

II. LANDASAN TEORI

Liquefied Petroleum Gas (LPG) PERTAMINA dengan *brand* ELPIJI, merupakan gas hasil produksi dari kilang minyak (Kilang BBM) dan Kilang gas, yang komponen utamanya adalah gas propana (C_3H_8) dan butana (C_4H_{10}) lebih kurang 99 % dan selebihnya adalah gas pentana (C_5H_{12}) yang dicairkan. ELPIJI lebih berat dari udara dengan berat jenis sekitar 2.01 (dibandingkan dengan udara), tekanan uap Elpiji cair dalam tabung sekitar 5.0 – 6.2 Kg/cm². Perbandingan komposisi, propana (C_3H_8) : butana (C_4H_{10}) = 30 : 70. Nilai kalori: + 21.000 BTU/lb. Zat mercaptan biasanya ditambahkan kepada LPG untuk memberikan bau yang khas, sehingga kebocoran gas dapat dideteksi dengan cepat. ELPIJI PERTAMINA dipasarkan dalam kemasan tabung (3 kg, 6 kg, 12 kg, 50 kg) dan curah.

A. Jenis-Jenis LPG

Berdasarkan komposisi propane dan butane, LPG dapat dibedakan menjadi tiga macam:

1. LPG *propane*, yang sebagian besar terdiri dari C_3
2. LPG *butane*, yang sebagian besar terdiri dari C_4

3. *Mix* LPG, yang merupakan campuran dari propana dan butana.

LPG butana dan LPG *mix* biasanya dipergunakan oleh masyarakat untuk bahan bakar memasak, sedangkan LPG propana biasanya dipergunakan di industri-industri sebagai pendingin, bahan bakar pemotong, untuk menyemprotkan cat dan yang lainnya. Pada suhu kamar, LPG akan berbentuk gas. Pengubahan bentuk LPG menjadi cair digunakan untuk mempermudah pendistribusiannya.

Berdasarkan cara pencairannya, LPG dibedakan menjadi dua, yaitu LPG *refrigerated* dan LPG *pressurize*. LPG *pressurized* adalah LPG yang dicairkan dengan cara ditekan ($4\text{-}5\text{kg/cm}^2$). LPG jenis inilah yang banyak dipergunakan dalam berbagai aplikasi rumah tangga dan industri, karena penyimpanan dan penggunaannya tidak memerlukan *handling* khusus seperti LPG *refrigerated*. LPG *refrigerated* adalah LPG yang dicairkan dengan cara didinginkan (titik cair Propana $\pm -42\text{ }^\circ\text{C}$, dan titik cair Butana $\pm -0.5\text{ }^\circ\text{C}$). LPG yang dipasarkan PERTAMINA dalam kemasan tabung adalah LPG *pressurized*. LPG *Pressurizze*, dipasarkan dalam kemasan tabung (3 kg, 6 kg, 12 kg, 50 kg) dan juga merupakan LPG MIX, dengan komposisi $\pm 30\%$ propana dan 70% butana. Gambar 1 merupakan salah satu jenis LPG yang dipasarkan oleh Pertamina.



Gambar 1. *LPG prezzurized* dalam berbagai kemasan

Zat mercaptan biasanya ditambahkan kepada LPG untuk memberikan bau yang khas, sehingga kebocoran gas dapat dideteksi dengan cepat (Migas Indonesia, 2009). Pada suhu dan tekanan atmosfer normal, LPG adalah sebagai gas. Namun biasanya disimpan sebagai cairan dalam wadah bertekanan. LPG cair tidak berwarna dan tidak berbau. Pada suhu normal, LPG di dalam silinder akan memiliki tekanan sekitar 300 KPa (sekitar 43 psig). Namun, jika tabung LPG disimpan pada temperatur tinggi, di dekat sumber panas atau di bawah sinar matahari langsung, tekanan LPG dapat meningkat jauh. Peningkatan tekanan dapat menyebabkan tabung LPG pecah dan melepaskan isinya ke udara. Ketika LPG bercampur dengan udara dalam proporsi antara sekitar 2%. Sampai 10%, maka akan mudah terbakar. Jika proporsi diluar rentang ini, maka campuran terlalu lemah untuk bisa dinyalakan (Migas Indonesia, 2009). Oleh karena itu adalah penting untuk

memastikan bahwa tabung yang dipakai aman dari kegagalan, salah satunya adalah kegagalan mekanik.

B. Tabung Baja LPG

1. Badan tabung

Tabung bertekanan yang dibuat dari plat baja karbon canai panas yang digunakan untuk menyimpan gas LPG (*liquid petroleum gas*) dengan pengisian antara 3 kg (7,3 liter) sampai 50 kg (108 liter) dan memiliki rancang bangun minimum 18,6 kg/cm².

2. Klasifikasi

Tabung baja LPG diklasifikasikan menjadi :

- a. Kontruksi 2 bagian : 3 kg sampai dengan maksimal 15 kg.
- b. Kontruksi 3 bagian : 15 kg sampai dengan maksimal 50 kg.

3. Syarat bahan baku :

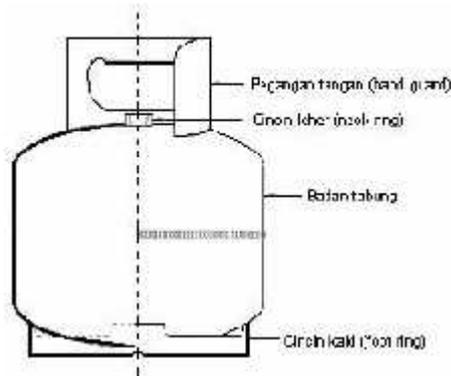
bahan untuk tabung sesuai dengan SNI-07-3018-2006, baja lembaran plat dan gulungan canai panas untuk tabung gas (Bj TG) atau JIS 3116 kelas SG 26 (SG 225), SG 30 (295).

C. Konstruksi

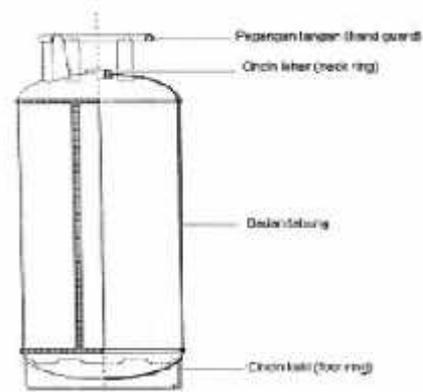
Tabung terdiri dari

1. Bagian atas dan bagian bawah (*top & bottom*) untuk kontruksi 2 bagian dan untuk konstruksi 3 (tiga) bagian, bagian terdiri dari bagian atas, tengah dan bawah.
2. Cincin leher (*neck ring*).
3. Pegangan tangan (*hand guard*).

4. Cicin kaki (*foot ring*).



Gambar 2. Skematis bagian-bagian untuk bentuk dua bagian.



Gambar 3. Skematis bagian-bagian untuk bentuk tiga bagian.

D. Bejana Tekan

Bejana tekan merupakan wadah tertutup yang dirancang untuk menampung cairan atau gas pada temperatur yang berbeda dari temperatur lingkungan. Bejana tekan digunakan untuk bermacam-macam aplikasi di berbagai sektor industri seperti industri kimia (*petrochemical plant*), energi (*power plant*), minyak dan gas (*oil & gas*), nuklir, makanan, bahkan sampai pada peralatan rumah tangga seperti boiler pemanas air atau *pressure cooker*.

1. Bagian-bagian Bejana Tekan

- a. Kulit (*Shell*) merupakan bagian yang menyelimuti seluruh bagian dari bejana tekan. Kulit bejana tekan ini meliputi:
 1. Kulit silinder (*cylindrical shell*)
 2. Kulit bulat (*spherical shell*)
- b. Head merupakan bagian penutup akhir dari suatu pressure vessel yaitu :
 1. *Sphere* dan *hemispherical head*

2. 2:1 *Ellipsoidal* atau semi *elliptical*
 3. *head flanged* dan *dished head (F&D Head)*
 4. *Cone* dan *conical section*
- c. *Nozzle*

Pada umumnya terdiri dari potongan pendek sebuah pipa yang dilas di kulit bejana tekan atau bagian *head* dengan sebuah *flange* sebagai penghubung akhir ke pipa dengan menggunakan baut. *Nozzle* ini meliputi:

1. Tipe secara umum:
 - a. *Integrally reinforced*
 - b. *Built-up construction*
 - c. *Pad type (studding outlet)*
 - d. *Sight glasses*
 - e. *Elliptical manways*
2. Tipe secara penggunaan:
 - a. *Manways*
 - b. *Inspection openings*
 - c. *PSV*
 - d. *Instrument connections*
 - e. *Vents*
 - f. *Drains*
 - g. *Process connections*

d. Penyangga

Struktur penyangga bejana tekan memiliki beberapa orientasi, seperti :

- a. *Skirt (straight atau conical)*
 - b. *Leg support (braced atau unbraced)*
 - c. *Rings*
 - d. *Lug support*
 - e. *Combination (lugs dan legs, rings dan legs, rings dan skirt)*
 - f. *Saddle (attached atau loose) (untuk tipe horizontal)*
- e. *Flange*

Flange merupakan bagian perapat yang digunakan untuk menghubungkan flange pada pipa dengan menggunakan baut secara bersama-sama. *Flange* ini meliputi:

1. Tipe secara umum:
 - a. *Slip on*
 - b. *Weld neck, long weld neck*
 - c. *Lap joint*
 - d. *Blind*
 - e. *Screwed*
 - f. *Plate flanges*
 - g. *Studding outlets*
 - h. *Reverse-type flange*
 - i. *Reducing flange*

j. *Graylock hub connector*

k. *Socket weld*

2. Tipe berdasarkan permukaan *flange*:

a. *Flat face*

b. *Raised face*

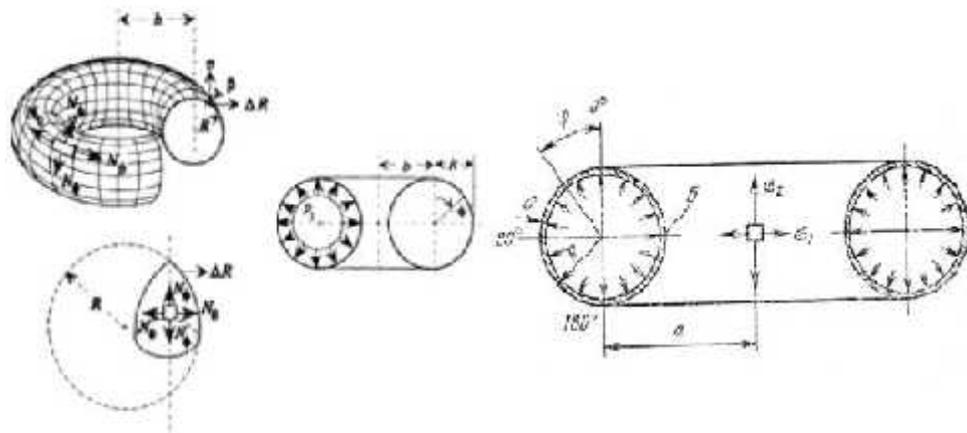
c. *Finish (smooth, standard, serrated)*

d. *Ring joint*

e. *Tongue dan groove*

F. Toroid / Torus

Torus merupakan sebuah modifikasi dari sebuah benda solid, yang dibentuk dengan merotasikan sebuah lingkaran disekitar garis pada sebuah bidang lingkaran yang lain. Torus terbentuk dari sebuah lingkaran dengan r adalah jari-jari lingkaran yang telah dirotasikan dan R adalah jarak dari titik tengah lingkaran yang menjadi sumbu dari rotasi.



Gambar 4. Geometri dan jari-jari toroidal

G. Manufaktur Bejana Tekan Toroidal

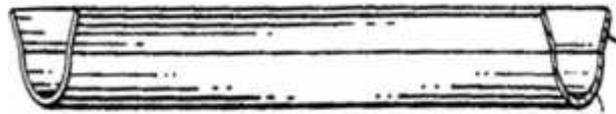
Pada dasarnya proses pembuatan bejana tekan toroidal dapat menggunakan berbagai macam proses diantaranya pegecoran, tempa, atau dengan mesin. Diantara proses itu sendiri mempunyai berbagai kelebihan dan kekurangan masing-masing. Pada proses pembentukan toroidal *shell* proses yang paling sering digunakan adalah proses *forging*, proses ini sering digunakan dikarenakan dalam proses manufaktur dengan skala produksi yang besar proses ini lebih ekonomis dikarenakan material sisa yang dihasilkan lebih sedikit seperti pada proses permesinan dan tidak perlu memanaskan material hingga mencair seperti pada proses *casting*.

Proses *forging* adalah sebuah proses dimana logam bahan baku dipanaskan hingga menjadi liat dan mudah dibentuk. Pada proses ini logam bahan baku dipanaskan pada suhu 8200 C selama 1 jam kemudian dilakukan *heat treatment* dengan memanaskan pada suhu 4800 C selama 5 jam. Setelah logam dipanaskan dan menjadi liat kemudian logam dibentuk menjadi sebuah bentuk semi toroidal. Dalam pembentukan semi toroidal biasa digunakan dengan mesin pengepress atau mesin penempa atau juga dapat dengan cara manual dengan menempa menggunakan tenaga manusia.

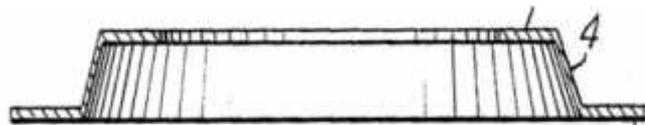


Gambar 5. Bahan Baku Toroidal

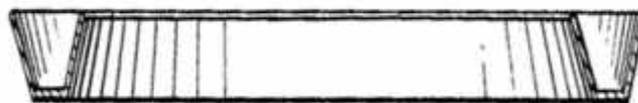
Setiap bahan baku toroidal digunakan untuk membuat sebuah semi toroidal pada bagian atas bagian bawah toroidal, setelah kedua bagian toroidal selesai dibentuk maka akan disatukan pada proses pengelasan. Proses pengepresan atau penempaan dilakukan dengan menggunakan sebuah cetakan yang terbuat dari baja paduan yang memiliki titik lebur lebih tinggi dari bahan baku, biasanya terbuat dari baja dengan paduan dengan 18% nikel. Cetakan dalam proses pengepresan ini terdapat berbagai macam bentuk tergantung dari proses assembly yang akan digunakan sesudahnya. Setelah bahan baku selesai dipress kemudian kedua bahan baku ini disatukan pada proses assembly, yang berupa proses finishing, pembuatan kampuh las dan proses pengelasannya itu sendiri.



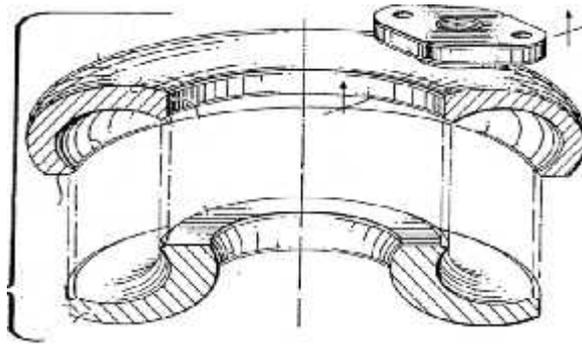
Gambar 6. Cetakan bagian bawah bentuk penampang lingkaran



Gambar 7. Cetakan bagian bawah untuk pengelasan tepi *crow*n

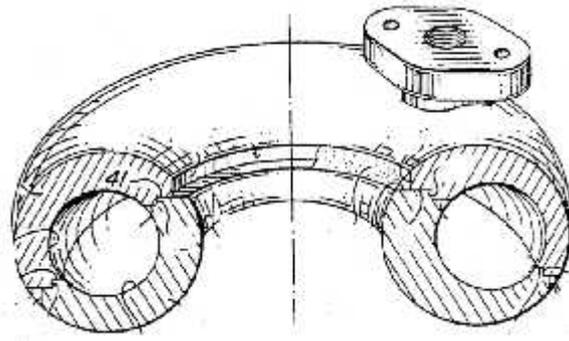


Gambar 8. Cetakan bagian bawah untuk penampang persegi



Gambar 9. 2 Bagian Semi Toroidal *Shell*

Pada proses pengelasan pada bejana tekan toroidal terdapat beberapa bagian yang dapat digunakan sebagai kampuh las diantaranya pada bagian tengah extrados dan intrados atau pada bagian tepi pada daerah *crown* untuk Tabung LPG 3 kg dengan R yang kecil maka digunakan bagian yang dilas adalah bagian tepi *crown* untuk mempermudah proses pengelasan, tentunya pada proses pembentukan toroidal *shell* menggunakan cetakan yang terpisah pada bagian tepi *crown*.



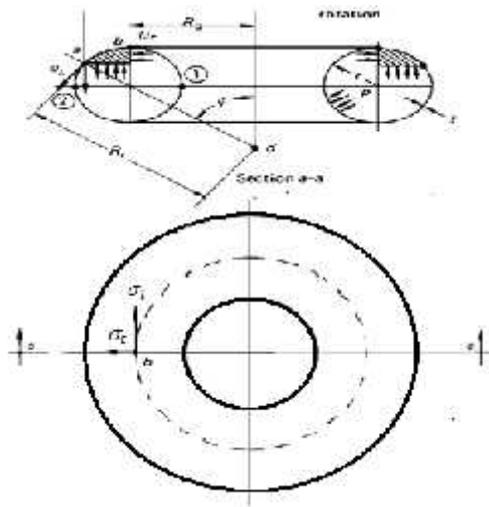
Gambar 10. Kampuh Las Toroidal

H. Teori Membran *Shell* Toroidal

Pada dasarnya bejana tekan bentuk toroidal adalah sebuah revolusi dari bentuk silinder, pada awalnya *shell* dianggap tipis dan rasio ketebalan dan jari-jari *shell* sangat kecil, sehingga distribusi tegangan pada bidang tegak lurus terhadap

permukaan *shell* dianggap sama untuk seluruh ketebalan *shell*. Tetapi dalam perkembangannya penentuan tegangan oleh Dean (1939) menyatakan bahwa setiap pemecahan tegangan yang dapat diterima dari *membrane shell* akan melibatkan *bending*, yang dipengaruhi oleh tegangan geser yang melalui ketebalan *shell* itu sendiri.

Gambar 12 digambarkan bentuk dari sebuah geometri toroidal dalam menentukan tegangan *principal* pada Arah Longitudinal σ_l dan Arah Tangensial σ_t pada bejana tekan toroidal, bentuk cincin pada bagian toroidal adalah sebuah bentuk yang terisolasi dan kondisi batas antara *Internal Pressure* dan *membrane stress* σ_l dijabarkan sebagai berikut:



Gambar 11. Geometri Toroidal

$$R_t = \frac{R}{\sin\theta}, \text{ tangential radius curvature}$$

$$R_m = r, \text{ meridional radius of curvature}$$

Jadi,

$$\sigma_r = \frac{P(R^2 - R_0^2)}{2tR \sin\theta} = \frac{Pr}{t} \left[\frac{R^2 + R_0^2}{2R} \right] \quad (7)$$

Tegangan *hoop* yang terjadi pada bentuk toroidal adalah sebagai berikut:

$$\sigma_t = \frac{Pr}{2t} F(R_0),$$

$$F(R_0) = \begin{cases} \frac{(2R_0+r)}{(R_0+r)} \rightarrow \text{untuk extrados} \\ 2 \rightarrow \text{untuk crown} \\ \frac{(2R_0-r)}{(R_0-r)} \rightarrow \text{untuk intrados} \end{cases} \quad (8)$$

Jadi pada setiap titik pada gambar yaitu pada titik 1,2, dan b (Gambar 12) adalah sebagai berikut:

Pada titik 1, $R = R_0 - r$ (intrados):

$$\sigma_t = \left(\frac{Pr}{2t} \right) \left[\frac{(2R_0-r)}{(R_0-r)} \right] \quad (9)$$

Pada titik 2, $R = R_0 + r$ (extrados):

$$\sigma_t = \left(\frac{Pr}{2t} \right) \left[\frac{(2R_0+r)}{(R_0+r)} \right] \quad (10)$$

Pada titik b, dimana $R = R_0$ (crown)

$$\sigma_t = \frac{Pr}{t} \quad (11)$$

Geometri dari sebuah toroidal, tegangan pada arah *hoop* σ_t berbentuk sebuah lingkaran ini berarti persamaan σ_t dan σ_r adalah kebalikan dari silinder lurus.

Dan dari persamaan:

$$\left(\frac{\sigma_t}{(R \sin\theta)} \right) + \left(\frac{\sigma_r}{r} \right) = \frac{P}{t} \quad (12)$$

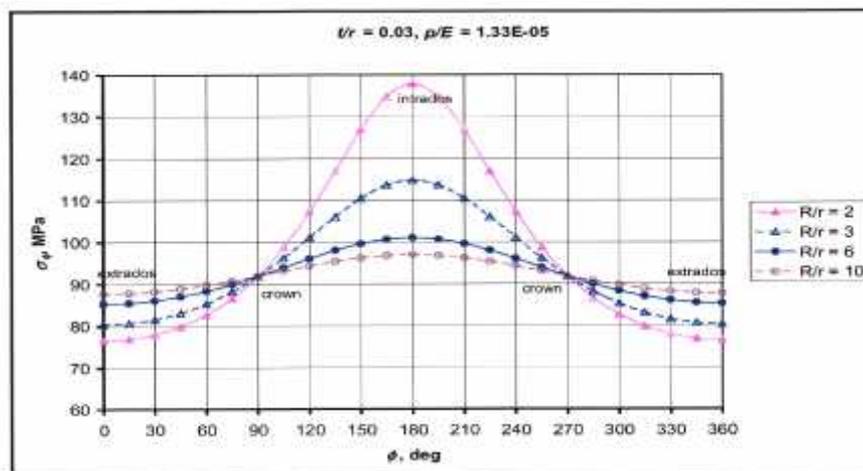
Maka tegangan tangensial σ_t dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\sigma_t = \frac{P(R-R_0)}{2t \sin\theta} \quad (13)$$

Atau

$$\sigma_t = \frac{Pr}{2t} \quad (14)$$

σ_1 (konstan) dan σ_2 (variabel) keduanya adalah tegangan tarik prinsipal (*tensile stress*) yang bekerja pada *shell*. Tegangan σ_2 pada titik sama dengan tegangan maksimum pada bentuk silinder. (Bernard Henry H, 1986). Dari Persamaan (16, 17, dan 18) tegangan longitudinal dan tegangan *hoop* dinyatakan sebagai sebuah fungsi dari perbandingan jari-jari 2 buah lingkaran, pada Gambar 13 digambarkan grafik tegangan maksimum *hoop stress* yang terjadi akibat *internal pressurized P* ($P/E = 1.33E-05$) pada bagian *intrados*, *extrados* dan pada *crown*, dan dapat dilihat bahwa *stress* maksimum terjadi pada bagian intrados dan minimum pada bagian extrados.



Gambar 12. Distribusi tegangan *hoop* (*hoop stress*) dalam *membrane shell* Toroidal akibat *internal pressure*.

Berikut pada tabel 1 adalah beberapa fungsi R_o/r (ρ) dari penggunaan persamaan (16, 17, dan 18), ini juga akan menunjukkan bagaimana perilaku membran *shell* yang telah diubah untuk perilaku *bending* (nonlinear).

Tabel 1. $f(\rho)$ pada bagian *Extrados*, *Intrados*, dan *Crown*.

R_o/r	Extrados ($\phi = 0$)	Crown ($\phi = 90$)	Intrados ($\phi = 180$)
2	1.667	2.0	3.000
3	1.750	2.0	2.500
4	1.800	2.0	2.333
5	1.833	2.0	2.250
6	1.857	2.0	2.200
7	1.875	2.0	2.167
8	1.889	2.0	2.143
9	1.900	2.0	2.125
10	1.909	2.0	2.111

Sekarang dapat ditentukan *displacement*, dengan melambangkan *displacement* pada arah sejajar dengan sumbu toroidal dengan v . Dan *displacement* yang tegak lurus sumbu toridal, dengan u .

Maka regangan pada bidang *tangential* adalah:

$$\epsilon_t = \frac{u}{ac} = \frac{u}{a + \sin\phi} \quad (15)$$

Sedangkan pada arah longitudinal:

$$\epsilon_l = \frac{A'B' - AB}{AB} = \frac{BB' - AA'}{AB} \quad (16)$$

$$BB' = (u + du) \cos\phi - (v + dv) \sin\phi \quad (17)$$

$$AA' = u \cos\phi - v \sin\phi, \quad (18)$$

$$AB' = RD\varphi \quad (19)$$

Jadi regangan sepanjang bidang longitudinal adalah:

$$\varepsilon_l = \frac{1}{R} \left(\frac{du}{d\varphi} \cos \varphi - \frac{dv}{d\varphi} \sin \varphi \right) \quad (20)$$

Dan sepanjang bidang *tangential* (V.I. Feodosiev, 2005)

$$\varepsilon_m = \frac{1}{E} (\sigma_m - \mu \sigma_z) \quad (21)$$

I. Teori Kegagalan

1. Teori Tegangan Geser Maksimum (Kriteria *Tresca*)

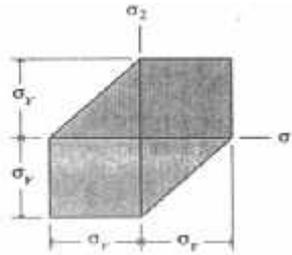
Teori tegangan geser maksimum memperkirakan kegagalan spesimen yang mengalami beban kombinasi terjadi bila tegangan geser maksimum pada suatu titik mencapai tegangan luluh hasil uji tarik atau uji tekan dan suatu material yang sama. Secara matematis, teori tegangan geser maksimum dapat dituliskan:

$$\tau_{max} = \tau_y$$

Dengan τ_y adalah tegangan luluh yang didapatkan dari uji tarik atau uji tekan atau dengan menggunakan persamaan:

$$\tau_y = \frac{\sigma_y}{2} \quad (22)$$

Dimana σ_y adalah tegangan luluh untuk pembebanan uniaksial. Grafik dan teori tegangan geser maksimum untuk sebuah elemen yang mengalami tegangan biaksial diperlihatkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Grafik teori tegangan geser maksimum

Pada kuadran pertama atau ketiga, nilai tegangan geser maksimum dapat diketahui dengan persamaan:

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (23)$$

$$\frac{\sigma_1}{2} = (\text{kuadran pertama})$$

$$\frac{\sigma_2}{2} = (\text{kuadran ketiga})$$

Pada kuadran kedua dan keempat, dimana tegangan aksial arah sumbu-1 dan sumbu-2, σ_1 dan σ_2 , memiliki tanda yang berlawanan, tegangan geser maksimum adalah setengah dari penjumlahan aritmatik dari dua tegangan utama.

Batas garis tegangan kuadran keempat, dan kuadran kedua adalah:

$$\begin{cases} \sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_y & \rightarrow \text{Kuadran keempat} \\ \sigma_1 - \sigma_2 = -\sigma_y & \rightarrow \text{kuadran kedua} \end{cases} \quad (24)$$

Untuk sebuah tabung toroidal

$$\sigma_1 = \left[\frac{pr}{2t} \right] \left[\frac{2R_0 - r}{R_0 - r} \right]$$

$$\sigma_2 = \frac{pr}{2t}$$

Kedua tegangan ini adalah tarik (kuadran I pada gambar 14), maka menurut kriteria *tresca* :

$$\sigma_1 = \left[\frac{pr}{2t} \right] \left[\frac{2R_0 - r}{R_0 - r} \right] = \sigma_y \quad (25)$$

Dari definisi: $\rho = \frac{R_0}{r}$, maka persamaan (26) dapat ditulis sebagai :

$$\left[\frac{pr}{2t} \right] \left[\frac{2\rho - 1}{\rho - 1} \right] = \sigma_y \quad (26)$$

Dari persamaan (27) persamaan P_y dapat ditulis sebagai :

$$P_y = \left[\frac{\sigma_y \cdot 2t}{r} \right] \left[\frac{\rho - 1}{2\rho - 1} \right] \quad (27)$$

2. Teori Energi Distorsi Maksimum (*Kriteria von Mises*)

Teori energi distorsi maksimum menyatakan bahwa kegagalan sebuah spesimen yang mengalami beban kombinasi terjadi bila komponen distorsi energi regangan dari suatu bagian yang mengalami tegangan mencapai nilai kegagalan komponen distorsi energi regangan hasil uji tarik atau uji tekan suatu material yang sama. Teori ini mengasumsikan bahwa energi regangan

yang mengakibatkan perubahan volume tidak berpengaruh terhadap kegagalan material akibat peluluhan.

Energi regangan distorsi dapat dihitung dengan mengetahui energi regangan total akibat tegangan material dan pengurangan energi regangan bergantung kepada perubahan volume. Energi regangan dapat ditentukan melalui persamaan berikut:

$$u = \frac{\sigma^2}{E} = \frac{\sigma \epsilon}{2} \quad (28)$$

Dimana adalah intensitas energi regangan material. Bila elemen elastik mengalami pembebanan triaksial, tegangan dapat dibedakan menjadi tiga tegangan utama, σ_1 , σ_2 dan σ_3 , dimana notasi subskrip angka menyatakan arah pembebanan.

Jika diasumsikan beban diterapkan secara simultan dan bertahap, tegangan dan regangan akan meningkat dengan perilaku yang relatif sama. Energi regangan total adalah jumlah energi yang dihasilkan oleh setiap tegangan (energi adalah kuantitas skalar dan bisa ditambahkan secara aljabar dengan mengabaikan arah tegangan individu), maka,

$$u = \frac{1}{2} (\sigma_1 \epsilon_1 + \sigma_2 \epsilon_2 + \sigma_3 \epsilon_3) \quad (29)$$

Bila regangan diubah dalam bentuk tegangan, persamaan (29) akan menjadi,

$$u = \frac{1}{2} [\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1)] \quad (30)$$

Energi regangan dapat dibedakan ke dalam dua komponen, yakni hasil dan perubahan volume (u_v) dan distorsi (u_d). Energi yang dihasilkan dari perubahan volume (tegangan hidrostatik) dapat ditentukan dengan persamaan:

$$u_v = \frac{1-2\nu}{6E} [\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3]^2 \quad (31)$$

Sedangkan energi yang dihasilkan dari distorsi dapat ditentukan dengan persamaan:

$$u_v = \frac{1+2\nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (32)$$

Teori kegagalan energi distorsi maksimum mengasumsikan bahwa perilaku tegang (*inelastic action*) akan terjadi bila energi distorsi yang ditunjukkan pada persamaan (32) melebihi nilai batas yang didapatkan dan uji tarik.

Untuk uji ini, hanya ada satu nilai tegangan utama yang bernilai (*nonzero*).

Jika tegangan ini dinotasikan dengan σ_y , maka nilai u_d menjadi,

$$(u_d)_y = \frac{1+\nu}{3E} \sigma_y^2 \quad (33)$$

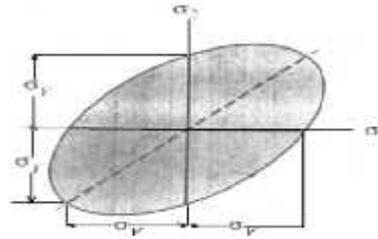
Dan bila persamaan (33) disubstitusi ke persamaan (32), maka didapatkan persamaan untuk kegagalan akibat peluluhan sebagai berikut,

$$2\sigma_y^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \quad (34)$$

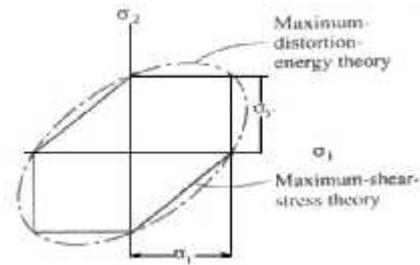
Untuk kondisi tegangan bidang seperti pada *shell* tipis, dapat diasumsikan bahwa σ_3 bernilai 0, persamaan (34) menjadi,

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma_y^2 \quad (35)$$

Persamaan (35) akan menghasilkan grafik seperti diperlihatkan pada gambar 14. Perbandingan teori kegagalan tegangan geser maksimum dan teori kegagalan energi distorsi maksimum diperlihatkan pada Gambar 15.



Gambar 14. Grafik Teori Energi Distorsi Maksimum



Gambar 15. Grafik Perbandingan Antara Teori *Tresca*
Dan Teori *Von Mises*

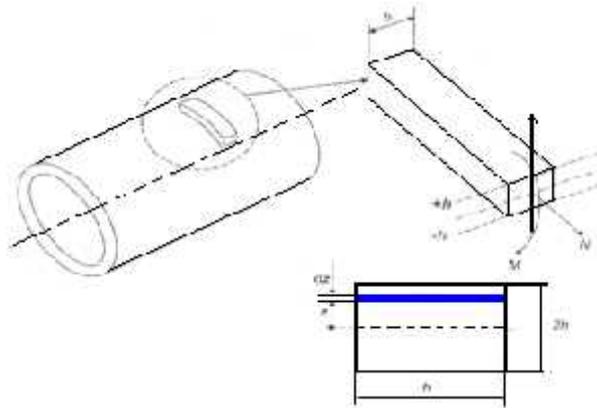
J. *Limit* Tekanan

Perilaku komponen teknik yang paling sulit sekalipun, seperti pengerasan nonlinear, dapat dianalisa jika hubungan elastis-plastis dan tegangan regangan pada komponen tersebut telah diketahui (terutama menggunakan metode elemen hingga).

Mekanisme kegagalan plastis (*plastic collapse*) bagaimanapun juga tetap mengikuti kaidah model plastis sederhana, bahwa tegangan di atas batas luluh suatu komponen tidaklah mungkin terjadi. Sebuah batas pasti dicapai bila tidak ada lagi tegangan yang dapat diterima, dan akhirnya komponen tersebut pun mengalami kegagalan.

Beban maksimum yang dapat diterima oleh suatu komponen sebelum dirinya mengalami kegagalan disebut *limit load*. Oleh sebab itu, para perancang harus benar-benar menghitung besarnya nilai *limit load* komponen yang akan mereka buat, untuk memprediksi jumlah beban yang harus diterima oleh komponen

tersebut agar tidak sampai terjadi kegagalan. Sebuah contoh penting mengenai *limit load* dapat diamati pada *beam* sebagai pemodelan dasar dinding *shell* yang mengalami tegangan dan *bending*, seperti ditunjukkan pada Gambar 16.



Gambar16. Dinding *Shell* Yang Dianalisis Sebagai *Beam*

Diketahui bahwa σ_z adalah tegangan *circumferential* (keliling) pada jarak z dan permukaan tengah dinding. Pada titik z dapat disusun persamaan dimana M dan N merupakan gaya yang diterima oleh *beam* tersebut

$$M = F \cdot z = \int_{-h}^h \sigma A \cdot z = \int_{-h}^h \sigma b \cdot dz = b \int_{-h}^h \sigma \cdot dz \quad (36)$$

$$N = \int_{-h}^h \sigma A = \int_{-h}^h \sigma b \cdot dz = b \int_{-h}^h \sigma \cdot dz \quad (37)$$

Karena perilaku *beam* tersebut adalah sepenuhnya elastis, kedua persamaan ini dapat disederhanakan menjadi:

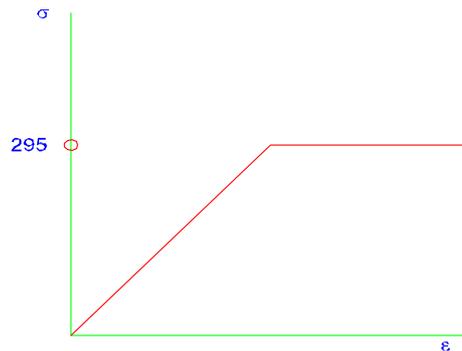
$$\sigma(z) = \frac{N}{A} + \frac{Mz}{I} \quad (38)$$

Dimana:

$$A = 2bh \quad (\text{luas area potongan } beam)$$

$$I = \frac{bl^3}{12} = \frac{b(2h)^3}{12} = \frac{2}{3} bh^3 \quad (\text{momen inersia luas potongan } beam)$$

Dengan asumsi bahwa material bersifat *elastic-perfectly plastic* seperti pada Gambar 18 dengan *yield stress* σ_y , momen sebesar M, dan gaya sebesar N, maka *yield* pertama kali akan terjadi akibat tegangan pada lapisan terluar ($z \pm h$), ketika:



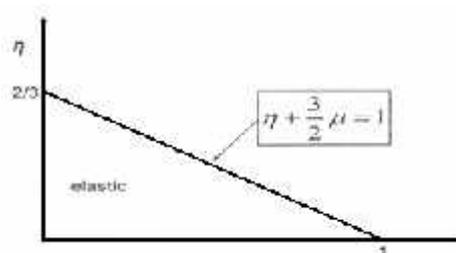
Gambar 17. Kurva *elastic-perfectly plastic*

$$\frac{N}{2bh} + \frac{3}{2} \frac{M}{bh^2} = \sigma_y \quad (39)$$

$$\text{Atau} \quad \eta + \frac{3}{2} \mu = 1 \quad (40)$$

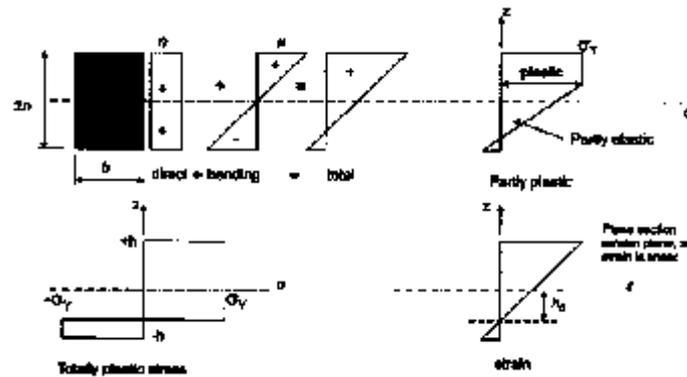
$$\text{Dimana } \eta = \frac{N}{2bh\sigma_y} \text{ dan } \mu = \frac{M}{b\sigma_y h^2}$$

Persamaan (36) disebut juga kondisi awal *yield* (*Initial Yield Condition*) yang dapat diamati pada gambar 18.



Gambar 18. Kondisi Awal *Yield*

Jika beban semakin bertambah, plastisitas akan menyebar ke seluruh dinding shell (dalam hal ini diamati sebagai *beam*) seperti terlihat pada Gambar 19.



Gambar 19. Pertambahan Plastisitas di Dalam *Beam*

Secara matematis, distribusi tegangan dapat ditulis sebagai;

$$\sigma(z) = \begin{cases} \sigma_y & \text{untuk } z \geq h_0 \\ -\sigma_y & \text{untuk } z \leq -h_0 \end{cases}$$

Dan persamaan (36) diperoleh:

$$M = b \int_{-h}^h \sigma \cdot z dz = b \int_{-h}^{-h_0} (-\sigma_y) z \cdot dz + \int_{-h_0}^h (\sigma_y) z dz$$

$$M = b\sigma_y \left\{ -\frac{z^2}{2} \Big|_{-h}^{-h_0} + -\frac{z^2}{2} \Big|_{h_0}^h \right\}$$

$$M = b\sigma_y \left\{ \left(-\frac{h_0^2}{2} + \frac{h^2}{2} \right) + \left(\frac{h^2}{2} - \frac{h_0^2}{2} \right) \right\}$$

$$M = b\sigma_y(h^2 - h_0^2) \quad (41)$$

Dan dari persamaan (37) diperoleh:

$$N = b \int_{-h}^h \sigma \cdot dz = b \left[\int_{-h_0}^{-h} (-\sigma_y) dz + \int_{-h_0}^h (\sigma_y) z dz \right]$$

$$N = b\sigma_y \left\{ -z \left| \begin{array}{c} -h\sigma \\ h \end{array} \right. + z \left| \begin{array}{c} -h \\ h\sigma \end{array} \right. \right\}$$

$$N = b\sigma_y \{ (h\sigma + (-h)) + (h + h\sigma) \}$$

$$N = 2b\sigma_y h\sigma \rightarrow h\sigma = \frac{N}{2b\sigma_y} \quad (42)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (41) dan (42), dapat diketahui bahwa:

$$M = b\sigma_y \left(h^2 - \left(\frac{N}{2b\sigma_y} \right)^2 \right)$$

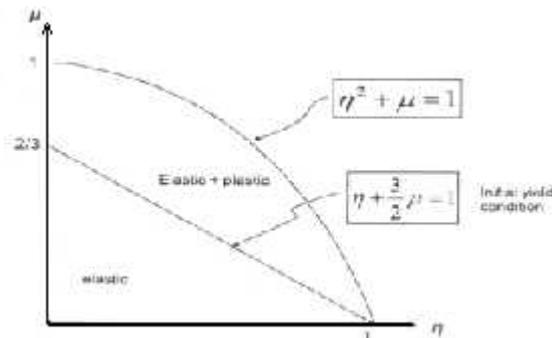
$$\frac{M}{b\sigma_y} = h^2 \left(1 - \left(\frac{N}{4b^2 h^2 \sigma_y^2} \right)^2 \right)$$

$$\frac{M}{bh^2\sigma_y} + \left(\frac{N}{2bh\sigma_y} \right)^2 \equiv 1 \rightarrow \text{kondisi batas (limit condition)} \quad (43)$$

Persamaan (42) dan (43) dapat ditulis sebagai

$$\mu + \eta^2 = 1 \quad (44)$$

Kondisi Awal *Yield* dan kondisi batas ditunjukkan dalam diagram interaksi, dan kondisi batas pada diagram interaksi ini disebut *Limit Surface* :



Gambar 20. Diagram Interaksi

Dan diagram interaksi, perlu memiliki sebuah kondisi

$$\left. \begin{array}{l} \frac{M}{bh^2\sigma_y} \leq 1 \\ \frac{N}{2bh\sigma_y} \leq 1 \end{array} \right\} \quad (45)$$

Limit load untuk *beam* dalam keadaan *bending* (*Limit Moment*), LM dapat diperoleh dan persamaan (43) dengan memasukkan nilai $N = 0$:

$$M_L = \sigma_y b h^2 \quad (46)$$

Yield Moment, M dapat diperoleh dan persamaan (39) dengan memasukkan nilai $N = 0$ sehingga:

$$M_y = \frac{2bh^2}{3} \sigma_y \quad (47)$$

Dan dua persamaan terakhir, dapat diketahui bahwa M:

$$\frac{M_L}{M_y} = 1.5 \quad (48)$$

Dengan:

$$M_L = 1.5M_y \text{ atau } M_L = 1.5\sigma_y Z$$

Limit load untuk *beam* dalam keadaan tarik dapat diperoleh dari persamaan (43) dengan $M = 0$ sehingga:

$$N_L = 2bh\sigma_y \quad (49)$$

Nilai untuk *yield* pada benda dalam keadaan tarik dapat diperoleh dari persamaan (39) dengan nilai $M = 0$

$$N_y = 2bh\sigma_y \quad (50)$$

Dari persamaan (49) dan (50) maka dapat diperoleh:

$$\frac{N_L}{N_y} = 1 \quad (51)$$