)}{3H^2}$$

Dimana,  $M_x$  = Momen pada jarak tertentu (X), ft.lb.

$C$  = Faktor gempa.

$W$  = Berat total bejana tekan kondisi operasi, lb.

$X$  = Jarak dari atas *shell* hingga bagian bawah *shell*, ft. [Ref.5 hal 55]

#### 2.4.5 Pengelasan pada Bejana Tekan

Sambungan las pada bejana tekan dikategorikan menjadi beberapa bagian menurut standar ASME Part UW.

- Kategori A

Sambungan berlas *longitudinal* yang berada pada badan utama, ruang hubung, transisi diameter atau nosel; tiap sambungan berlas yang berada pada bejana berbentuk bola, pada *formed head* atau *flat head*, atau pada pelat sisi dari suatu bejana bersisi datar; sambungan berlas melingkar yang menghubungkan *hemisphered head* ke badan utama, ke transisi diameter, ke nosel atau ke ruang hubung.

- Kategori B

Sambungan berlas melingkar yang berada pada badan utama, ruang hubung, nosel, atau transisi diameter termasuk sambungan antara transisi dan silinder baik pada ujung besar maupun ujung kecilnya; sambungan berlas melingkar yang menghubungkan *formed head* selain *hemisphered* ke badan utama, ke transisi diameter, ke nosel atau ke ruang hubung.

- Kategori C

Sambungan berlas yang menghubungkan *flange*, *van stone lap*, dudukan *tube*, atau *flat cover* ke badan utama, ke *formed head*, ke transisi diameter, ke nosel atau ke ruang hubung; tiap sambungan berlas yang menghubungkan satu pelat sisi ke palat sisi lainya dari bejana bersisi datar.

- Kategori D

Sambungan berlas yang menghubungkan ruang hubung atau nosel ke badan utama, ke bejana berbentuk bola, ke transisi diameter, ke head atau bejana bersisi datar, dan sambungan yang menghubungkan nosel ke ruangnya (untuk nosel pada ujung kecil dari transisi diameter, lihat kategori B). [Ref.5 hal 173]

#### 2.5 Komponen Utama Bejana Tekan

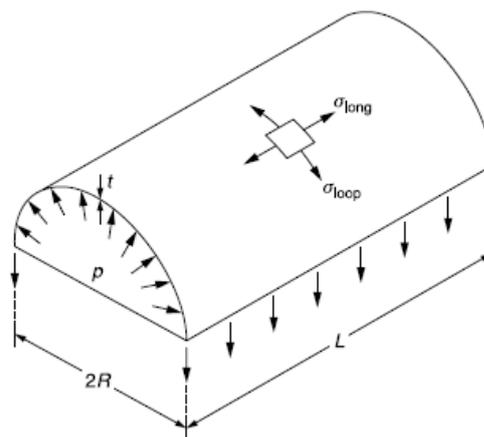
Komponen bejana tekan merupakan bagian pada bejana tekan yang memiliki fungsi masing-masing pada saat beroperasi, komponen utama dalam

bejana tekan antara lain adalah *shell*, *head*, *opening*, *flange*, *skirt*, *anchor bolt*, dan *lifting lug*.

Dalam penentuan komponen tersebut, terdapat hal-hal yang harus diperhatikan dan diperhitungkan, pada dasarnya komponen tersebut disesuaikan berdasarkan kebutuhan seperti tekanan operasi, temperatur, dan kebutuhan perawatan bejana tekan.

### 2.5.1 Shell

*Shell* digunakan dalam industri nuklir, fosil dan petrokimia. Komponen ini juga digunakan dalam penukar panas jenis *shell and tube*. Umumnya bejana tekan dengan tipe ini mudah untuk dibuat, dipasang, dan ekonomis sehingga masih sering dipertahankan. Tegangan yang terdapat pada *shell* bejana tekan dinding tipis tidak memiliki distribusi tegangan sehingga tegangan yang terjadi pada dindingnya dapat dianggap seragam, tegangan yang terjadi pada dinding *shell* bejana tekan dinding tipis dapat dilihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 *Shell* silinder dinding tipis [Ref 6]

Prosedur desain dalam perancangan bejana tekan untuk *shell* yang sebagian besar didasarkan pada asumsi elastis linier, kadang-kadang memungkinkan untuk perilaku inelastik terbatas atas wilayah lokal. Ketebalan *shell* adalah parameter desain utama dan biasanya dikontrol oleh tekanan internal dan terkadang oleh tekanan eksternal yang dapat menghasilkan *buckling*. Beban yang diterapkan juga penting dalam mengontrol ketebalan dan demikian pula diskontinuitas dan tegangan

termal. Dasar ketebalan *shell* didasarkan pada analisis tegangan yang disederhanakan dan tegangan yang diijinkan untuk material konstruksi. Berikut merupakan perhitungan dalam penentuan ketebalan dinding *shell* berdasarkan tekanan internal dan diameter dalam pada bejana tekan. [Ref.6]

Adapun persamaan yang dapat digunakan untuk memperoleh dimensi optimal perbandingan diameter dengan tinggi *shell* adalah sebagai berikut.

$$F = \frac{P}{cSE}$$

Dimana, F = Rasio optimum diameter dengan panjang bejana

P = Tekanan Desain

c = *Corrosion Allowance*

S = Tegangan maksimum yang diijinkan material pada temperatur tertentu

E = Efisiensi sambungan.[Ref.5 hal 272]

Tebal akibat tegangan *circumferential*

$$t = \frac{P R_i}{(SE) - (0.6P)}$$

Tebal akibat tegangan *longitudinal*

$$t = \frac{P R_i}{(2SE) + (0.4 P)}$$

Dimana, t = Tebal, in.

P = Tekanan desain internal, psi.

R<sub>i</sub> = Radius dalam *shell*, in.

S = Tegangan yang diijinkan pada material dalam suhu tertentu, psi.

E = Efisiensi sambungan. [Ref.9 hal 16]

Karena tegangan *circumferential* lebih besar dibanding dengan longitudinal, oleh karena itu pemilihan tebal berdasarkan tebal akibat tegangan *circumferential*.

Bejana tekan harus memiliki kemampuan menahan tekanan eksternal sebesar 15 psi sesuai dengan ketentuan yang telah diberikan, untuk mengetahui besarnya kemampuan dinding menahan tekanan eksternal, persamaan berikut dapat digunakan dengan perbandingan diameter dengan tebal dinding lebih dari 20. [Ref.5 hal 31]

$$P_a = \frac{4B}{3\left(\frac{D_o}{t}\right)}$$

Atau dapat menggunakan persamaan sebagai berikut

$$P_a = \frac{2AE}{3\left(\frac{D_o}{t}\right)}$$

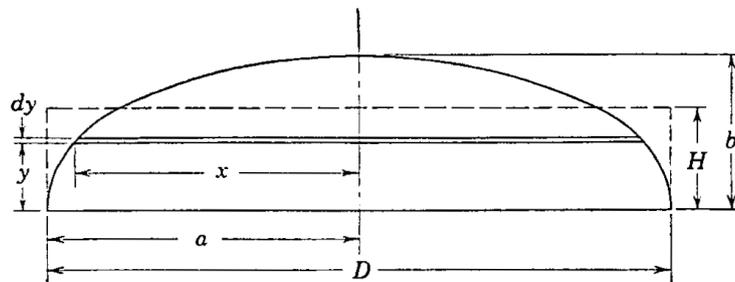
Dimana,  $P_a$  = Tegangan eksternal yang diijinkan, psig.

$D_o$  = Diameter luar, in.

$t$  = Tebal dinding minimum yang dibutuhkan, in. [Ref.5 hal 32]

### 2.5.2 Head

*Head* adalah salah satu bagian penting dalam bejana tekan dan merujuk pada bagian-bagian bejana yang membatasi bagian bawah, atas, dan sisi dari *shell*. Ujung bejana tertutup dengan suatu *head* sebelum menempatkannya ke dalam kondisi operasi.



Gambar 2.6 *Elipsoidal head 2:1* [Ref.6]

Pada Gambar 2.6 merupakan salah satu jenis *head* pada bejana tekan yang sering digunakan yaitu jenis *ellipsoidal 2:1*, memiliki distribusi tegangan yang baik dan bentuk yang baik dalam menempati ruang pada saat operasi.

*Head* biasanya terbuat dari bahan yang sama seperti *shell* dan dapat disambungkan dengan las ke *shell* itu sendiri. Komponen ini juga mungkin terpisahkan dengan *shell* dalam konstruksi cetakan (*cast*) atau tempa (*forged*). Desain geometris *head* tergantung pada geometri *shell* serta parameter desain lainnya seperti temperatur operasi dan tekanan. Ada berbagai macam *head* dalam bejana tekan, berikut beberapa macam *head* serta penentuan ketebalan masing-

masing *head* berdasarkan bentuknya yang dapat dilihat pada Tabel 2.1 di bawah ini.  
[Ref.6]

Tabel 2.1 Tabel perhitungan ketebalan pada *head* berdasarkan jenisnya

Tipe <i>head</i>	Rumus perhitungan ketebalan (t)
<i>Hemi-sphere</i>	$\frac{P R_i}{(2SE) - (0.2 P)}$
<i>Elipsoidal</i>	$\frac{P D_i K}{(2SE) - (0.2 P)}$
<i>Torispherical</i>	$\frac{P L_i M}{(2SE) - (0.2 P)}$

Dimana, t = Tebal *head*, in.

P = Tekanan desain internal, psi.

R<sub>i</sub> = Radius dalam *head*, in.

D<sub>i</sub> = Diameter dalam *head*, in.

S = Tegangan yang diijinkan pada material dalam suhu tertentu, psi.

E = Efisiensi sambungan

K, M = Koefisien

L<sub>i</sub> = Radius *crow*n, in. [Ref.9 hal 16]

Untuk menentukan kemampuan menahan tekanan eksternal pada *head* bejana tekan, persamaan berikut dapat digunakan,

$$P_a = \frac{B}{\frac{R_o}{t}}$$

Untuk mencari faktor B, harus mencari faktor A terlebih dahulu dengan menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$A = \frac{0.125}{\left(\frac{R_o}{t}\right)}$$

Atau dapat menggunakan persamaan sebagai berikut,

$$P_a = \frac{0.0625E}{\left(\frac{R_o}{t}\right)^2}$$

Dimana,  $R_o$  = Radius luar *head*, in  
 $E$  = Modulus elastisitas material, psi.[Ref.5 hal 34]

### 2.5.3 *Opening*

*Opening* di bejana tekan di daerah *shell* atau *head* diperlukan untuk melayani tujuan-tujuan berikut:

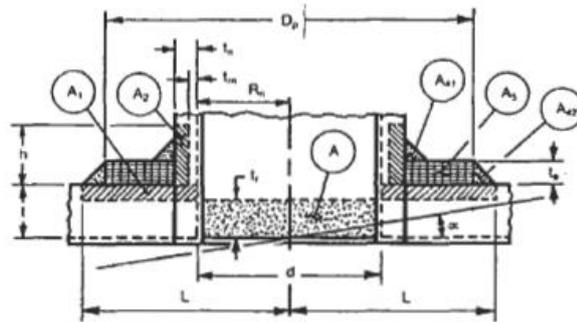
- *Manway* karena membiarkan personil masuk dan keluar dari bejana untuk melakukan pemeliharaan rutin dan perbaikan.
- Lubang (*drain*) untuk menguras atau membersihkan bejana tekan.
- *Handhole* bukaan untuk memeriksa bejana dari luar
- Nosel yang melekat pada pipa untuk meneruskan fluida kerja di dalam dan di luar bejana tekan.

Untuk semua bukaan, walupun nosel mungkin tidak memerlukan. Dalam beberapa kasus, nosel dan pipa yang melekat pada bukaan, sementara dalam kasus lain mungkin ada penutup *manway* atau pelat penutup *handhole* yang dilas atau disambungkan dengan baut ke daerah bukaan. Nosel atau lubang mungkin mengalami tekanan internal atau eksternal, bersama beban yang berasal dari peralatan dan perpipaan karena ekspansi perbedaan temperatur dan sumber lainnya.

Desain *opening* dan nosel didasarkan pada dua pertimbangan:

- Membran stres utama dalam bejana harus berada dalam batas yang ditetapkan oleh tegangan tarik yang diijinkan.
- Tegangan puncak harus dijaga dalam batas yang dapat diterima untuk memastikan memuaskan kelelahan hidup.

Karena penghilangan bahan pada lokasi *opening*, ada bagian yang melemah pada *shell*. Jumlah penurunan kekuatan tentu saja tergantung pada diameter, jumlah, dan sejauh mana lubang diberi jarak satu sama lain. [Ref.6]



Gambar 2.7 *Opening* pada bejana tekan [Ref.9 hal 77]

Untuk menentukan suatu *opening*, pada dasarnya luas penampang yang diambil, harus dapat diganti dengan luas penampang bagian yang ditambah ketebalannya. Hal tersebut, dapat dilihat pada Gambar 2.7 di atas, dimana  $A$  merupakan luas penampang yang hilang, sehingga harus dapat diganti dengan penjumlahan  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $A_{21}$ ,  $A_3$ , dan  $A_{42}$  yang merupakan luas penampang yang dibuat sebagai pengganti luas tersebut. Berikut merupakan persamaan yang digunakan untuk menentukan besarnya dimensi besarnya *reinforcement* yang akan digunakan pada *opening* seperti pada Tabel 2.2 di bawah ini.

Tabel 2.2 Perhitungan *reinforcement* pada *opening*

Ketebalan	Area required	Area available
$t_r = (PR)/(SE - (0.6P))$	$A = d \times t_r$	$A_1 = (t - t_r)d$
$t_{rn} = (PR)/(SE - (0.6P))$		$A_1 = (t - t_r)(t_n + t)2$
		$A_2 = (t_n - t_{rn})5t_n$
		$A_{21} = A_{42} = l^2 f_r$
		$A_3 = (D_p - d - 2t_n)t_e f_r$

[Ref.5 hal132]

Dimana,  $A$  = Luas yang dibutuhkan,  $\text{in}^2$ .

$A_1$  = Luas yang terdapat pada *shell*,  $\text{in}^2$ .

$A_2$  = Luas yang terdapat pada nosel,  $\text{in}^2$ .

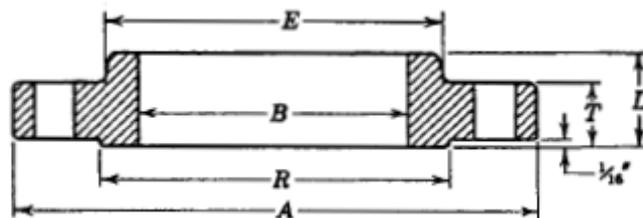
$A_{21}$  = Luas pada pengelasan,  $\text{in}^2$ .

$A_3$  = Luas *reinforcement* plat,  $\text{in}^2$ .

- $A_{42}$  = Luas pada pengelasan, in<sup>2</sup>.  
 $d$  = Diameter nosel, in.  
 $t$  = Tebal *shell* yang digunakan, in.  
 $t_r$  = Tebal *shell* yang dibutuhkan, in.  
 $t_n$  = Tebal nosel yang digunakan, in.  
 $t_{rn}$  = Tebal nosel yang dibutuhkan, in.  
 $l$  = Panjang kaki pengelasan, in.  
 $f_r$  = Faktor reduksi kekuatan.  
 $D_p$  = Diameter luar *reinforcement* plat, in. [Ref.12. hal 529]

#### 2.5.4 Flange

*Flange* merupakan komponen yang diberikan pada bejana tekan sehingga komponen yang dihubungkan dapat dilepas dan dipasang pada saat pemeliharaan. Selain itu *flange* juga digunakan dalam menghubungkan perpipaan yang terdapat pada instalasi bejana tekan. Desain *flange* telah dibuat secara standar dengan ketentuan tertentu seperti ASA (*American Standards Association*) B 16.5-1953. Berikut merupakan salah satu konstruksi sebuah *flange* dapat dilihat pada Gambar 2.8 ini.

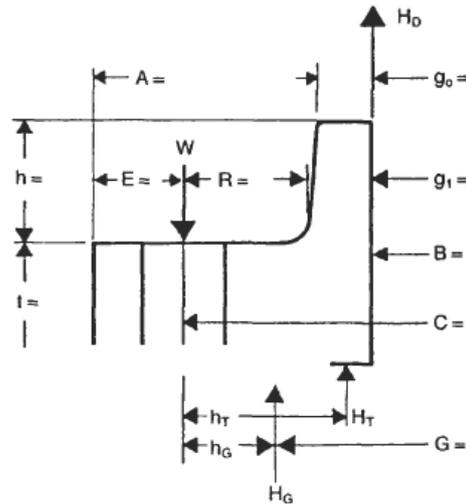


Gambar 2.8 Slip on flange [Ref.2 hal 222]

Pada Gambar 2.8 *flange* tersebut merupakan jenis *slip on flange*, yaitu *flange* yang sering digunakan karena mudah dalam proses pemasangan dan biaya yang kecil. Selain jenis tersebut, ada pula beberapa jenis *flange* yang tersedia yaitu tipe *welding neck flange*, *lap joint flange* dan *blind flange*. [Ref.2 hal 219]

Hal yang perlu diperhatikan pada perancangan *flange* adalah besarnya momen yang timbul akibat berat dan tekanan internal dari bejana tekan tersebut.

Pada Gambar 2.9 di bawah ini dapat dilihat momen yang timbul akibat beban dan lengan pada *flange* dengan tipe *slip-on*.



Gambar 2.9 Dimensi dan beban pada *slip-on flange* [Ref.9 hal 41]

Dari gambar 2.9 tersebut, dapat diketahui bahwa terdapat momen pada permukaan *flange*. Momen tersebut dapat dicari setelah dimensi dari *flange* diketahui dengan pemilihan sesuai akan kebutuhan saat operasi. Untuk mencari momen pada *flange* dapat diperoleh dari persamaan pada Tabel 2.3 di bawah ini,

Tabel 2.3 Tabel perhitungan momen pada *flange*

Perhitungan Beban Awal	Beban Total	Lever Arm	Momen
$H_p = 2b\pi GmP$	$H_D = \frac{\pi B^2 P}{4}$	$h_D = R + (0.5g_1)$	$M_D = H_D \times h_D$
$H = \frac{G^2 \pi P}{4}$	$H_G = W_{m1} - H$	$h_G = 0.5(C - G)$	$M_G = H_G \times h_G$
$W_{m1} = H_p + H$	$H_T = H - H_D$	$h_T = 0.5(R + g_1 + h_G)$	$M_T = H_T \times h_T$
			$M_O = M_D + M_G + M_T$

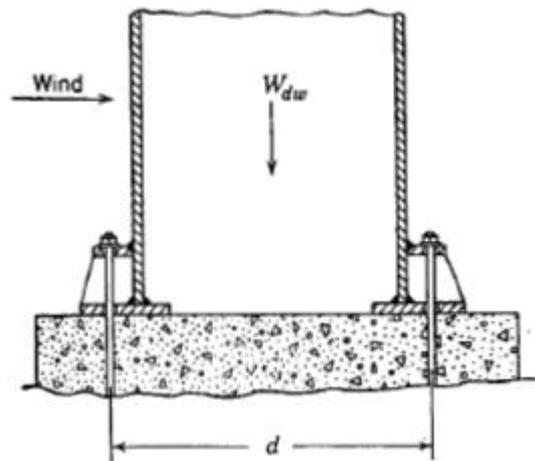
[Ref.9 hal 41]

Dimana,	$M_O$ = Momen total operasi pada <i>flange</i> , lb.in.
	$M_D$ = Momen akibat gaya dalam pada <i>flange</i> , lb.in.
	$M_G$ = Momen akibat beban pada <i>gasket</i> , lb.in.
	$M_T$ = Momen akibat tekanan pada permukaan <i>flange</i> , lb.in.
	$H$ = Beban akibat hidrostatis, lb.
	$H_D$ = Beban akibat gaya dalam <i>flange</i> , lb.
	$H_G$ = Beban <i>gasket</i> , lb.
	$H_P$ = Beban tekan total permukaan kontak sambungan, lb.
	$H_T$ = Beban akibat tekanan pada permukaan <i>flange</i> , lb.
	$h_D$ = Jarak radial, in.
	$h_G$ = Jarak radial, in.
	$h_T$ = Jarak radial, in.
	$R$ = Jarak radial, in.
	$P$ = Tekanan desain, psi.
	$b$ = Lebar efektif <i>gasket</i> , in.
	$B$ = Diameter dalam <i>flange</i> , in.
	$C$ = Diameter antara baut, in.
	$g_1$ = Tebal <i>hub</i> pada <i>flange</i> , in.
	$G$ = Diameter reaksi beban <i>gasket</i> , in.
	$m$ = Faktor <i>gasket</i> , in.
	$W_{m1}$ = Beban yang dibutuhkan baut saat operasi, lb. [Ref.9 hal 37]

### 2.5.5 Penopang pada Bejana Tekan

Penopang bejana ini dimaksudkan untuk mendukung bejana tekan pada *support base*. Penopang harus dirancang untuk menahan bobot mati dan beban angin dari bejana tekan dan untuk membatasi aliran panas dari dinding bejana ke dasar. Struktur penopang bejana tekan harus mampu menahan bobot mati bejana dan internal dan cairan yang terkandung tanpa mengalami deformasi permanen. Temperatur logam dari bejana tekan biasanya berbeda dengan kondisi sekitar selama instalasi. Perbedaan perpindahan antara penopang karena perubahan temperatur harus dipertimbangkan dalam desain. Dalam sejumlah besar kasus desain

membutuhkan kecukupan penopang untuk beroperasi dalam lingkungan termal ekstrim selama operasi normal maupun untuk mempertahankan beberapa transien termal. Sumber lain pembebanan termal muncul dari ekspansi termal dari pipa melekat pada bejana. Desain oleh karena itu harus mempertimbangkan berbagai kombinasi beban pipa di bejana untuk menentukan kombinasi beban paling berat. Selain itu bejana juga dikenakan beban mekanik karena aksi dari percepatan gempa pada pipa terpasang. Dalam bejana tekan besar yang berisi cairan, efek hidrostatis juga dipertimbangkan. Akhirnya, beban akibat penanganan selama instalasi harus dipertimbangkan dalam desain. [Ref.6]



Gambar 2.10 Skirt support

Banyak bejana tekan vertikal menggunakan penopang jenis *skirt*, seperti pada Gambar 2.10 di atas, penopang ini merupakan perpanjangan dari *shell* dan disambung menuju base ring sehingga dapat menahan bejana tekan vertikal.

Ketebalan *skirt* dipengaruhi oleh momen yang terjadi pada sambungan antara *shell* dengan *skirt*. Untuk mengetahui ketebalan *skirt* yang dibutuhkan, maka dapat dicari dengan persamaan sebagai berikut,

$$t = \frac{12M_T}{R^2\pi SE} + \frac{W}{D\pi SE}$$

Dimana,  $t$  = Tebal *skirt*, in

$E$  = Efisiensi sambungan pada *skirt* dengan *head* (0.6 untuk *butt weld* dan 0.45 untuk *lap weld*)

$M_T$  = Momen pada *skirt* dengan sambungan *head*, ft.lb

D = Diameter luar *skirt*, in.

R = Radius luar dari *skirt*, in

S = Tegangan maksimum yang diijinkan material pada temperatur tertentu, psi

W = Berat dari bejana tekan dalam kondisi operasi, lb [Ref. 5 hal 76]

## 2.6 Metode Elemen Hingga

### 2.6.1 Pengenalan Metode Elemen Hingga

Metode elemen hingga merupakan salah satu cara dalam menyelesaikan masalah yang terdapat di alam dengan solusi numerik. Biasanya kejadian di alam dapat dijelaskan dalam persamaan baik itu dalam bentuk differensial atau integral. Karena alasan tersebut metode elemen hingga menjadi salah satu cara dalam menyelesaikan bentuk differensial parsial dan integral. Umumnya metode elemen hingga memungkinkan pengguna untuk mendapatkan evolusi dalam ruang atau waktu dari satu atau lebih variabel yang mewakili dari suatu sistem fisik.

Bila mengacu pada analisa struktur, metode elemen hingga merupakan metode yang baik dalam menghitung *displacement*, tegangan, dan regangan pada suatu struktur dalam pembebanan tertentu. [Ref.10 hal 1]

Metode elemen hingga membagi (diskrit) struktur menjadi kecil tetapi terbatas, yang didefinisikan dengan baik, substruktur elastic (elemen). Dengan menggunakan fungsi polynomial dan dengan operasi matriks, perilaku elastis setiap elemen terus menerus dikembangkan dalam hal material elemen dan sifat geometris. Beban dapat diterapkan dalam elemen (gravitasi, dinamis, termal, dll), pada permukaan elemen, atau di nodal elemen. Nodal elemen adalah yang mengatur dasar elemen, karena nodal di elemen menghubungkan elemen unsur lain, dimana sifat elastis dari elemen yang akhirnya perhatikan, jika kondisi batas yang ditetapkan, dan akhirnya diterapkan. Sebuah node memiliki derajat kebebasan. Derajat kebebasan adalah gerak translasi dan rotasi independen yang ada di nodal. Sebagian besar, nodal dapat memiliki tiga gerak translasi dan tiga gerak rotasi dari derajat kebebasan. Setelah setiap elemen dalam struktur didefinisikan secara lokal dalam bentuk matriks, kemudian elemen disatukan secara global melalui node

mereka ke dalam sistem matriks secara keseluruhan. Kemudian penerapan beban dan kondisi batas ditentukan melalui operasi matriks, nilai dari semua perpindahan derajat kebebasan tidak diketahui sehingga harus ditentukan. Setelah hal itu dilakukan, hal ini menjadi masalah sederhana untuk menggunakan perpindahan dalam menentukan regangan dan tegangan di dalam persamaan konstitutif melalui elastisitas.

Metode elemen hingga adalah metode numerik domain diskritisasi dari struktur secara berkelanjutan sehingga kesalahan pun mungkin terjadi. Kesalahannya yaitu :

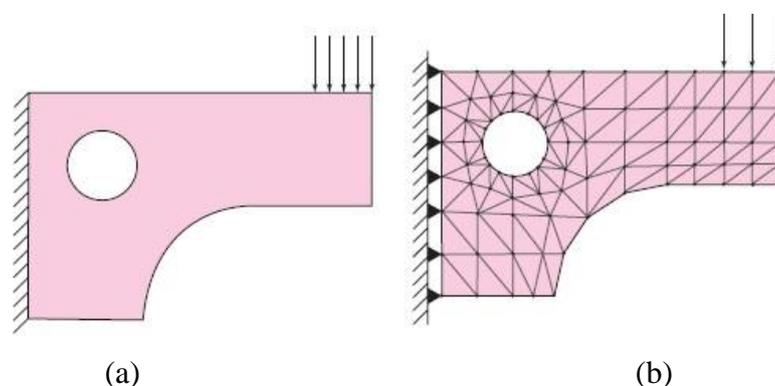
#### 1. Kesalahan komputasi

Kesalahan ini adalah karena perhitungan komputer dan formulasi dari skema integrasi numerik yang digunakan. Untuk tujuan komersial kebanyakan kode batasan elemen adalah berkonsentrasi pada pengurangan dalam kesalahan ini dan akibatnya analisis umumnya berkaitan dengan diskritisasi faktor.

#### 2. Kesalahan diskritisasi

Geometri dan distribusi perpindahan struktur yang sebenarnya terus menerus bervariasi. Menggunakan jumlah elemen terbatas untuk model struktur dapat menerangkan kesalahan dalam pencocokan geometri dan distribusi perpindahan karena keterbatasan matematika yang melekat pada elemen.

Berikut ini adalah contoh kesalahan dalam diskritisasi dengan ketebalan yang konstan pada struktur plat tipis ditunjukkan pada Gambar 2.11 (a) dan (b) :



Gambar 2.11 (a) Pemberian beban pada suatu plat, (b) Model elemen hingga

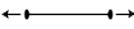
Elemen struktur dimodelkan dengan elemen hingga dengan menerapkan tiga nodal, tegangan bidang, elemen segitiga sederhana. Tipe elemen tersebut

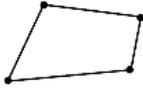
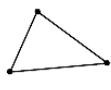
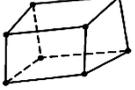
memiliki lubang dengan dua masalah dasar. Elemen yang memiliki sisi lurus tetap lurus setelah deformasi. Regangan seluruh bidang (*plane stress*) elemen segitiga adalah konstan. Masalah pertama, geometri dimodelkan dengan kurva lengkung tepi. Catatan bahwa model permukaan dengan besar kelengkungan terlihat kurang dimodelkan, sedangkan permukaan lubang tampaknya cukup dimodelkan. Masalah kedua, yang jauh lebih parah, adalah bahwa regangan di berbagai daerah struktur sebenarnya berubah dengan cepat, dan konstanta elemen regangan hanya akan memberikan perkiraan dari regangan rata-rata di tengah elemen. Jadi secara singkatnya, hasil diprediksi model ini akan sangat kurang. Hasilnya dapat ditingkatkan secara signifikan dengan meningkatkan jumlah elemen (kerapatan mesh) atau menggunakan elemen yang lebih baik, seperti segiempat delapan nodal, yang lebih cocok untuk aplikasi ini, sehingga akan memberikan peningkatan hasil. Karena interpolasi fungsi orde tinggi yaitu delapan nodal elemen segiempat dapat dimodelkan lengkung tepi dan menyediakan fungsi tingkat tinggi untuk distribusi regangan. [Ref.3 hal 955-957].

### 2.6.2 Geometri Elemen

Banyak bentuk geometris elemen yang digunakan dalam analisis elemen hingga untuk aplikasi tertentu. Berbagai elemen yang digunakan dalam *software FEM* komersial umumnya membentuk kesepakatan kode sebagai referensi seperti perpustakaan kode elemen. Elemen dapat ditempatkan dalam kategori berikut: elemen garis, elemen permukaan, elemen solid, dan elemen tujuan khusus. Tabel 2.4 menyajikan beberapa tipe elemen hingga dalam analisa struktur :

Tabel 2.4 Tipe elemen dalam metode elemen hingga

Tipe Elemen	Nama	Bentuk	Jumlah Nodal	Aplikasi
Garis	<i>Truss</i>		2	Batang ditekan atau ditarik.
	<i>Beam</i>		2	Tekuk

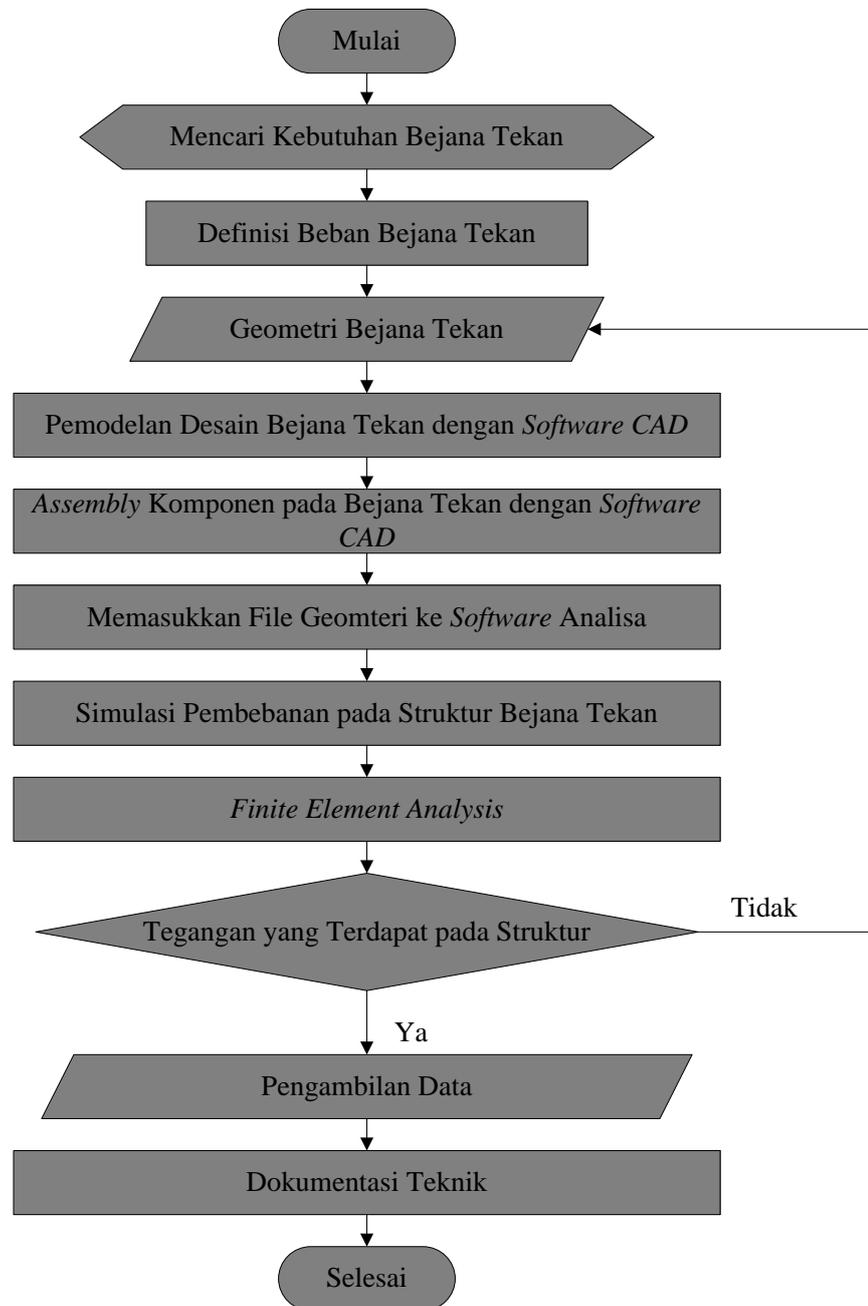
	<i>Frame</i>		2	Aksial, puntiran, tekuk, dengan atau tanpa beban kekauan.
Permukaan	<i>4-node quadrilateral</i>		4	Tegangan/regangan bidang, <i>axisymetry</i> , <i>shear panel</i> , tekuk pada plat tipis datar.
	<i>8-node quadrilateral</i>		8	Tegangan/regangan bidang, tekuk pada plat tipis atau <i>shell</i> .
	<i>3-node triangular</i>		3	Tegangan/regangan bidang, <i>axisymetry</i> , <i>shear panel</i> , tekuk pada plat tipis datar, bila mungkin, pemakaian elemen <i>quad</i> lebih diutamakan, digunakan untuk transisi.
	<i>6-node triangular</i>		6	Tegangan/regangan bidang, <i>axisymetriy</i> , tekuk pada plat tipis atau <i>shell</i> , bila mungkin, pemakaian elemen <i>quad</i> lebih diutamakan, digunakan untuk transisi.
Solid	<i>8-node hexagonal (brick)</i>		8	Solid, plat tebal.
	<i>3-node tetrahedron (tet)</i>		3	Solid, plat tebal, untuk transisi.
Tujuan Khusus	<i>Gap</i>		2	Bebas perpindahan untuk pendefinisian beda tekanan.
	<i>Hook</i>		2	Bebas perpindahan untuk pendefinisian beda perluasan ( <i>extension</i> ).

[Ref.3 hal 958]

## BAB III METODOLOGI

### 3.1 Bagan Pemodelan Perancangan Bejana Tekan

Berikut adalah diagram alir perancangan, pembentukan geometri, pemodelan, dan analisa bejana tekan.



Gambar 3.1 Diagram alir perancangan dan analisa bejana tekan

Dari Gambar 3.1, dapat diketahui bahwa terdapat tiga tahapan dalam perancangan bejana tekan yaitu, perancangan bejana tekan dan pembentukan geometri, pemodelan bejana tekan, dan analisa tegangan pada bejana tekan.

Bejana tekan yang dibuat, merupakan bejana tekan tipe vertikal, sedangkan berdasarkan proses yang terjadi, bejana tekan tersebut merupakan tipe *scrubber*. *Scrubber* merupakan suatu alat proses untuk menjernihkan gas yang masih berupa dua fasa, tetapi kandungan kondensat ataupun fluida cair di dalamnya memiliki volume yang kecil. Dari proses yang terjadi, maka dapat dirancang suatu bejana tekan tipe vertikal berdasarkan tekanan operasi, temperatur operasi, dan kapasitasnya.

Untuk pemodelan bejana tekan, *software* yang digunakan yaitu *SolidWork 2010* sedangkan untuk menganalisa tegangan pada bejana tekan, digunakan *ANSYS Workbench 12*. Analisa yang dilakukan merupakan analisa jenis struktur statis, sehingga tekanan dan gaya yang terdapat di dalam bejana tekan tersebut dianggap tanpa perubahan.

### **3.2 Penentuan Geometri Bejana Tekan**

Geometri bejana tekan dapat ditentukan mulai dari *shell* hingga komponen lainnya, dengan pertimbangan tekanan dan temperatur desain bejana tekan itu sendiri, sedangkan kapasitas dari bejana tekan akan menentukan panjang dan diameter dari bejana tekan.

#### **3.2.1 Penentuan Dimensi Awal bejana Tekan**

Dari kebutuhan bejana tekan tersebut, maka tekana desain dan temperatur desain dapat diketahui berdasarkan tekanan dan temperatur operasi bejana tekan. Tekanan dan temperatur operasi bejana tekan yaitu 105 psi dan 150 F. Dengan besar tekanan dan temperatur awal bejana tekan seperti itu, maka tekanan desain dapat diperoleh dari penambahan tekanan desain sebesar 10 %, sehingga diperoleh tekanan desain sebesar 116 psi. sedangkan besarnya temperatur desain yaitu 200 F diperoleh dari penambahan temperatur operasi dengan konstanta tambahan sebesar 50 F.

Setelah tekanan dan temperatur desain ditentukan, geometri awal bejana tekan dapat ditentukan, selain itu kapasitas bejana tekan tersebut diperhatikan sehingga diperoleh bejana tekan yang memiliki volume pelat yang optimal. Variabel yang dicari yaitu diameter dalam awal dengan tinggi awal bejana tekan. Untuk mencari ukuran optimalnya, dapat menggunakan persamaan sebagai berikut.

Dengan menggunakan persamaan tersebut, maka rasio optimum dapat diperoleh. Material yang digunakan adalah baja karbon tipe SA 516 70, material ini dipilih dengan pertimbangan temperatur desain dari bejana tekan tersebut, memiliki tegangan maksimum yang diijinkan sebesar 17500 psi, *corrosion allowance* yang digunakan sebesar 0.125", dengan asumsi pertumbuhan korosi sebesar 0.125" per 12 tahun. Efisiensi sambungan yang digunakan adalah 1, karena bejana tekan tersebut mengandung sulfur saat operasi yang membahayakan keselamatan, sehingga kebocoran gas harus dihindari, oleh karena itu pemilihan efisiensi sambungan ini diperlukan.

$$\begin{aligned} F &= \frac{P}{CSE} \\ &= \frac{116}{0.125 \times 17500 \times 1} \\ &= 0.05 \end{aligned}$$

Dengan semua faktor yang telah ditentukan, maka besarnya rasio dapat diperoleh sebesar 0.05, faktor ini digunakan untuk menentukan diameter bejana tekan menggunakan grafik , dan diperoleh diameter awal sebesar 76", dengan persamaan volume tabung sederhana maka panjang bejana tekan dapat diperoleh yaitu sebesar 298".

### 3.2.2 Penentuan Dimensi *Shell* dan *Head* berdasarkan Tekanan Internal

Dimensi *shell* dan *head* merupakan hal yang paling penting dalam menentukan ketebalan dindingnya, karena komponen ini akan menjadi tumpuan beban internal maupun beban yang dihasilkan dari komponen lainnya. Tebal yang digunakan berdasarkan tegangan *circumferential* bejana tekan, karena tegangan yang terjadi lebih besar, sehingga ketebalan yang dipilih akan lebih tebal dibandingkan dengan arah *longitudinal*. *Head* yang dipilih yaitu tipe *ellipsoidal 2:1*.

Dengan persamaan yang telah diberikan dari bab sebelumnya, maka ketebalan dinding *shell* dan *head* dapat ditentukan sebagai berikut.

$$t_{shell} = \frac{116 \times 38}{(17500 \times 1) - (0.6 \times 116)}$$

$$t_{shell} = 0.252''$$

$$t_{head} = \frac{116 \times 76}{(2 \times 17500 \times 1) - (0.2 \times 116)}$$

$$t_{head} = 0.252''$$

Dari persamaan tersebut, diperoleh besarnya ketebalan dinding dari *shell* dan *head* dari bejana tekan tersebut yaitu sebesar 0.252".

### 3.2.3 Penentuan Dimensi *Shell* dan *Head* berdasarkan Tekanan Eksternal

Setelah memperoleh ketebalan dinding bejana tekan, maka ketebalan tersebut diperiksa dengan beban eksternal untuk menghindari kemungkinan buckling dari bejana tekan tersebut. Selain itu prosedur pengecekan tekanan eksternal merupakan hal yang perlu dilakukan berdasarkan peraturan *ASME BPV Division I Section VIII*.

Bejana tekan harus memiliki kemampuan menahan tekanan eksternal sebesar 15 psig sesuai dengan ketentuan yang telah diberikan, berikut merupakan perhitungan kemampuan bejana tekan untuk menahan beban tekanan eksternal. Hal pertama yaitu mencari perbandingan  $L/D_o$  dan  $D_o/t$ . Diketahui bahwa bejana tekan yang dirancang memiliki  $L$  sebesar 310.670",  $D_o$  sebesar 76.504", dan  $t$  awal sebesar 0.252". Sehingga perbandingan tersebut diperoleh sebagai berikut,

$$L/D_o = \frac{310.670''}{76.504''}$$

$$= 4.060$$

$$D_o/t = \frac{76.504''}{0.252''}$$

$$= 303.508$$

Setelah mengetahui perbandingan tersebut, dapat diperoleh faktor A dari grafik 2 pada lampiran sebesar 0.000058. Setelah faktor A diketahui, maka Pa dapat dicari, dengan modulus elastisitas material (E) sebesar  $29 \times 10^6$  psig,

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{2AE}{3\left(\frac{D_o}{t}\right)} \\ &= \frac{2 \times 0.000058 \times 29 \times 10^6}{3 \times 303.508} \\ &= 3.69 \text{ psig} \end{aligned}$$

Karena besarnya tekanan untuk menahan tekanan eksternal masih di bawah 15 psig, maka digunakan dua buah *stiffening ring* dan penebalan pada dinding menjadi 0.312". *Stiffening ring* yang digunakan memiliki dimensi lebar 6" dan tebal 0.5", dan diletakkan dengan jarak 100" dari ujung atas dan ujung bawah pada *shell*. Dari peletakkan *stiffening ring* tersebut, maka nilai L menjadi 105.330", yang diperoleh dari jarak *stiffening ring* dengan sepertiga head bejana tekan. Sehingga perhitungan dapat dilakukan lagi untuk menentukan kemampuan bejana untuk menahan tekanan eksternal sebagai berikut,

$$\begin{aligned} L/D_o &= \frac{105.330''}{76.625''} \\ &= 1.37 \\ D_o/t &= \frac{76.625''}{0.312''} \\ &= 245.2 \end{aligned}$$

Setelah mengetahui perbandingan tersebut, dapat diperoleh faktor A dari grafik 2 pada lampiran sebesar 0.00023. Setelah faktor A diketahui, maka Pa dapat dicari, dengan modulus elastisitas material (E) sebesar  $29 \times 10^6$  psi,

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{2AE}{3\left(\frac{D_o}{t}\right)} \\ &= \frac{2 \times 0.00023 \times 29 \times 10^6}{3 \times 245.2} \\ &= 18.13 \text{ psig} \end{aligned}$$

Dari perhitungan yang dilakukan, diperoleh besarnya tekanan eksternal yang mampu ditahan oleh bejana tekan tersebut sebesar 18.13 psig, sehingga melebihi tekanan eksternal minimum, maka bejana tekan tersebut memerlukan dua buah *stiffening ring* dengan ukuran tebal 0.5" dan panjang 6", penggunaan ini dilakukan agar tekanan eksternal yang diijinkan dapat melebihi tekanan eksternal minimal.

*Head* pada bejana tekan juga dilakukan perhitungan tersebut, dengan  $D_o$  sebesar 76.625", tebal 0.312" dan  $R_o$  sebesar 68.962", berikut merupakan perhitungan kemampuan bejana tekan untuk menahan tekanan eksternal,

$$\begin{aligned} A &= \frac{0.125}{\left(\frac{R_o}{t}\right)} \\ &= \frac{0.125}{\left(\frac{68.962''}{0.312}\right)} \\ &= 0.000056 \end{aligned}$$

Karena faktor A berada di sebelah kiri dari garis untuk menentukan faktor B, maka persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut untuk menentukan  $P_a$ ,

$$\begin{aligned} P_a &= \frac{0.0625E}{\left(\frac{R_o}{t}\right)^2} \\ &= \frac{0.0625 \times 29 \times 10^6}{\left(\frac{68.962''}{0.312''}\right)^2} \\ &= 37 \text{ psig} \end{aligned}$$

Dengan perhitungan yang dilakukan, diperoleh kemampuan untuk menahan bejana tekan pada *head* adalah sebesar 37 psig, yang berarti lebih besar dari tekanan eksternal minimal, sehingga tebal bejana tekan yang dibutuhkan sebesar 0.312" dengan penambahan faktor korosi sebesar 0.125" maka tebal yang digunakan adalah sebesar 0.437" atau 7/16".

### 3.2.4 Perhitungan Pembebanan

Ada beberapa beban yang diterima oleh bejana tekan, selain beban tekanan internal yang telah ditentukan yaitu beban tekan akibat angin, dan beban momen

pada *flange* akibat berat dari *flange* itu sendiri dan tekanan internal operasi bejana tekan. Beban angin dapat dicari dengan mengetahui besarnya kecepatan angin yang terjadi pada suatu daerah, kecepatan angin yang terjadi di wilayah Indonesia adalah sebesar 3.1-34.2 mil/jam yang diperoleh dari BMKG. Dari data tersebut maka dapat dicari besarnya tekanan eksternal akibat angin tersebut sebagai berikut,

$$\begin{aligned}
 P_w &= 0,0025 \times V_w^2 \\
 &= 0,0025 \times 34.2^2 \text{ mil/jam} \\
 &= 2.92 \text{ lb/ft}^2 \\
 &= 0.020 \text{ psi}
 \end{aligned}$$

Momen yang terdapat pada *flange* juga dapat ditentukan dengan mengetahui dimensi dan faktor pada *flange* yang telah ditentukan dengan data yang diperoleh dari tabel 4,5,6,7 dan 8 pada lampiran, seperti pada Tabel 3.1 di bawah ini,

Tabel 3.2 Dimensi dan faktor pada *flange*

<b>Flange</b>	<b>B</b>	<b>g<sub>1</sub></b>	<b>b</b>	<b>R</b>	<b>C</b>	<b>G</b>	<b>m</b>
2	2.440	0.311	0.630	0.938	4.750	2.736	2.750
6	6.720	0.421	1.060	1.125	9.500	7.165	2.750
12	12.880	0.748	1.370	1.250	17.000	13.410	2.750
14	14.140	0.805	1.370	1.375	18.750	14.668	2.750
18	18.180	0.848	2.060	1.500	22.750	18.885	2.750

Setelah mengetahui dimensi dan faktor yang diperlukan, maka perhitungan dapat dilakukan dengan memasukkan besarnya nilai tersebut ke dalam persamaan perhitungan pada Tabel 3.2 di bawah ini.

Tabel 3.2 Tabel perhitungan momen pada *flange*

<b>Perhitungan Beban Awal</b>	<b>Beban Total</b>	<b>Lever Arm</b>	<b>Momen</b>
$H_P = 2b\pi GmP$	$H_D = \frac{\pi B^2 P}{4}$	$h_D = R + (0.5g_1)$	$M_D = H_D \times h_D$
$H = \frac{G^2 \pi P}{4}$	$H_G = W_{m1} - H$	$h_G = 0.5(C - G)$	$M_G = H_G \times h_G$
$W_{m1} = H_P + H$	$H_T = H - H_D$	$h_T = 0.5(R + g_1 + h_G)$	$M_T = H_T \times h_T$
		$M_O = M_D + M_G + M_T$	

Dengan memasukkan nilai pada Tabel 3.1 ke dalam perhitungan pada Tabel 3.2 maka akan diperoleh besarnya momen pada setiap *flange* sesuai dengan ukurannya. Berikut merupakan hasil perhitungan momen pada setiap *flange* yang diberikan pada Tabel 3.3 di bawah ini.

Tabel 3.3 Momen pada setiap *flange*

<b>Flange</b>	<b>Momen Total (M<sub>O</sub>) lbf.in</b>
2	4227.246
6	24019.223
12	92998.781
14	117454.491
18	213600.215

### 3.2.5 Rancangan Bejana Tekan

Setelah ketebalan dinding dari bejana tekan tersebut ditentukan, komponen lainnya dalam bejana tekan dapat ditentukan. Dengan pertimbangan tekanan maupun temperatur desain dari bejana tekan itu sendiri, dari pemilihan komponen komponen tersebut maka diperoleh spesifikasi teknis bejana tekan sebagai berikut :

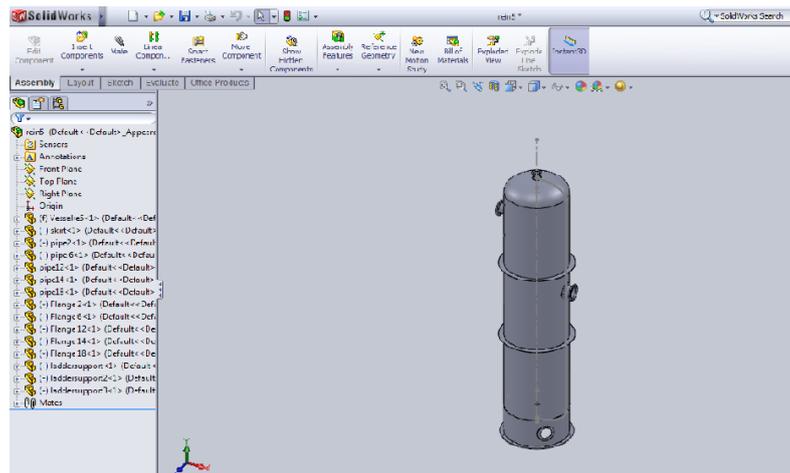
### Spesifikasi Bejana Tekan

- Kapasitas = 800 ft<sup>3</sup>
- Diameter dalam = 76"
- Tinggi = 353"
- Tipe *Head* = 2:1 Elipsoidal Head, tebal = 0.4375"
- *Shell* = Tinggi 298", tebal = 0.4375"
- Jumlah *Opening* = 5 (2", 6", 12", 14", 18")
- Jumlah *Flange* = 5 tipe slip on 150 lb
- *Lifting Lug* = 2 buah
- *Ladder Support* = 3 pasang
- *Support* = Skirt, tebal 0.4375"  
Base ring, tebal 1"  
Anchor Bolt 12 buah, ukuran 2"

### 3.3 Pemodelan Bejana Tekan dengan *Software CAD*

Untuk melakukan analisa metode elemen hingga, maka diperlukan pemodelan bejana tekan yang akan dianalisa menggunakan *software CAD*, sehingga memudahkan dan menyederhanakan dalam pemodelan bejana tekan tersebut.

Pemodelan geometri bejana tekan menggunakan *SolidWork 2010*, bejana tekan tersebut, dibuat dalam beberapa komponen, komponen yang dibuat itu antara lain adalah bejana tekan, pipa pada *opening*, *flange*, dan *skirt*. Setelah semua komponen itu dibuat, maka komponen tersebut akan disatukan menjadi satu komponen utuh untuk kemudian dianalisa dengan menggunakan *ANSYS Workbench 12*. Komponen tersebut dibuat secara *solid* dan di-*import* ke dalam software analisa dengan kondisi batas yang telah ditentukan.

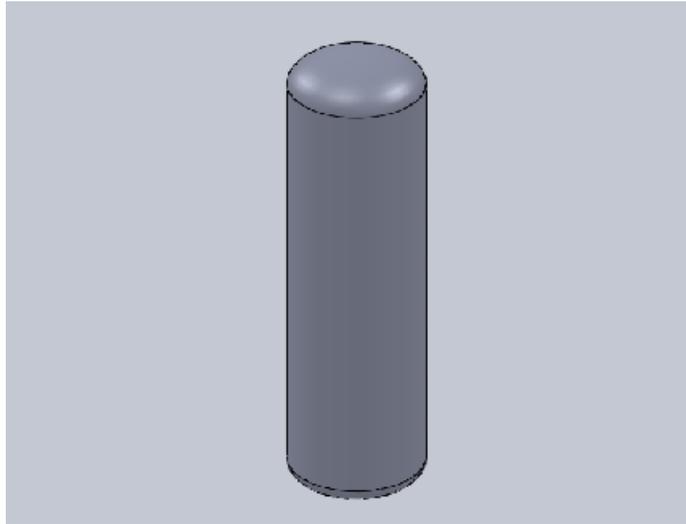


Gambar 3.2 Pemodelan bejana tekan keseluruhan

Pada Gambar 3.2 dapat dilihat bahwa bejana tekan tersebut telah dimodelkan secara keseluruhan komponennya yang telah disatukan. Pemodelan bejana tekan tersebut dibuat secara *solid* karena terdapat perbedaan yang sangat signifikan antara tebal dengan tinggi maupun dimensi lainnya dari bejana tekan tersebut, selain itu terdapat pula penebalan pada bagian tertentu yang lebih memungkinkan memodelkan bejana tekan tersebut secara *solid*. Pemodelan ini penting karena akan menentukan analisa yang akan dilakukan selanjutnya.

### 3.3.1 Pemodelan Bejana Tekan

Dalam pemodelan dengan *software SolidWork* hal awal yang pertama yang dilakukan yaitu dengan memilih membuat *part design*. Setelah itu, dapat memulai menggambar dengan memilih bidang yang digunakan, dan memilih *sketch* untuk memulai gambar. Setelah menggambar bentuk bejana tekan tersebut, hasil gambar dibentuk dengan *feature revolve*. Hasil pemodelan bejana tekan awal dapat dilihat dari Gambar 3.3 berikut.



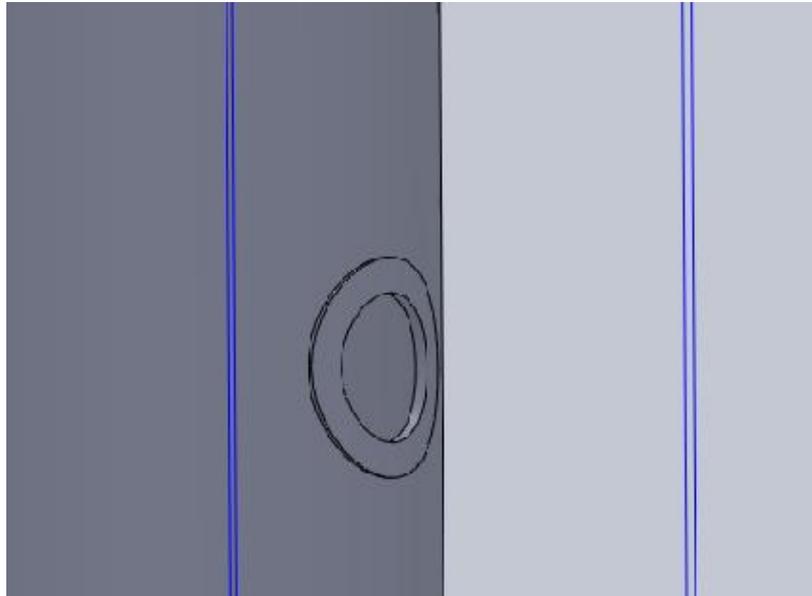
Gambar 3.3 Bejana tekan awal

Dari Gambar 3.3 tersebut bejana tekan telah terbentuk tanpa komponen lainnya yang terdapat pada bejana tekan tersebut. Jadi dalam membuat bejana tekan berupa silinder dengan tutupnya hal yang perlu dilakukan adalah menentukan dimensi lalu menggunakan *feature revolve* untuk membentuk bejana tersebut.

Setelah bejana tekan tersebut selesai, lalu hal berikutnya yang perlu dilakukan adalah membuat lubang pada bejana tekan tersebut dengan penebalan pada sekitar lubang tersebut. Penebalan tersebut dibuat untuk mengurangi tegangan yang terjadi pada lubang yang dibuat, sehingga kekuatan disekitar lubang dapat meningkat.

Untuk membuat lubang, hal awal yang dilakukan adalah menentukan bidang untuk menggambar, setelah bidang ditentukan, lalu buat lubang dengan diameter yang telah ditentukan. Apabila lubang telah sesuai posisi dan diameternya, maka pembuatan lubang dapat dibuat dengan *feature* bantuan *cut-extrude*. Setelah lubang dibuat, maka hal selanjutnya yang perlu dilakukan adalah menebalkan bagian sekitar lubang tersebut. Hal yang dilakukan untuk membuat penebalan bagian tersebut yaitu memilih bidang untuk menggambar, setelah itu membuat bentuk penebalan yaitu lingkaran dengan diameter luar dan dalam. Setelah gambar dibuat, maka langkah selanjutnya adalah menggunakan *feature extrude*, pilih *menu offset from surface*, lalu berikan ketebalannya dan pilih permukaan yang dijadikan

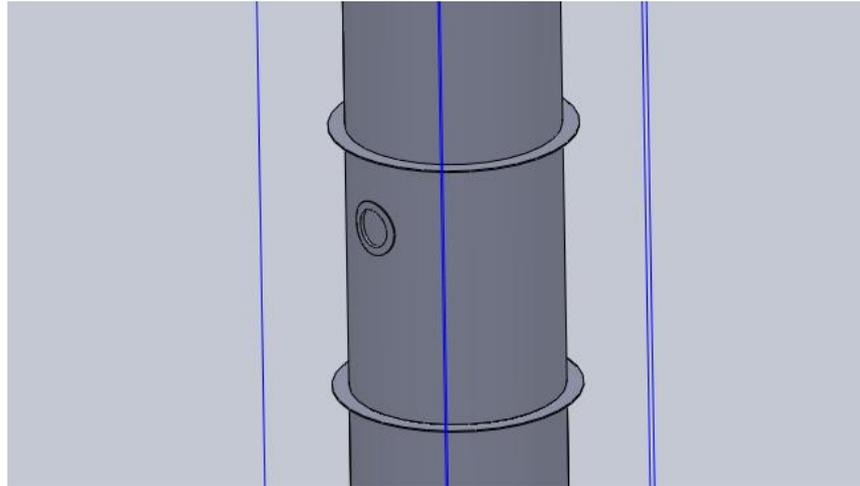
bidang acuan. Hasil pembuatan lubang dan penebalan pada bejana tekan tersebut dapat dilihat pada Gambar 3.4 di bawah ini.



Gambar 3.4 Pembuatan lubang dan penebalan pada bagian sekitarnya

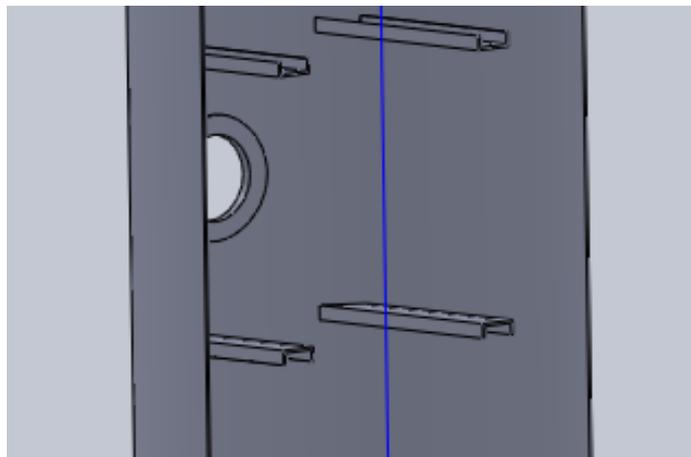
Dari Gambar 3.4 dapat dilihat lubang pada bejana tekan serta penebalannya, langkah tersebut diulang untuk membuat seluruh lubang yang dibuat pada bejana tekan tersebut.

Hal yang dibuat selanjutnya yaitu membuat *stiffening ring* yaitu geometri yang dibuat sebagai syarat untuk menahan bejana tekan tersebut atas tekanan eksternal. Langkah yang dilakukan untuk membuat geometri tersebut adalah memilih bidang untuk menggambar, membuat gambar persegi panjang dengan jarak yang sama dengan radius bejana tekan. Setelah gambar tersebut selesai, hal selanjutnya yang dilakukan yaitu menggunakan *feature revolve*, dengan membuat garis sumbu perputaran terlebih dahulu, sehingga gambar tersebut dapat dibuat sesuai dengan bentuk aslinya dan berputar mengelilingi bejana tekan tersebut.



Gambar 3.5 Pembuatan *stiffening ring* pada bejana tekan

Pada Gambar 3.5 dapat dilihat hasil pembuatan *stiffening ring* bejana tekan yang sesuai melingkar yang berfungsi untuk menguatkan struktur bejana tekan tersebut dari tekanan eksternal.

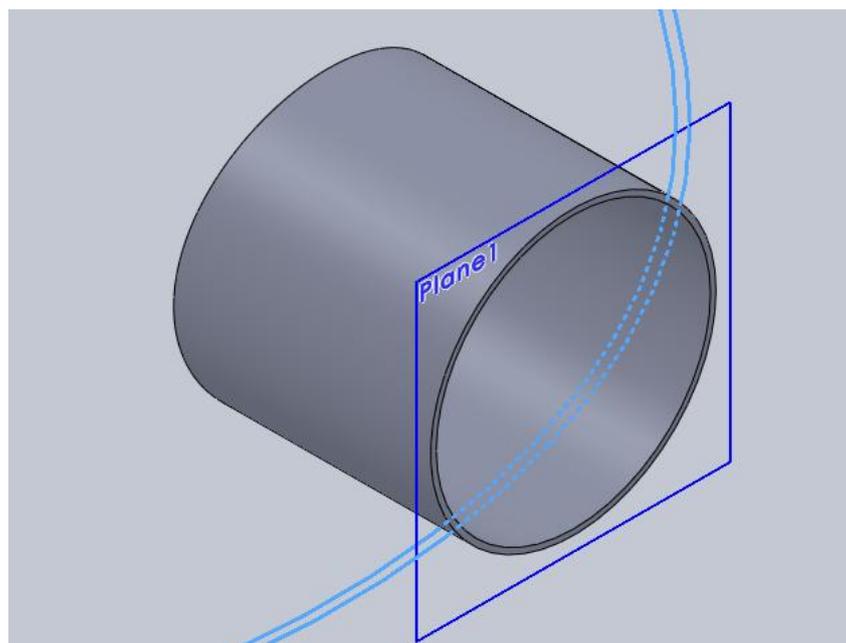


Gambar 3.6 Pemodelan *tray support*

Pada Gambar 3.6 dapat dilihat bahwa terdapat suatu penopang untuk komponen yang akan digunakan pada bejana tekan tersebut. Untuk membuat komponen tersebut yaitu *tray support*, hal yang dilakukan yaitu memilih bidang untuk menggambar, untuk memudahkan saat menggambar, pilih menu *section view* untuk membelah bejana tekan tersebut. Gambar pada bidang yang ditentukan, lalu gunakan *feature extrude*, setelah itu pilih menu *up to surface*, pilih permukaan dalam bejana tekan tersebut.

### 3.3.2 Pemodelan Pipa

Untuk memodelkan pipa pada bejana tekan, hal yang pertama dilakukan adalah memilih bidang untuk membuat lingkaran dan memiliki ketebalan yang sama dengan bejana tekan. Gambar tersebut lalu dibuat menjadi bentuk solid dengan *feature extrude*. Setelah geometri tersebut terbentuk, lalu memilih bidang yang lain untuk menggambar pipa dengan ketebalan yang telah ditentukan. Sebelum menggambar, buat sebuah bidang baru dengan jarak tertentu untuk menggambar pipa tersebut, setelah gambar dibuat dengan yaitu berupa dua buah lingkaran, maka hal yang dilakukan adalah menggunakan *feature extrude*, pilih menu *up to surface*, dan pilih permukaan dalam geometri awal yang telah dibentuk. Setelah pipa terbentuk, buat lubang dalam dinding dengan menggunakan *feature extrude cut*. Setelah lubang terbentuk, hal terakhir yang perlu dilakukan adalah menghilangkan geometri awal yang dibuat sebagai alat bantu dalam membentuk pipa tersebut. Hal pertama yang dilakukan yaitu menggambar sebuah bentuk yang besar dan lingkaran dengan diameter luar pipa, lalu gunakan *feature extrude cut* untuk menghilangkan geometri awal.

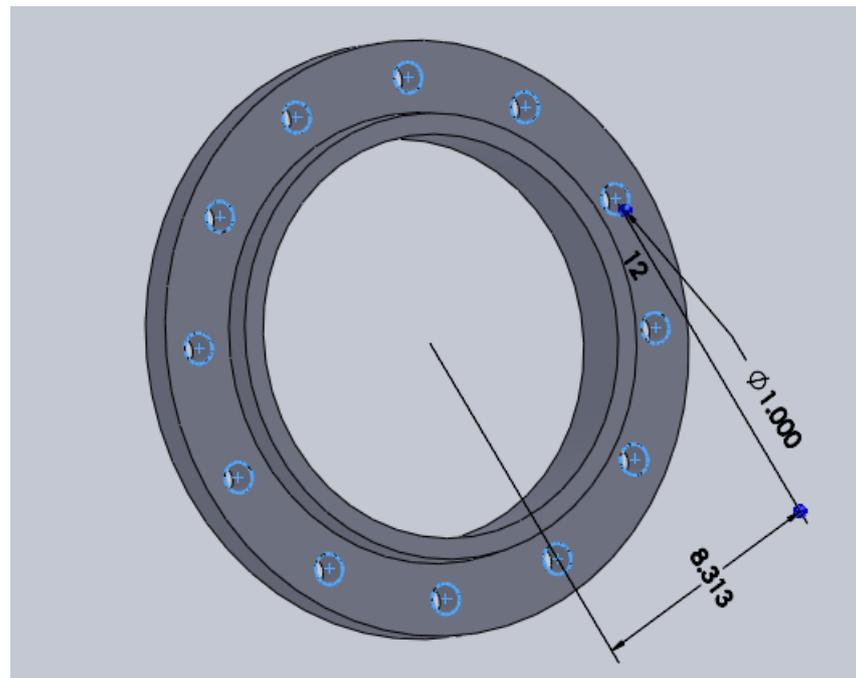


Gambar 3.7 Pemodelan pipa

Pada Gambar 3.7 dapat dilihat geometri pipa yang telah selesai dibuat, setelah selesai membuat pipa tersebut, lalu buat pipa selanjutnya dengan langkah yang sama.

### 3.3.3 Pemodelan *Flange*

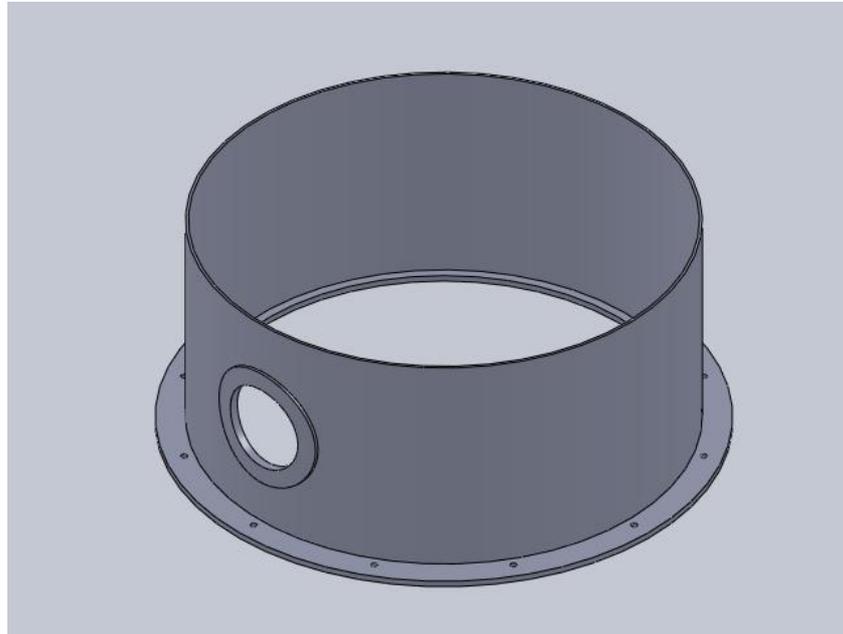
Dalam pemodelan *flange*, hal pertama yang dilakukan adalah memilih bidang yang akan digunakan, lalu buat gambar berupa potongan *flange*, setelah gambar tersebut dibuat, buat sebuah garis sumbu yang akan dijadikan acuan saat membentuk gambar tersebut menjadi bentuk geometri 3 dimensi, setelah gambar dibentuk dengan dimensi tertentu, pilih *feature revolve*, pilih garis sumbu sebagai acuan, lalu revolve sebesar  $360^\circ$  sehingga gambar yang telah dibuat dapat menjadi suatu geometri solid. Setelah geometri terbentuk, gambar lingkaran pada titik untuk membentuk lubang untuk baut. Setelah lingkaran dibuat dengan jarak tertentu, pilih *feature extrude cut* untuk membuat lubang, setelah lubang terbentuk, buat garis sumbu, dan pilih *feature circular pattern* untuk membuat lubang dibagian lainnya dengan besar sudut dan jumlah lubang yang ditentukan. *Flange* yang telah selesai dibuat akan terlihat pada Gambar 3.8 di bawah ini.



Gambar 3.8 Pemodelan *flange*

### 3.3.4 Pemodelan *Skirt*

Dalam pemodelan *skirt*, langkah pemodelan yang dilakukan sama dengan pemodelan pada *flange*. Geometri *skirt* yang telah dibuat dapat dilihat pada Gambar 3.9 di bawah ini.

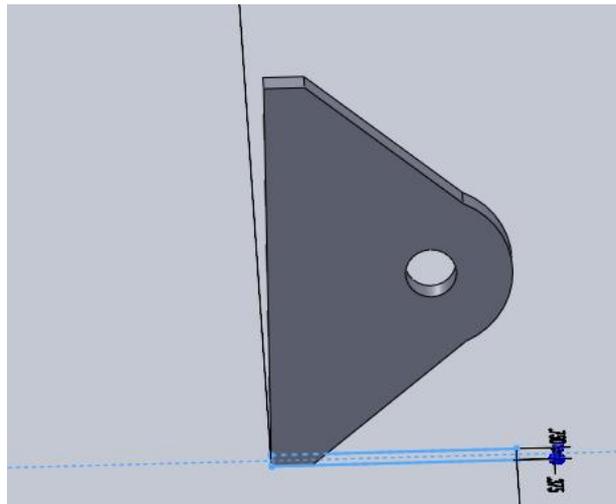


Gambar 3.9 Pemodelan *skirt*

Pada Gambar 3.9 di atas terdapat lubang dengan penebalan untuk menguatkan struktur dinding *skirt* itu sendiri, cara membuat lubang maupun penebalan sama dengan pemodelan lubang dan penebalan pada bejana tekan yang telah dijelaskan sebelumnya.

### 3.3.5 Pemodelan *Lifting Lug*

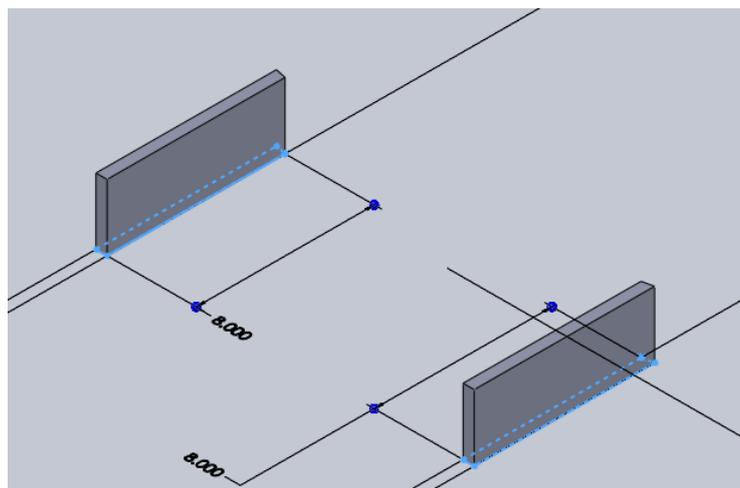
Untuk membuat komponen *lifting lug*, hal yang dilakukan hampir sama dengan pada saat pembuatan pipa, dengan ketentuan yang sama, gambar lingkaran sebagai geometri acuan, lalu buat bentuk komponen di luar permukaan lingkaran, lalu buat bentuk berupa kotak, lalu *extrude* gambar yang telah dibuat dengan panjang tertentu, apabila telah menjadi sebuah pelat, gambar pelat tersebut, lalu gunakan perintah *extrude cut* untuk menghilangkan bagian yang tidak digunakan. Pemodelan *lifting lug* dapat dilihat pada Gambar 3.10 di bawah ini.



Gambar 3.10 Pemodelan *lifting lug*

### 3.3.6 Pemodelan *Ladder Support*

Dalam membuat *ladder support* hal yang dilakukan sama dengan pemodelan *lifting lug*, langkah langkah yang dilakukan sama tanpa memerlukan perintah *extrude cut*. Hasil yang telah selesai dibuat dapat dilihat pada Gambar 3.11 di bawah ini.



Gambar 3.11 Pemodelan *ladder support*

### 3.3.7 Penggabungan seluruh Komponen Bejana Tekan

Setelah seluruh konstruksi dimodelkan dalam beberapa komponen, maka hal selanjutnya yang perlu dilakukan adalah menggabungkan komponen tersebut

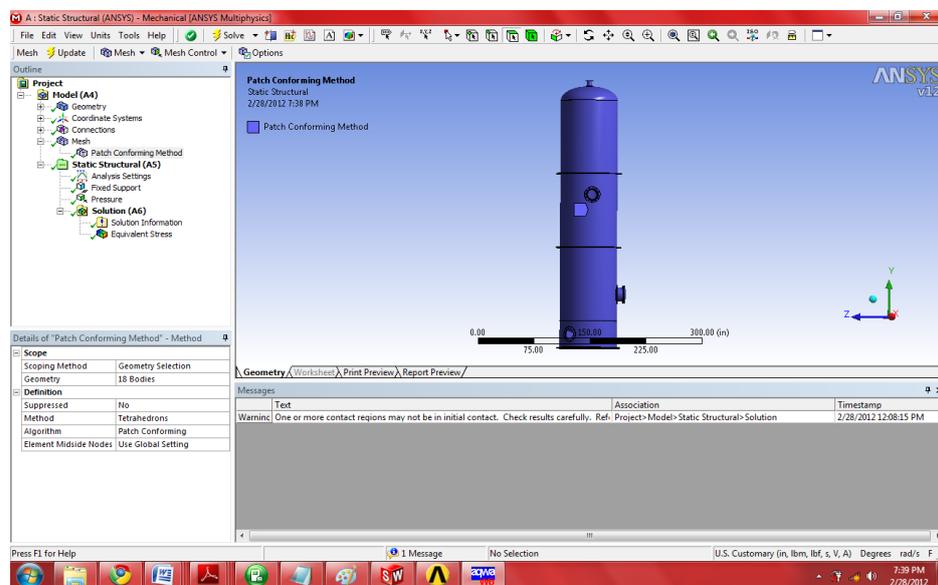
menjadi satu bagian utuh. Untuk selanjutnya dianalisa dengan *software ANSYS* untuk diketahui tegangan yang terjadi pada bagian bagian bejana tekan tersebut dan dapat mengetahui tegangan kritis yang muncul untuk kemudian dilakukan perbaikan geometri agar bejana tekan tersebut layak digunakan pada saat operasi.

Untuk menggabungkan seluruh komponen tersebut, langkah awal yang perlu dilakukan adalah memilih *menu assembly* pada *SolidWork*, selanjutnya pilih *insert geometry* dan pilih bejana tekan sebagai komponen awal yang dimasukkan untuk disesuaikan titik pusatnya, sehingga memudahkan pada saat analisa selanjutnya. Setelah dimasukkan, pilih komponen lainnya, dan gabungkan seluruh komponen sesuai dengan letaknya.

### 3.4 Pemodelan Pembebanan pada Bejana Tekan

#### 3.4.1 Import model CAD pada Software Analisa

Hal awal yang dilakukan untuk menganalisa bejana tekan yang telah dibuat dan dimodelkan dalam *software CAD*, untuk memasukkan bentuk ini pilih *menu import*, pilih geometri yang telah dibuat. Setelah geometri tersebut dimasukkan, buka geometri tersebut dengan *software analisa* untuk menyesuaikan dan memeriksa bentuk keseluruhan geometri.



Gambar 3.12 Tampilan pada *software analisa*

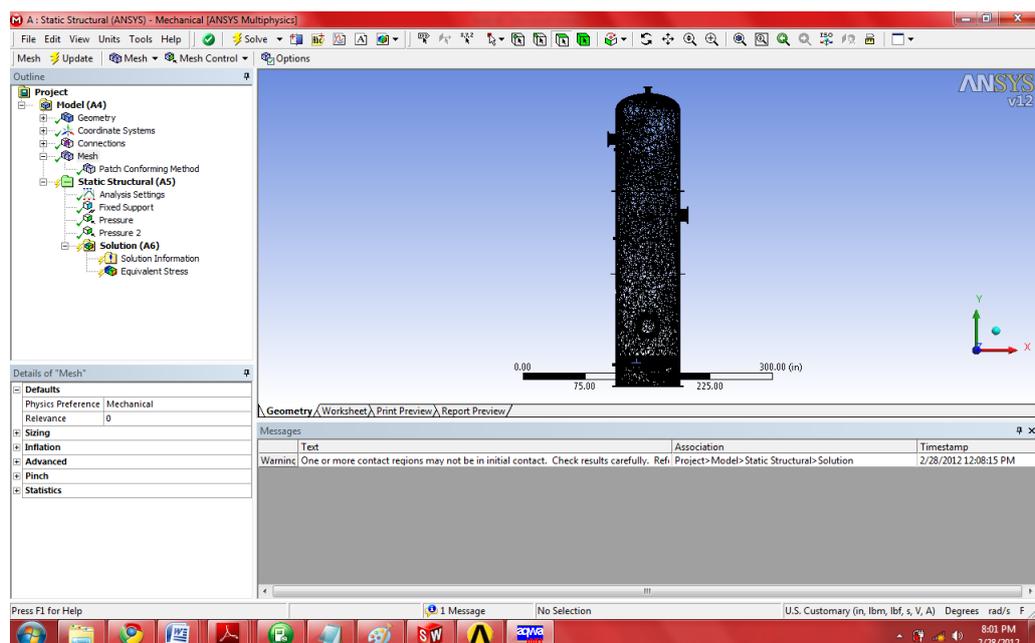
Pada Gambar 3.12 dapat dilihat tampilan pada *software* analisa yang akan menganalisa tegangan pada bejana tekan tersebut. Hal yang perlu diperhatikan setelah memasukkan model tersebut adalah pemilihan satuan pada *software* analisa tersebut.

Perintah: *import* > pilih geometri, kemudian untuk memberikan skala: *unit* > pilih satuan *U.S customary*.

### 3.4.2 Preprocessing

Ada tiga bagian proses dalam analisa metode elemen hingga pada suatu *software* analisa, yaitu *preprocessing*, solusi, *postprocessing*. Dalam *preprocessing* ini beberapa hal ditentukan untuk menentukan pembagian elemen, pemilihan elemen yang digunakan atau sebagai dasar yang akan menjadi landasan dasar dalam proses selanjutnya untuk memberikan beban dan hasil berupa tegangan.

Hal yang ditentukan pada *preprocessing* ini antara lain yaitu pemilihan jenis elemen. Elemen yang digunakan untuk melakukan analisa tegangan pada bejana tekan digunakan elemen tipe tetrahedral.



Gambar 3.13 Bejana tekan setelah dilakukan proses *meshing*

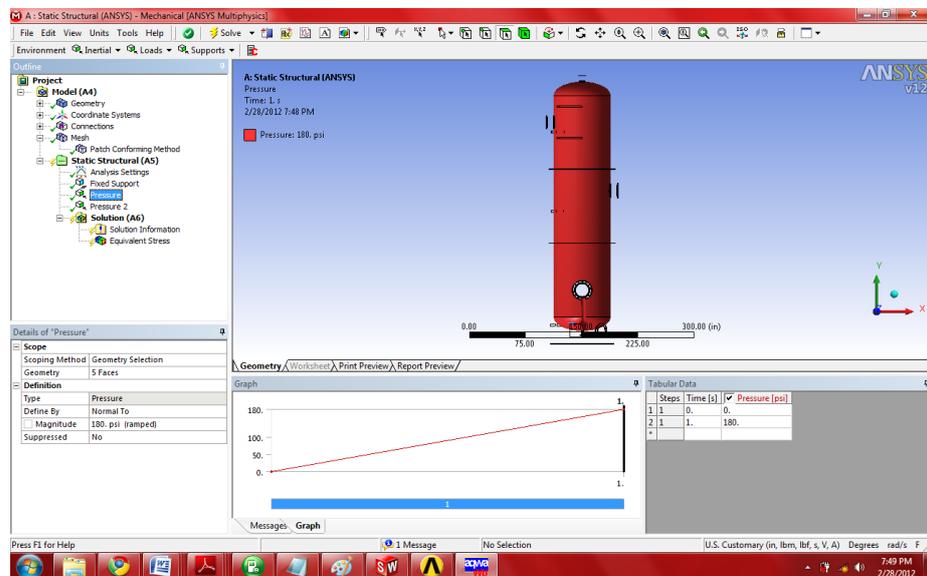
Dari Gambar 3.13 dapat dilihat pembagian elemen yang telah dilakukan dengan penggunaan elemen tetrahedral. Elemen yang telah dipilih akan membagi

menjadi elemen kecil untuk selanjutnya dilakukan proses perhitungan pada *software* tersebut. Langkah yang dilakukan untuk menentukan elemen tersebut antara lain yaitu,

Perintah: *mesh > mesh method*, kemudian untuk menentukan elemen: *method >* pilih elemen *tetrahedron*

### 3.4.3 Solusi

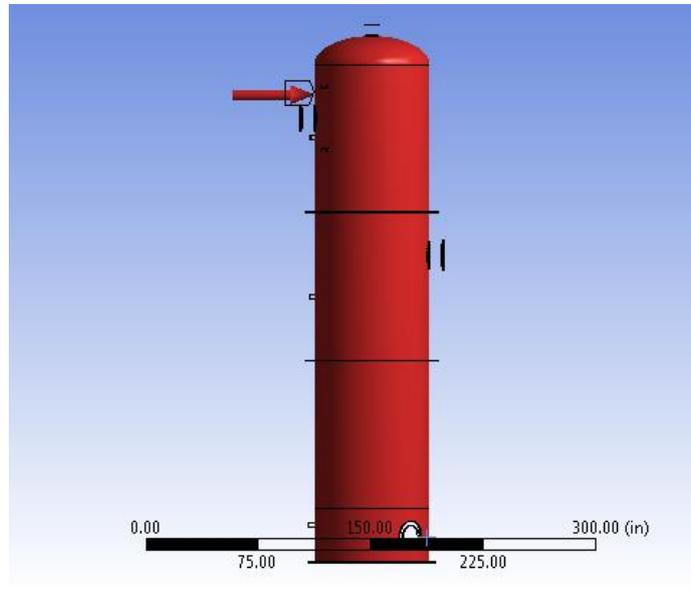
Pada bagian ini, pembebanan yang diberikan pada bejana tekan ditentukan, selain pembebanan, derajat kebebasan yang menjadi suatu batasan atau *constrain* ditentukan sehingga terdapat permukaan acuan yang tidak bergerak.



Gambar 3.14 Pemberian beban tekanan internal pada bejana tekan

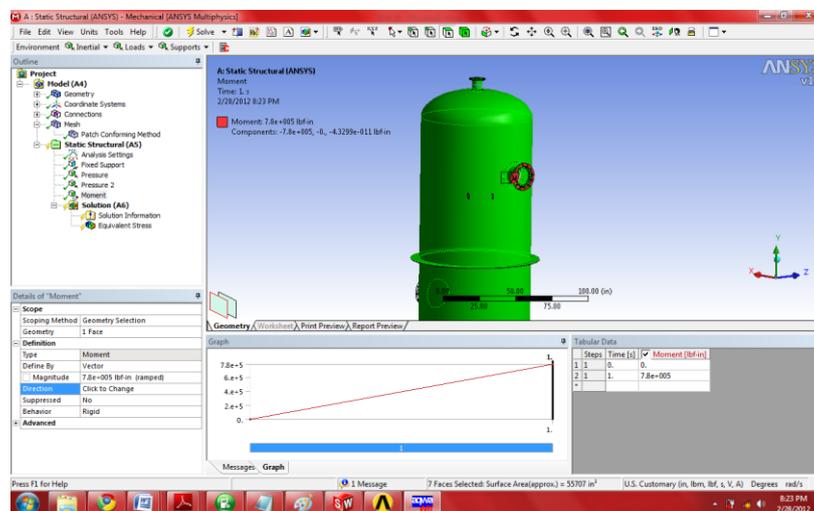
Pada Gambar 3.14 dapat dilihat pembebanan tekanan yang diberikan pada bejana tekan tersebut. Selain pemberian beban tekanan, beban lainnya juga diberikan pada bejana tekan tersebut antara lain yaitu beban akibat angin, beban momen pada *flange*, gaya yang diberikan pada permukaan yang menjadi penopang dan pembebanan pada bejana tekan berdasarkan berat bejana itu sendiri untuk mengetahui kestabilan bejana tekan tersebut. Untuk memberikan beban tekanan hal yang dilakukan adalah,

Perintah: *static structural > load > pressure*, kemudian untuk menentukan besarnya tekanan: *magnitude >* ketik besarnya tekanan yang diinginkan (operasi 116 psi)



Gambar 3.15 Pembebanan angin pada bejana tekan

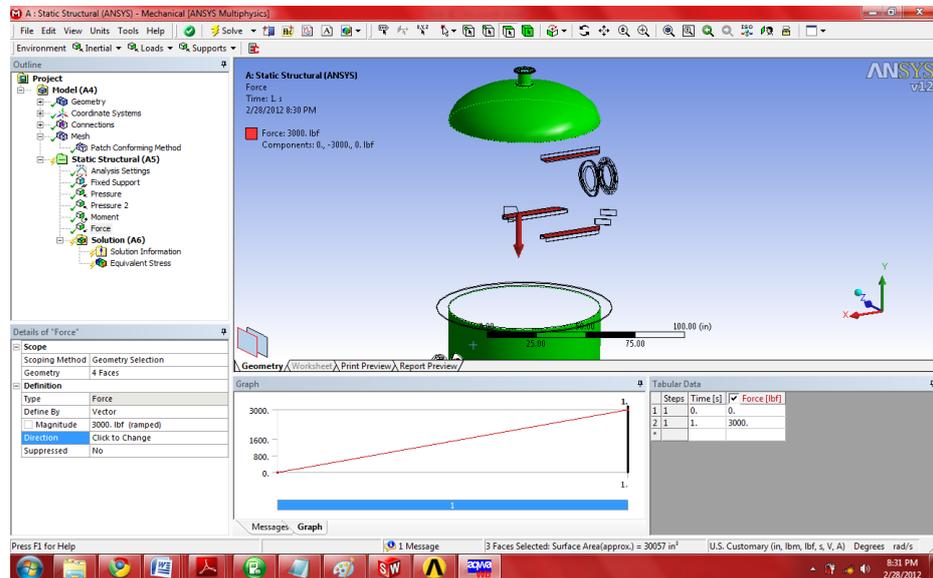
Pada Gambar 3.15 dapat dilihat pembebanan yang diberikan akibat angin, angin dalam pemodelan ini diasumsikan berupa tegangan dengan mengkonversikan nilai kecepatan menjadi tekanan. Berikut cara untuk memberikan beban angin, Perintah: *static structural* > *load* > *pressure*, kemudian untuk menentukan besarnya tekanan: *magnitude* > ketik besarnya tekanan yang diinginkan (tekanan angin 0.020 psi)



Gambar 3.16 Pembebanan momen pada flange

Pada Gambar 3.16 dapat dilihat pemberian beban momen pada *flange*, untuk menentukan besarnya momen dan pembebanan momen hal yang dilakukan antara lain adalah sebagai berikut,

Perintah: *static structural > load > moment*, kemudian untuk menentukan besarnya tekanan: *magnitude > ketik besarnya momen yang diinginkan*

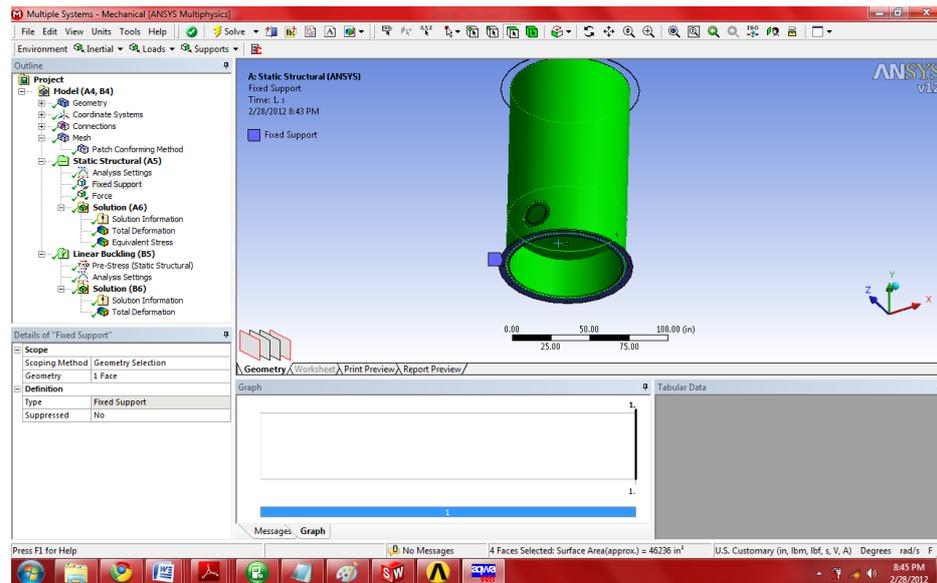


Gambar 3.17 Pembebanan pada *tray support* bejana tekan

Pada Gambar 3.17 diberikan beban berupa gaya aksial menuju ke arah bawah, gaya tersebut diberikan akibat penopang tersebut akan menahan suatu *tray* yang memiliki massa, sehingga ada gaya aksial yang terjadi pada komponen tersebut. Untuk memberikan beban berupa gaya aksial, dapat dilakukan sebagai berikut,

Perintah: *static structural > load > force*, kemudian untuk menentukan besarnya tekanan: *magnitude > ketik besarnya momen yang diinginkan*, selain itu pilih arah yang akan diberikan: *direction > click to define* pilih arah menuju dasar.

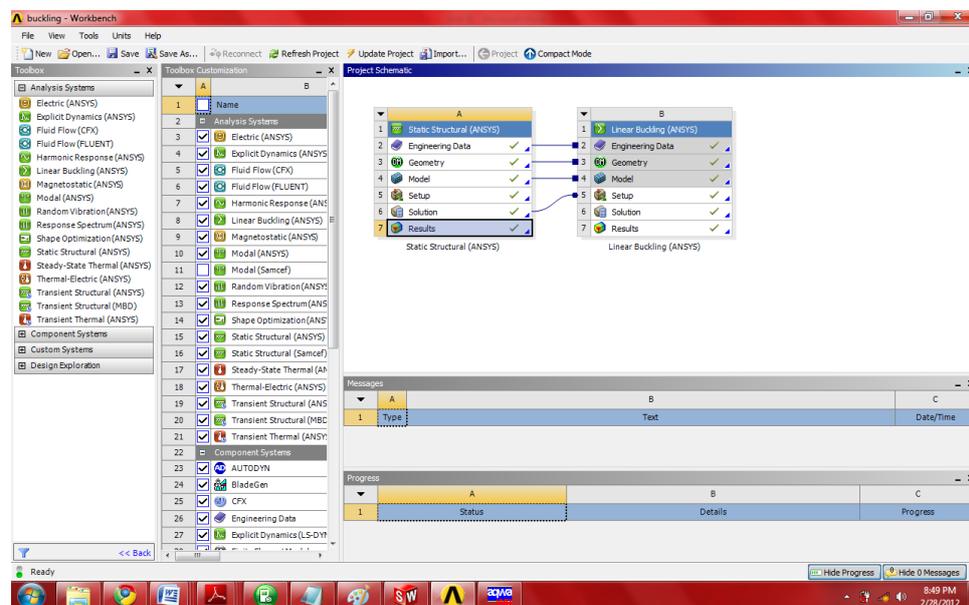
Berikan kondisi dan batasan tersebut pada penopang untuk tangga dan *lifting lug* untuk mengetahui tegangan yang muncul akibat gaya aksial tersebut. Pilih permukaan yang akan diberikan beban dan tentukan besarnya gaya akan diterima penopang tersebut.



Gambar 3.18 Pemberian *constraint*

Pada Gambar 3.18 di atas dapat dilihat pemberian derajat kebebasan pada permukaan alas dari bejana tekan tersebut untuk membatasi gerakan dari bejana tekan tersebut, sehingga dapat diasumsikan bejana tekan tersebut dalam kondisi diam dan sudah terpasang.

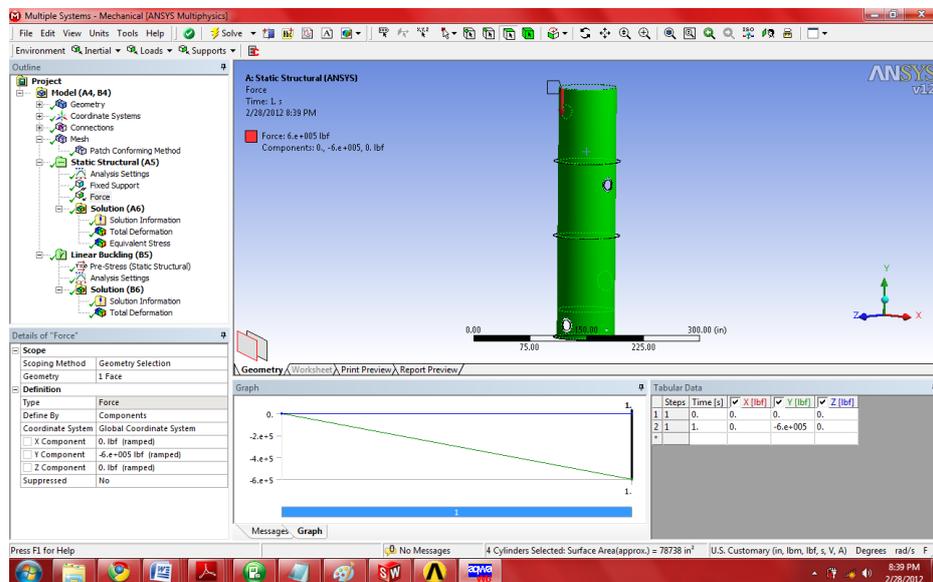
Perintah: *static structural* > *support* > *fixed support* pilih permukaan yang akan diberikan *constraint*.



Gambar 3.19 Analisa stabilitas pada bejana tekan

Pada Gambar 3.19 dapat dilihat merupakan pemilihan suatu analisa yang ditambahkan sehingga dapat mengetahui stabilitas dari bejana tekan tersebut saatn diberikan beban bejana tekan itu sendiri. Untuk mengetahui kestabilan dari bejana tekan tersebut maka digunakan pula analisa *liniear buckling*. Berikut merupakan langkah yang dilakukan untuk mengetahui kestabilan bejana tekan tersebut.

Perintah: *solution > mesh > generate mesh > static structural > fixed support*, pilih permukaan yang akan diberikan *constrain*, *static structural > force > magnitude* berikan gaya aksial ke arah bawah, pilih *solution > deformation > total deformation*, setelah itu pilih *solution* pada *liniear buckling*, *solution > deformation > total deformation*



Gambar 3.20 Tampilan analisa *liniear buckling*

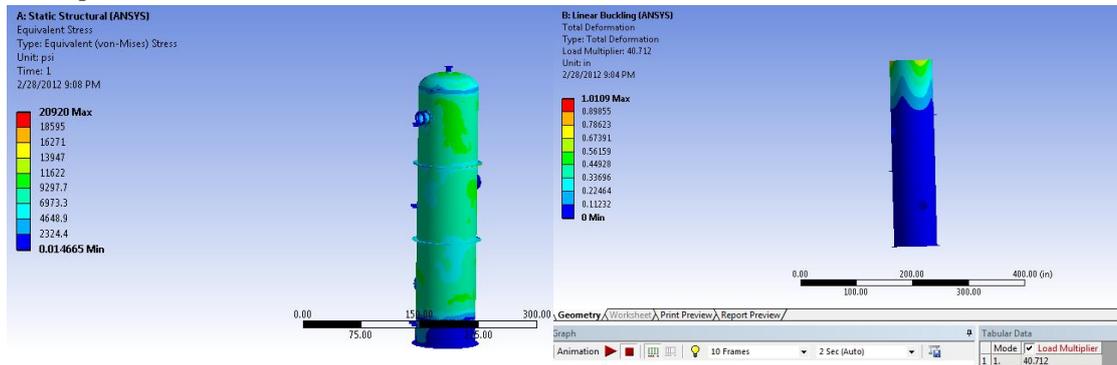
### 3.4.4 Postprocessing

Pada proses *post processing* ini, hasil analisa dapat diketahui berupa tegangan serta *displacement* dari bejana tekan yang dianalisa. Untuk mengetahui besarnya tegangan yang terjadi pada bejana tekan tersebut, hal yang dilakukan antara lain adalah,

Perintah: *solution > stress*, untuk menentukan tegangan yang diketahui, untuk mengetahui tegangan *von-misses* dapat dipilih *equivalent (von-misses)*, untuk

mendapatkan hasil berupa data keseluruhan setiap nodal klik kanan *equivalent stress*

> *export*



Gambar 3.21 Hasil animasi tegangan dan *displacement*

Pada Gambar 3.21 di atas merupakan hasil dari analisa tegangan pada bejana tekan, analisa tersebut memberikan hasil berupa besarnya tegangan pada tiap nodal. Selain itu analisa yang dilakukan juga menghasilkan analisa stabilitas dari bejana tekan akibat beban dari bejana itu sendiri.