

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Jenis-Jenis Bahan Bakar Gas (BBG)

Salah satu energi alternatif pengganti bahan bakar minyak untuk kendaraan roda empat adalah bahan bakar gas (BBG). Ada dua jenis bahan bakar gas (BBG), yaitu sistem yang menggunakan BBG atau CNG (*Compressed Natural Gas*) dan sistem Vigas atau LGV (*Liquid Gas for Vehicle*). Gas alam terkompresi (CNG) adalah alternatif bahan bakar selain bensin atau solar.

Compressed Natural Gas (CNG) adalah bahan bakar gas yang dibuat dengan melakukan kompresi metana (CH_4) yang diekstrak dari gas alam. CNG disimpan dan didistribusikan dalam bejana tekan, biasanya berbentuk silinder. CNG memiliki tekanan 200 bar, dengan tangki yang lebih besar bila dibandingkan LGV (Dirjen Migas, 2012).

Liquid Gas for Vehicle (LGV) merupakan bahan bakar gas yang diformulasikan untuk kendaraan bermotor yang menggunakan *spark ignition engine* terdiri dari campuran propana (C_3) dan butana (C_4). Singkatnya, LGV merupakan LPG untuk kendaraan. Kualitas pembakaran LGV ramah lingkungan (Dirjen Migas, 2012).

B. Pengertian *Stress*, *Volumetric Strain*, dan Modulus Elastisitas

1. Tegangan (*Stress*)

Tegangan atau *Stress* adalah “ Perbandingan antara gaya tarik atau tekan yang bekerja terhadap luas penampang benda” . Secara matematis tegangan dapat dituliskan,

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

dimana :

σ = Tegangan (Pa)

F = Gaya aksial (N)

A = Luas penampang (m²)

2. Regangan Volume

Regangan untuk Volume atau *Volumetric Strain* merupakan “Perbandingan antara pertambahan volume (δV) atau jumlah deformasi yang terjadi (δV) terhadap Volume mula-mula (V_0)” (Clemens Kaminski, 2005). Deformasi adalah perubahan bentuk, posisi dan dimensi dari suatu benda (Kuang, 1996). Sehingga berdasarkan definisi tersebut, deformasi dapat diartikan sebagai perubahan kedudukan atau pergerakan suatu titik pada suatu benda secara absolut maupun relatif.

Regangan dinotasikan dengan ϵ dan tidak mempunyai satuan. Secara matematis regangan dapat dituliskan,

$$\epsilon = \frac{\delta V}{V_0} \quad (2)$$

dimana :

ε = Regangan

ΔV = Ekspansi Volume

V_0 = Volume awal

δ = Deformasi

kemudian persamaan untuk deformasi atau ekspansi pada volume silinder adalah sebagai berikut :

$$\triangleright V_0 = \left(\frac{\pi D_0^2}{4}\right)L_0 \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \triangleright V &= \frac{\pi}{4} (D_0 + \delta D)^2 (L_0 + \delta L) \\ &= \frac{L_0 \pi D_0^2}{4} [1 + \varepsilon_h]^2 [1 + \varepsilon_L] \end{aligned} \quad (4)$$

Jika telah diketahui bahwa :

$$\begin{aligned} \varepsilon_V &= \frac{V - V_0}{V_0} \\ &= \frac{V}{V_0} - 1 \\ &= [1 + \varepsilon_h]^2 [1 + \varepsilon_L] - 1 \\ &= (1 + 2\varepsilon_h + \varepsilon_h^2)(1 + \varepsilon_L) - 1 \\ &= (1 + 2\varepsilon_h + \varepsilon_h^2 + \varepsilon_L + 2\varepsilon_h\varepsilon_L + \varepsilon_h^2\varepsilon_L - 1) \\ \bullet \quad \varepsilon_V &= (2\varepsilon_h + \varepsilon_h^2 + \varepsilon_L + 2\varepsilon_h\varepsilon_L + \varepsilon_h^2\varepsilon_L) \end{aligned} \quad (5)$$

dimana :

V_0 = Volume awal

D_0 = Diameter awal

ε_V = *Volumetric Strain* atau *Ekspansi Volume*

3. Modulus Elastisitas

Besarnya pertambahan panjang yang dialami oleh setiap benda ketika meregang adalah berbeda antara satu dengan yang lainnya, tergantung dari elastisitas bahannya. Elastisitas yang dimiliki oleh tiap-tiap benda tergantung dari jenis bahan apakah benda itu terbuat.

Semakin elastis sebuah benda, maka semakin mudah benda tersebut untuk dipanjangkan atau dipendekan. Semakin besar gaya yang bekerja pada suatu benda, maka semakin besar pula tegangan dan regangan yang terjadi pada benda itu, sehingga semakin besar pula pemanjangan atau pemendekan dari benda tersebut.

Jika gaya yang bekerja berupa gaya tekan, maka benda akan mengalami pemendekan, sedangkan jika gaya yang bekerja berupa beban tarik, maka benda akan mengalami perpanjangan. Dari sini dapat disimpulkan bahwa regangan (ϵ) yang terjadi pada suatu benda berbanding lurus dengan tegangannya (σ) dan berbanding terbalik terhadap ke elastisitasannya. Ini dinyatakan dengan rumus :

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (6)$$

persamaan (6) pertama kali didapatkan oleh Robert Hooke pada tahun 1678 dan dikenal sebagai Hukum Hooke. Dalam rumus ini, (E) adalah parameter modulus elastisitas atau modulus young. Modulus ini adalah

sebuah konstanta bahan yang memiliki nilai tertentu untuk bahan tertentu. Semakin kecil modulus elastisitas sebuah benda, maka akan semakin mudah bagi bahan untuk mengalami perpanjangan atau perpendekan. begitu pula sebaliknya, Semakin besar modulus elastisitas sebuah benda, maka akan semakin sulit bagi bahan untuk mengalami perpanjangan atau perpendekan.

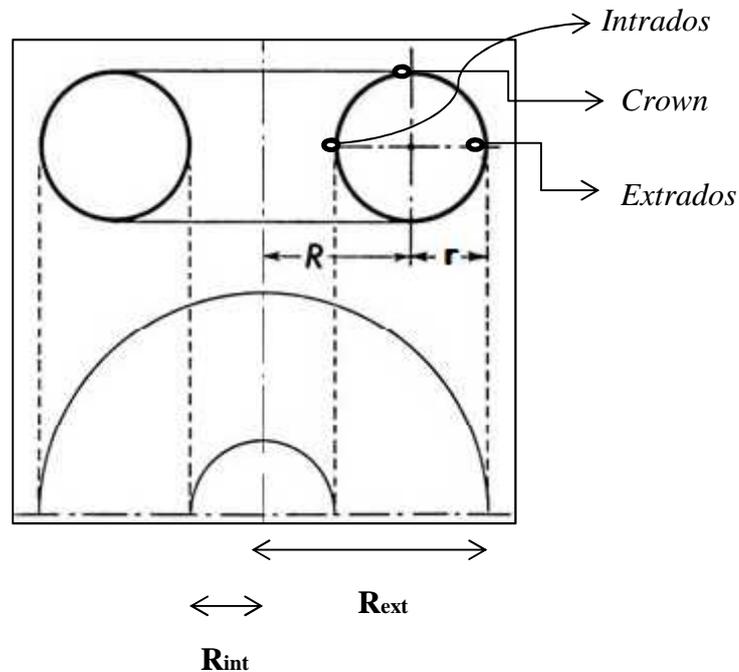
Di antara beberapa material utama konstruksi (baja, beton, kayu, aluminium), baja adalah material yang memiliki regangan maksimum yang besar dan modulus elastisitas yang tinggi.

C. Teori Membran *Shell* Toroidal

Saat ini, bentuk bejana tekan yang paling sering ditemui dalam praktek adalah silinder. Pada dasarnya bejana tekan bentuk toroidal adalah sebuah revolusi dari bentuk silinder. Sebuah toroidal dapat dipandang sebagai sebuah silinder bengkok tanpa ujung. Dibandingkan dengan sebuah silinder yang ekuivalen, sebuah toroidal membutuhkan lebih sedikit material, karena tidak memerlukan tutup pada dua ujungnya.

Bejana tekan toroidal selama ini sedikit mendapat perhatian karena geometrinya yang lebih rumit untuk difabrikasi. Penelitian terhadap perilaku statik maupun dinamik *shell* toroidal telah dilakukan oleh peneliti. Kisioglu (2009) adalah satu dari sedikit peneliti yang telah melakukan investigasi limit tekanan sebuah tabung toroidal untuk LPG kendaraan bermotor di Turki.

Toroidal *shell* diperoleh dengan merotasikan sebuah lingkaran dengan jari-jari r terhadap sumbu vertikal yang berjarak R dari pusat lingkaran yang dapat ditunjukkan pada Gambar 2.1



Gambar 2.1 Geometri Toroidal [Flugge, 1960]

Tegangan *Circumferential (hoop)* σ_φ dan tegangan longitudinal σ_θ masing-masing adalah :

$$\blacktriangleright \sigma_\varphi = \frac{pr}{(r \sin \varphi + R)t} \left(\frac{r}{2} \sin \varphi + R \right) \quad (7)$$

$$\blacktriangleright \sigma_\theta = \frac{pr}{2t} \quad (8)$$

Persamaan (7) menunjukkan bahwa tegangan *hoop* merupakan fungsi dari posisi *circumferential* φ / keliling dan jari-jari kelengkungan R . Dalam persamaan (7), sudut φ diukur dari *crown* menuju *extrados*. Jika φ diukur dari *extrados* menuju *crown*, maka persamaan (7) dapat ditulis menjadi :

$$\bullet \quad \sigma_{\varphi} = \frac{pr \left(\frac{r}{2} \cos \varphi + R \right)}{t (r \cos \varphi + R)} \quad (9)$$

Persamaan (9) dikali $\frac{1}{r}$

$$\bullet \quad \sigma_{\varphi} = \frac{pr \left(\frac{r}{2} \cos \varphi + R \right)}{t (r \cos \varphi + R)} \times \frac{1}{r} \quad (10)$$

$$\bullet \quad \sigma_{\varphi} = \frac{\frac{pr}{t} \left(\frac{\cos \varphi}{2} + \frac{R}{r} \right)}{\left(\cos \varphi + \frac{R}{r} \right)} \quad (11)$$

Dimana :

$\rho = \frac{R}{r}$ = Perbandingan jari-jari

R = Jari-jari kelengkungan

r = Jari-jari penampang

$$\bullet \quad \sigma_{\varphi} = \frac{\frac{pr}{t} \left(\frac{\cos \varphi}{2} + \rho \right)}{\left(\cos \varphi + \rho \right)} \quad (12)$$

Persamaan (12) dikali $\frac{2}{2}$

$$\bullet \quad \sigma_{\varphi} = \frac{\frac{pr}{t} \left(\frac{\cos \varphi}{2} + \rho \right)}{\left(\cos \varphi + \rho \right)} \times \frac{2}{2} \quad (13)$$

$$\bullet \quad \sigma_{\varphi} = \frac{pr (\cos \varphi + 2 \rho)}{2t (\cos \varphi + \rho)} \quad (14)$$

Pada *Extrados*, $\varphi = 0^\circ$, Maka :

$$\bullet \quad \sigma_{\varphi} = \frac{pr (1 + 2 \rho)}{2t (1 + \rho)} \quad (14a)$$

Pada *Crown*, $\varphi = 90^\circ$

$$\bullet \quad \sigma_{\varphi} = \frac{pr}{2t} \cdot 2 = \frac{pr}{t} \quad (14b)$$

Pada *Intrados*, $\varphi = 180^\circ$

$$\bullet \quad \sigma_{\varphi} = \frac{pr (2\rho - 1)}{2t (\rho - 1)} \quad (14c)$$

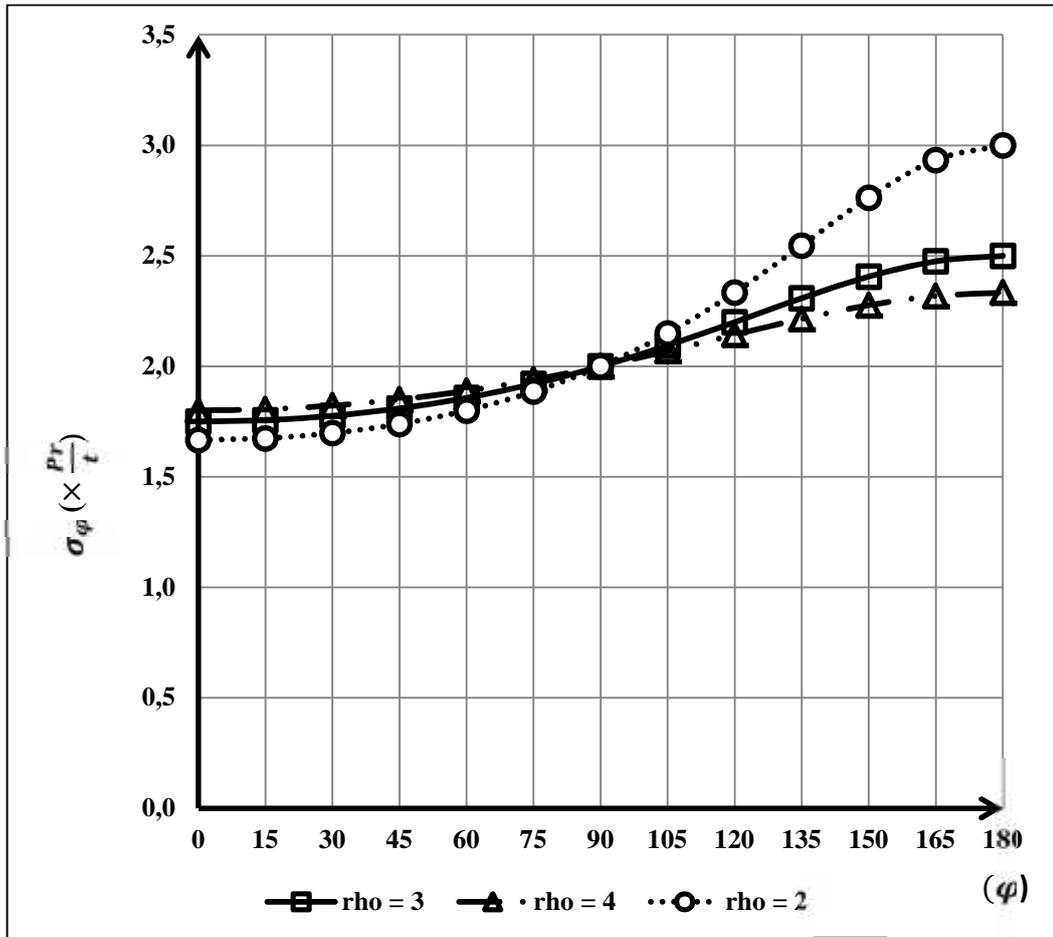
Persamaan (14) memungkinkan bahwa *stress* terbesar terdapat pada *intrados*.

Hal ini dapat dibuktikan pada beberapa fungsi ρ pada Tabel 2.1 :

Tabel 2.1 Fungsi (R/r) atau ρ pada bagian *extrados*, *intrados*, dan *crown*

θ	$\rho = \frac{R}{r}$	$\rho = \frac{R}{r}$	$\rho = \frac{R}{r}$
	$\rho = 2$	$\rho = 3$	$\rho = 4$
0	1,6667	1,7500	1,8000
15	1,6743	1,7564	1,8055
30	1,6978	1,7760	1,8220
45	1,7388	1,8093	1,8498
60	1,8000	1,8571	1,8889
75	1,8854	1,9206	1,9392
90	2,0000	2,0000	2,0000
105	2,1486	2,0944	2,0692
120	2,3333	2,2000	2,1429
135	2,5469	2,3084	2,2147
150	2,7637	2,4058	2,2763
165	2,9341	2,4749	2,3184
180	3,0000	2,5000	2,3333

Kemudian dapat digambarkan grafik tegangan maksimum *hoop stress* yang terjadi pada bagian *intrados*, *extrados* dan *crown* pada Gambar 2.2



Gambar 2.2 Distribusi tegangan *circumferential* (hoop) σ_ϕ dalam membrane *shell* toroidal akibat *internal pressure*

Jika σ_y adalah *yield stress* dan p_y adalah *internal pressure*. Maka untuk mencapai tegangan yield adalah :

$$\bullet \quad p = \frac{2\sigma_y t (\rho - 1)}{r (2\rho - 1)} \quad (15)$$

$$\bullet \quad p_y = \frac{2\sigma_y t}{r} \left(\frac{\rho - 1}{2\rho - 1} \right) \quad (16)$$

D. Pengertian dan Volume Torus / Toroidal

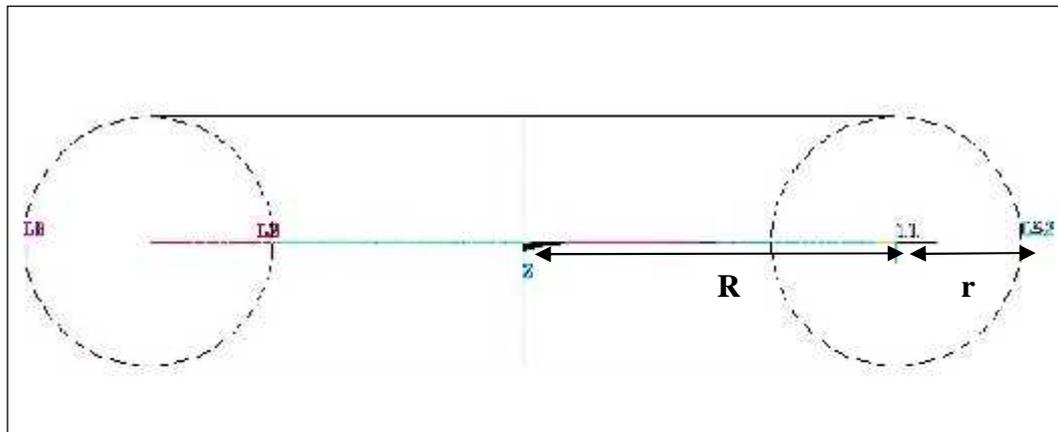
Torus (*Tori* dalam bentuk jamak) dalam ilmu geometri adalah suatu permukaan yang tercipta akibat gerakan rotasi atau revolusi dari suatu lingkaran yang berputar dalam ruang tiga dimensi (dengan sumbu putar yang berada secara koplanar/se-bidang dengan lingkaran itu sendiri).

Bentuk torus yang solid (padat) sering disebut sebagai toroid yang banyak dijumpai pada bentuk induktor dan transformator listrik. Contoh lain dari objek berbentuk toroid adalah kue donat, (bola) pelampung penyelemat diri di air laut (yang tersedia di kapal laut maupun pesawat udara), cincin O dan cincin Vortex.



Gambar 2.3 Contoh ban dalam mobil sebagai bentuk toroid

Berdasarkan definisi/pengertian sebelumnya, 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 seperti terlihat pada Gambar 2.4



Gambar 2.4 Jari-jari Toroid/Torus

Pada dasarnya torus/toroidal merupakan modifikasi dari bentuk silinder. Oleh karena itu dalam menentukan volume toroidal, kita dapat mengasumsikan keliling lingkaran toroidal dengan jari-jari (R) dianggap sebagai tinggi silinder. Sedangkan luas penampang toroidal dengan jari – jari (r) dapat dianggap sebagai luas alas silinder. Atau dengan kata lain volume torus/toroidal adalah :

$$\text{Volum Torus} = (\pi r^2)(2\pi R) \quad (17)$$

Secara lengkap penjelasan mengenai volume torus/toroidal ini dapat dijabarkan sebagai berikut: Bila diiris sebuah torus atau toroidal menjadi dua bagian seperti terlihat pada Gambar 2.5.

- $Area = \pi (4R\sqrt{r^2 - y^2})$
- $Area = 4\pi R\sqrt{r^2 - y^2}$ (18)

E. Teori Kegagalan

Permasalahan yang sering dihadapi oleh para *engineer* adalah memilih material yang tepat dan lebih spesifik karena berpengaruh terhadap kegagalan dari material tersebut. Untuk material bejana tekan yang biasanya terbuat dari material ulet, terdapat dua teori kegagalan yang sering dipakai yaitu teori Tresca dan teori Von Mises.

1. Teori Tegangan Geser Maksimum (Teori Tresca)

Henri Tresca mengemukakan teori tegangan geser maksimum atau *tresca yield criterion* pada tahun 1968. Untuk tegangan dua sumbu (*Plane Stress*) seperti dialami oleh kebanyakan struktur bejana tekan, teori Tresca dapat ditulis sebagai berikut :

- $\left| \frac{\sigma_1}{\sigma_y} \right| \leq 1$ atau $\left| \frac{\sigma_2}{\sigma_y} \right| \leq 1$ (19)

Persamaan (19) berlaku untuk tegangan yang bertanda sama (sama-sama tarik atau tekan).

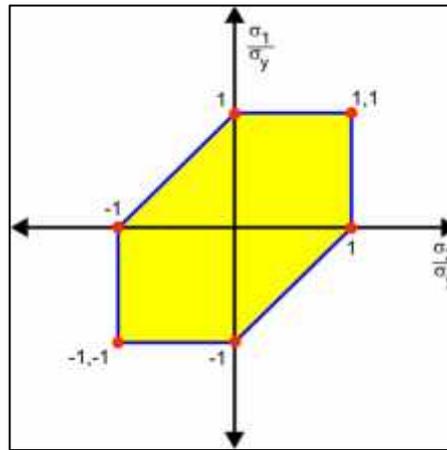
- $\left| \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{\sigma_y} \right| \leq 1$ (20)

Kemudian untuk persamaan (19) σ_1 dan σ_2 berlaku untuk tegangan yang berlawanan tanda. Untuk tangki toroidal, σ_1 adalah Tegangan *Circumferential (hoop)* dan σ_2 adalah tegangan longitudinal, masing-masing adalah :

- $1 = \frac{pr(\cos \phi + 2\rho)}{t(2\cos \phi + 2\rho)}$ (21)

- $\sigma_2 = \frac{pr}{2t}$ (22)

Karena σ_1 dan σ_2 bertanda sama, maka kedua tegangan ini adalah tarik. Menurut teori Tresca untuk sebuah tangki toroidal, untuk kedua persamaan (19) dapat digambarkan pada sebuah diagram kegagalan sebagai berikut :



Gambar 2.6 Grafik Teori Tegangan Geser Maksimum

Gambar 2.6 menunjukkan bahwa bila sebuah struktur mekanik mengalami *stress* diluar segienam, maka struktur tersebut telah gagal.

2. Teori Energi Distorsi Maksimum (Kriteria von Mises)

Teori kegagalan ini diperkenalkan oleh Huber (1904) dan kemudian disempurnakan melalui kontribusi Von Mises dan Hencky. Untuk tegangan dua sumbu (*Plane Stress*) seperti dialami oleh kebanyakan struktur bejana tekan, kriteria Von Mises menyatakan bahwa kegagalan terjadi apabila distorsi energi mencapai energi yang sama untuk kegagalan dalam tegangan uniaksial.

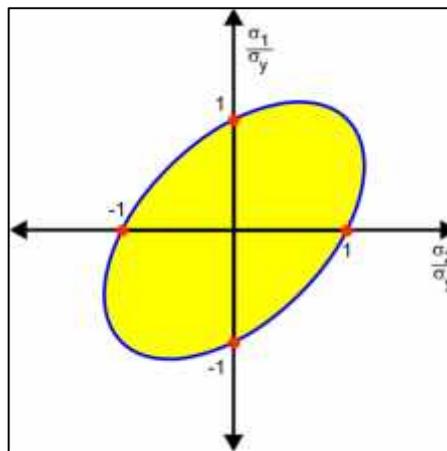
Secara matematis, dapat dinyatakan :

$$\bullet \quad \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \leq \sigma_y^2 \quad (23)$$

Untuk keadaan tegangan bidang atau dua dimensi maka $\sigma_3 = 0$, maka persamaan (23) menjadi :

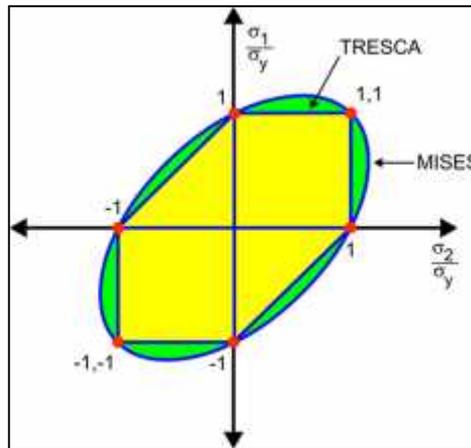
$$\bullet \quad \sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 \leq \sigma_y^2 \quad (24)$$

Persamaan (24) akan menghasilkan grafik seperti diperlihatkan pada Gambar 2.7 Persamaan ini menggambarkan bahwa jika tegangan pada suatu titik di material terletak pada batas atau luar kurva ellips maka material tersebut sudah gagal.



Gambar 2.7 Grafik Teori Energi Distorsi Maksimum

Perbandingan dua kriteria kegagalan dapat dilihat pada Gambar 2.8



Gambar 2.8 Grafik Perbandingan antara Teori Tresca dan Teori Von Mises

Kedua kriteria memberikan hasil yang sama ketika tegangan *principal* yang diberikan sama atau ketika satu dari tegangan *principal* yang diberikan adalah nol dan yang lain memiliki nilai dari σ_y .

F. Integrasi Numerik

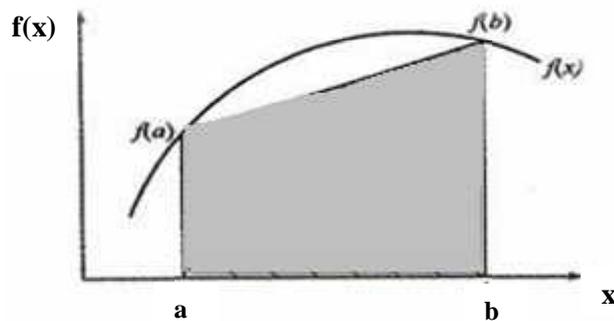
Integrasi numerik mengambil peranan penting dalam masalah sains dan teknik. Hal ini mengingat di dalam bidang sains sering ditemukan ungkapan-ungkapan integral matematis yang tidak mudah atau bahkan tidak dapat diselesaikan secara analitis. Disamping itu, kadang-kadang fungsi yang integralkan tidak berbentuk analitis melainkan berupa titik-titik data. Hal ini sering muncul dalam banyak aplikasi teknik. Oleh sebab itu, kehadiran analisis numerik menjadi penting manakala pendekatan analitis mengalami kebuntuan (Press *et al.*, 1987).

1. Aturan Trapesium

Metode trapesium merupakan metode integrasi numerik yang didasarkan pada luas segmen berbentuk trapesium. Apabila sebuah integral didekati dengan metode trapesium dengan satu segmen saja, maka dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\bullet I = \frac{f(b)+f(a)}{2} (b - a) \quad (25)$$

Persamaan (25) adalah formula untuk luas sebuah trapesium atau disebut aturan trapesium (Lubis, 2012). Hal dapat ditunjukkan pada grafik seperti diperlihatkan pada Gambar 2.9.



Gambar 2.9 Deskripsi secara grafis Aturan Trapesium

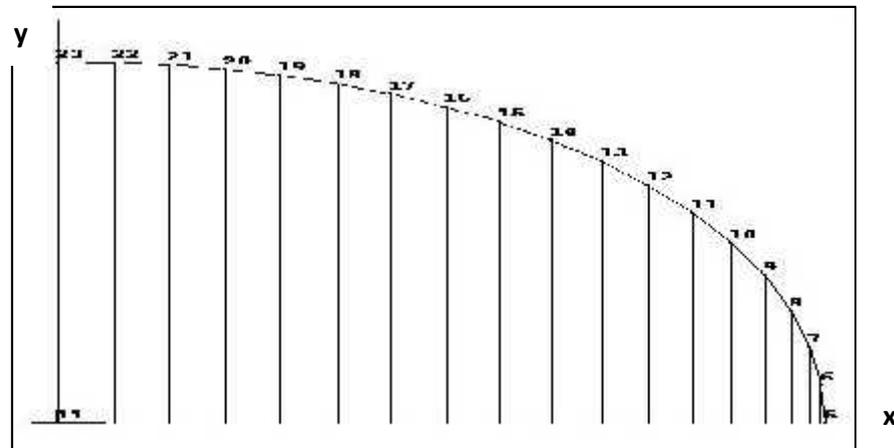
Untuk menyelesaikan integrasi numerik dengan lebar segmen yang tak seragam, maka dilakukan dengan aturan Trapesium untuk masing-masing segmen, kemudian hasilnya dijumlahkan seperti pada persamaan (26) dan (27) :

$$\bullet I = h_1 \frac{f(x_0)+f(x_1)}{2} + h_2 \frac{f(x_1)+f(x_2)}{2} + \dots + h_n \frac{f(x_{n-1})+f(x_n)}{2} \quad (26)$$

dimana :

$$\bullet h = \frac{b-a}{N} \quad (27)$$

Persamaan (26) dapat digunakan pada pada grafik seperti diperlihatkan pada Gambar 2.10



Gambar 2.10 Deskripsi secara grafis Aturan Trapesium untuk Integrasi dengan lebar segmen yang tidak seragam

2. Aturan Simpson

Disamping aturan Trapesium dengan multisegmen, cara lain untuk memperoleh hasil integral yang akurat adalah dengan memakai polinom order tinggi untuk menghubungkan titik-titik. Formula yang dihasilkan dengan cara ini disebut Aturan Simpson. Aturan Simpson dapat dibagi dua cara yaitu :

a. Aturan 1/3 Simpson, dapat ditulis :

$$\bullet \quad I = (b - a) \frac{f(x_0) + 4f(x_1) + f(x_2)}{6} \quad (28)$$

b. Aturan 3/8 Simpson, dapat ditulis :

$$\bullet \quad I = (b - a) \frac{f(x_0) + 3f(x_1) + 3f(x_2) + f(x_3)}{8} \quad (29)$$

G. Dilatasi / Pertambahan Volume Pada Bejana Tekan

Dilatasi atau pertambahan secara radial pada bejana tekan dapat diperoleh dengan mengintegrasikan regangan *hoop* pada dinding bejana terhadap sebuah sumbu melewati pusat rotasi dan sejajar ke sebuah radius (Harvey, 1985). Dalam hal ini maka persamaan dilatasi dapat ditulis :

$$\bullet \quad \delta = r \left(\frac{\sigma_2}{E} - \frac{\nu \sigma_1}{E} \right) \quad (30)$$

dimana :

σ_1 = *longitudinal stress*

σ_2 = *hoop stress*

δ = Deformasi Radial

E = Modulus Elastisitas

ν = Rasio Poison

Untuk tangki toroidal,

$$\bullet \quad \sigma_1 = \frac{pr}{2t} \quad (31)$$

$$\bullet \quad \sigma_2 = \frac{pr (\cos \varphi + 2 \rho)}{2t (\cos \varphi + \rho)} \quad (32)$$