

II. TINJAUAN PUSTAKA

LPG adalah kependekan dari *Liquefied Petroleum Gas*, merupakan gas hasil produksi dari kilang minyak atau kilang gas, yang komponen utamanya adalah gas *propane* (C_3H_8) dan *butane* (C_4H_{10}) yang dicairkan. Pertamina memasarkan LPG sejak tahun 1969 dengan merk dagang ELPIJI.

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 *propane* dan *butane*.

LPG *butane* dan LPG *mix* biasanya dipergunakan oleh masyarakat untuk bahan bakar memasak, sedangkan LPG *propane* biasanya dipergunakan di industri-industri sebagai pendingin, bahan bakar pemotong, untuk menyemprot cat dan lainnya. Pada suhu kamar, LPG akan berbentuk gas. Pengubahan bentuk LPG menjadi cair adalah untuk mempermudah pendistribusiannya. Berdasarkan cara pencairannya, LPG dibedakan menjadi dua, yaitu LPG *Refrigerated* dan LPG

Zat mercaptan biasanya ditambahkan kepada LPG untuk memberikan bau yang khas, sehingga kebocoran gas dapat dideteksi dengan cepat. (*migas indonesai,2009*). Pada suhu dan tekanan atmosfer normal, LPG ada 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 pakai silinder disimpan pada temperatur tinggi, di dekat panas sumber atau di bawah sinar matahari langsung, tekanan LPG dapat meningkat jauh. Peningkatan tekanan dapat menyebabkan tabung LPG meledak dan melepaskan semua isinya. Ketika gas LPG bercampur dengan udara dalam proporsi antara sekitar 2%.sampai 10%, maka akan mudah terbakar. Jika proporsi di luar rentang ini, maka campuran terlalu lemah atau terlalu besar untuk bisa dinyalakan (*migas indonesai,2009*). Oleh karena itu adalah penting untuk memastikan bahwa tabung yang dipakai aman dari berbagai kegagalan, salah satunya adalah kegagalan mekanik.

B. Pengertian Tabung.

Tabung LPG adalah salah satu jenis dari bejana bertekanan, merupakan suatu wadah tertutup yang dirancang untuk menahan gas atau cairan pada tekanan tertentu. Bejana bertekanan secara teoritis dapat menjadi berbagai macam bentuk, tetapi yang biasa digunakan terdiri dari bentuk bola, silinder, dan kerucut. Desain yang umum adalah silinder dengan ujung setengah bola atau elips yang disebut tutup kepala. Bentuk yang lebih rumit jauh lebih sulit untuk dianalisa untuk operasi yang aman dan biasanya jauh lebih sulit untuk membuatnya. Secara teoritis, sebuah bejana berbentuk bola akan lebih baik. Sayangnya, bentuk bulat

sulit untuk diproduksi dan biayanya lebih mahal, sehingga sebagian besar bejanatekan berbentuk silinder dengan ujung berbentuk semi *ellips* 2:1.

C. Hubungan Tegangan-Regangan.

Tegangan adalah gaya yang terbagi oleh luas penampang dari suatu bidang permukaan material dimana gaya tersebut terdistribusi. Secara matematis dapat tegangan dapat dituliskan,

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

dimana:

σ = tegangan (Pa),

F = gaya yang bekerja pada bidang permukaan (N),

A = luas penampang bidang suatu material (m²).

Sedangkan regangan adalah jumlah deformasi yang terjadi per satuan panjang.

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

dimana:

ϵ = regangan,

δ = deformasi

L = panjang material (m).

Hubungan antara tegangan dan regangan pertama kali didapatkan oleh Robert Hooke pada tahun 1678 saat meneliti “*ut tensio sic vis*” (semakin besar perpanjangan, semakin besar gaya yang bekerja) dan dikenal sebagai hukum

Hooke,

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

dimana E adalah elastisitas material yang diberi pembebanan. Namun, Hukum Hooke ini hanya menggambarkan hubungan yang linier diagram tegangan-regangan dan hanya akan valid untuk material yang diberi beban uniaksial. Barulah pada 1807, Thomas Young memperkenalkan rasio tegangan-regangan untuk mengetahui kekakuan material. Rasio ini dikenal dengan “Modulus Young” atau “Modulus Elastisitas”. Modulus Young dituliskan sebagai,

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (4)$$

Modulus yang serupa atau yang dikenal juga dengan modulus geser atau modulus kekakuan (*modulus of rigidity*) menghubungkan antara tegangan geser (τ) dan regangan geser (γ).

$$G = \frac{\tau}{\gamma} \quad (5)$$

Dengan nilai τ didapatkan dari persamaan:

$$\tau = \frac{V}{A} \quad (6)$$

dimana V adalah gaya geser yang bekerja pada bidang permukaan material.

Untuk material yang diberi pembebanan searah disamping mengalami regangan yang paralel juga akan mengalami regangan tegak lurus dengan arah pembebanan. Rasio regangan tegak lurus atau lateral terhadap regangan aksial disebut dengan

rasio Poisson setelah diperkenalkan oleh Simeon D. Poisson pada tahun 1811. Secara matematis, rasio Poisson dapat dituliskan,

$$\nu = -\frac{\epsilon_t}{\epsilon_a} \quad (7)$$

dimana:

ν = rasio Poisson

ϵ_t = regangan lateral

ϵ_a = regangan aksial

Saat regangan lateral dan regangan aksial memiliki arah yang berbeda, tanda negatif pada persamaan (7) akan memberikan nilai ν yang positif. Seperti halnya modulus elastisitas dan modulus geser, rasio Poisson juga merupakan sifat dari suatu material. Hubungan di antara ketiganya ditunjukkan oleh persamaan (8) sebagai berikut:

$$E = 2(1 + \nu)G \quad (8)$$

Oleh karena itu, rasio Poisson merupakan suatu konstanta untuk tegangan material di bawah batas proporsional dan memiliki nilai 1/4 atau 1/3 untuk kebanyakan material. Dengan menggunakan rasio Poisson, regangan utama pada untuk material isotropik dengan arah triaksial dapat dinyatakan dengan menggunakan persamaan:

$$\epsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)] \quad (9.a)$$

$$\epsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)] \quad (9.b)$$

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)] \quad (9.c)$$

Saat persamaan (9.a, b, dan c) diubah dalam bentuk tegangan, maka:

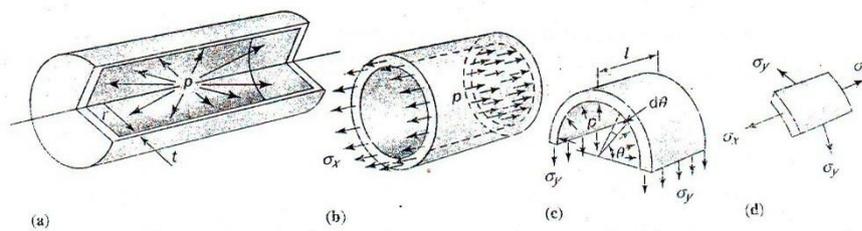
$$\sigma_x = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} [(1 - \nu)\epsilon_x + \nu(\epsilon_y + \epsilon_z)] \quad (10.a)$$

$$\sigma_y = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} [(1 - \nu)\epsilon_y + \nu(\epsilon_z + \epsilon_x)] \quad (10.b)$$

$$\sigma_z = \frac{E}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} [(1 - \nu)\epsilon_z + \nu(\epsilon_x + \epsilon_y)] \quad (10.c)$$

D. Teori Membran *Shell* Silindris

Shell dianggap mempunyai dinding tipis saat rasio antara ketebalan dengan jari jari *shell* sangat kecil, sehingga distribusi tegangan normal pada bidang tegak lurus terhadap permukaan *shell* akan bernilai sama meliputi seluruh ketebalan *shell*. Pada kenyataanya, nilai tegangan akan bervariasi dari nilai maksimum pada bagian permukaan dalam ke nilai minimum pada bagian permukaan luar *shell*. Akan tetapi, perbedaan nilai tegangan tersebut dapat diabaikan apabila rasio ketebalan dengan jari jari *shell* bernilai lebih kecil daripada 0,1. Boiler, tangki penyimpanan gas, sistem perpipaan, dan bejana tekan biasanya dianalisa sebagai *shell* dinding tipis. Sebuah membran *shell* silindris yang mengalami pembebanan berupa tekanan dalam diperlihatkan oleh Gambar 2 sebagai berikut:



Gambar 2.Membran *shell* silindris

Pada *shell* bentuk silindris, komponen tegangan normal pada bidang longitudinal

dikenal dengan istilah tegangan keliling (*hoop stress*) yang dinotasikan dengan σ_h . Sedangkan komponen tegangan normal pada arah aksial dinotasikan dengan σ_a . Tidak terjadi tegangan geser pada bidang tegak lurus maupun bidang sejajar dengan permukaan *shell*. Jika tabung dipotong seperti pada gambar 2c, maka gaya yang bekerja pada arah *circumferential* akan sama besar nilainya dengan tegangan *hoop* sehingga dapat ditulis:

$$2\sigma_h L t = p 2rL \quad (11)$$

dimana:

p = tekanan pada permukaan dalam *shell* silindria (MPa)

L = panjang *shell* (mm)

r = jari-jari *shell* (mm)

t = tebal *shell* (mm)

Sehingga dari persamaan (10) besar tegangan keliling dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan:

$$\sigma_h = \frac{pr}{t} \quad (12)$$

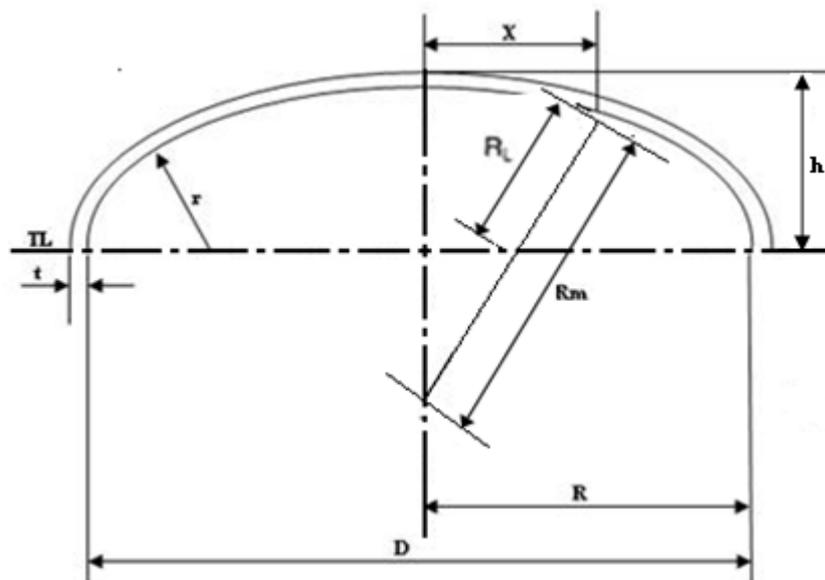
Dalam arah aksial, Gambar 2b tekanan aksial dari bagian dipotongakan menghasilkan gaya aksial total $p(\pi r^2)$ yaitu luas penampang kali tekanan internal. Secara umum diasumsikan bahwa r adalah jari-jari dalam. Gaya aksial aksial ditentang oleh *stress* aksial di dalam dinding pembuluh yang mempunyai ketebalan dari t . Beban aksial total di dinding akan menjadi $\sigma_a(2\pi r t)$. Karena penampang dalam equilibrium kedua gaya aksial harus sama, memberikan:

$$p(\pi r^2) = \sigma_a(2\pi r t)$$

$$\sigma_a = \frac{pr}{2t} \quad (13)$$

E. Teori Membran *Shell Ellipsoidal*

Pada bejana tekan *ellipsoidal* tegangan yang terjadi dibagi menjadi 3 (tiga) bagian. Pada *Crown*, pada *Equator*, dan pada dinding *shell* antara *Crown* dan *Equator*. Seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Skema tegangan yang terjadi pada *Ellipsoidal Pressure Vessel*

(Dennis Moss, 2004)

1. *Crown*

Bagian ini terletak pada dasar maupun bagian atas bejana tekan. Pada bagian ini tegangan pada arah *longitudinal* (σ_x) sama nilainya dengan *hoop stress* (σ_ϕ) Sehingga secara matematis dapat dituliskan dalam bentuk persamaan sebagai

berikut:

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \sigma_\phi \\ \sigma_x = \sigma_\phi &= \frac{pR^2}{2th}\end{aligned}\quad (14)$$

2. Pada jarak X

Bagian ini berada pada daerah antara *Crown* dan *Equator*. Untuk tegangan arah *longitudinal* (σ_x) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\sigma_x = \frac{pR_L}{2t}\quad (15)$$

Sedangkan untuk tegangan *hoop stress* (σ_ϕ) yaitu:

$$\sigma_\phi = \frac{pR_L}{t} \left(1 - \frac{R_L}{2R_m}\right)\quad (16)$$

Dimana:

$$R_L = \sqrt{\frac{R^2}{h^2} + x^2} \left(1 - \frac{R^2}{h^2}\right)\quad (17)$$

$$R_m = \frac{R_L^3 h^2}{R^4}\quad (18)$$

3. Daerah *Equator*

Equator merupakan bagian yang berada persis ditengah-tengah garis khayal yang membagi bejana *ellips* menjadi 2(dua) bagian atau garis yang memisahkan antara bentuk silinder dan *ellips* bada bejana tekan. Untuk tegangan arah *longitudinal* (σ_x) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\sigma_x = \frac{pR}{2t} \quad (19)$$

Untuk tegangan keliling (*Hoop stress*):

$$\sigma_\phi = \frac{pR}{t} \left(1 - \frac{R^2}{2h^2} \right) \quad (20)$$

Dimana:

$$R_L = R \quad (21)$$

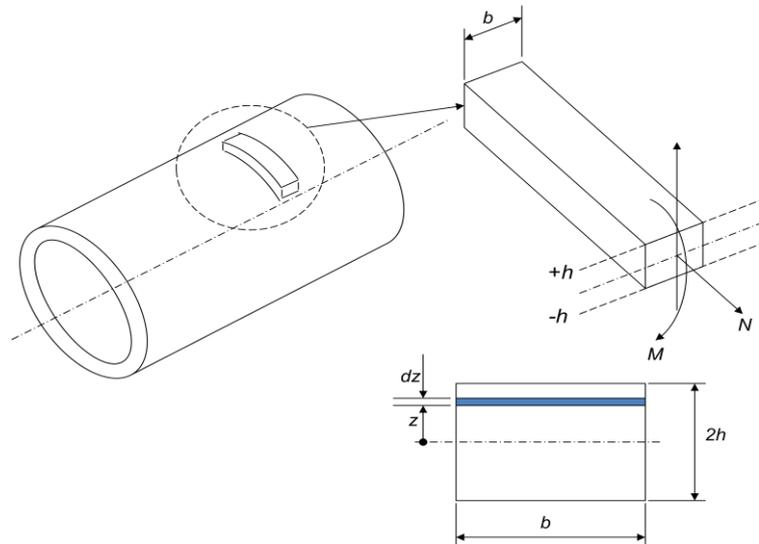
$$R_m = \frac{h^2}{R} \quad (22)$$

F. Limit Momen

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

Mekanisme kegagalan plastis (*plastic collapse*) mengikuti kaidah model plastis sederhana, yaitu tegangan diatas batas luluh suatu komponen tidaklah mungkin terjadi. Sebuah batas pasti dicapai saat tidak ada lagi tegangan yang dapat diterima dan akhirnya komponen tersebut pun mengalami kegagalan. Beban maksimum yang dapat diterima oleh komponen sebelum mengalami kegagalan disebut *limit load*. Oleh sebab itu, para perancang harus benar-benar menghitung besarnya nilai *limit load* yang akan mereka buat, serta membatasi jumlah beban yang harus diterima oleh komponen tersebut agar tidak 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 4.



Gambar 4. Dinding silinder yang dianalisa sebagai *beam*

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

$$M = F.z = \int_{-h}^h \sigma A.z = \int_{-h}^h \sigma b.dz.z = b \int_{-h}^h \sigma z.dz \quad (23)$$

$$N = \int_{-h}^h \sigma.A = \int_{-h}^h \sigma.bdz = b \int_{-h}^h \sigma.dz \quad (24)$$

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

$$\sigma(z) = \frac{N}{A} + \frac{Mz}{I} \quad (25)$$

dengan :

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

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

Asumsikan bahwa material bersifat *elastic-perfectly plastic* dengan *yield stress* sebesar σ_y , dan tegangan sebesar N , maka *yield* pertama kali akan terjadi akibat tegangan pada lapisan terluar ($z = +h$), ketika

$$\frac{N}{2bh} + \frac{3}{2} \frac{M}{bh^2} = \sigma_y \quad (26)$$

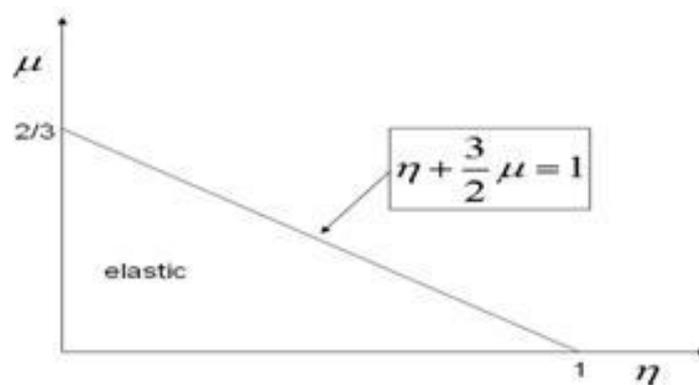
atau

$$\eta + \frac{3}{2}\mu = 1 \quad (27)$$

dimana

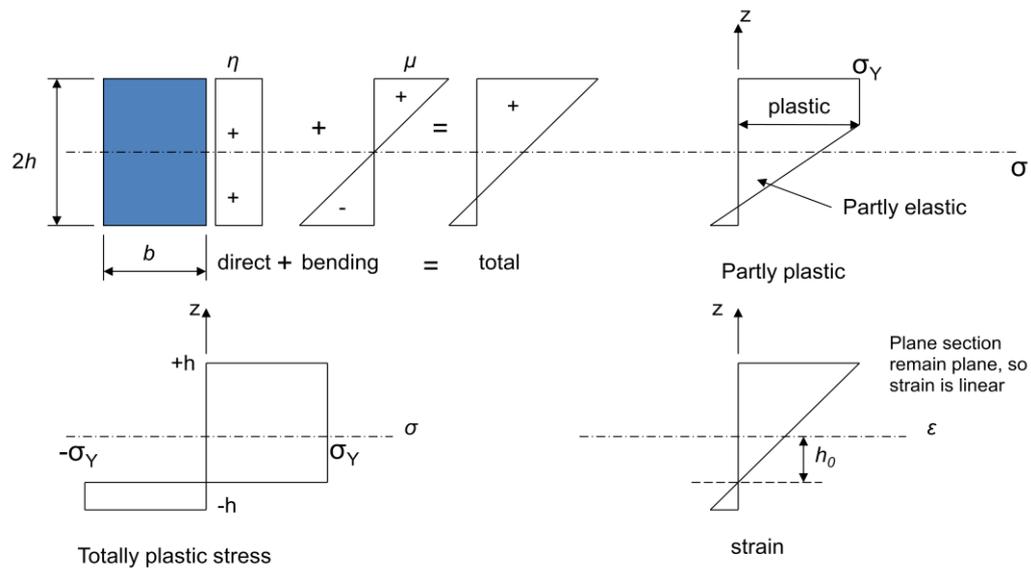
$$\eta = \frac{N}{2bh\sigma_y} \quad \text{dan} \quad \mu = \frac{M}{bh^2\sigma_y} \quad (28)$$

Kondisi awal *yield* (*initial yield condition*) yang dapat diamati pada Gambar 5.



Gambar 5. Kondisi awal *yield*

Jika beban semakin bertambah, plastisitas akan menyebar ke seluruh dinding pipa (dalam hal ini diamati sebagai *beam*) seperti terlihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Pertambahan plastisitas di dalam *beam*

Secara matematis, distribusi tegangan dapat ditulis sebagai:

$$\sigma(z) = \begin{cases} \sigma_Y & \text{untuk } z > -h_0 \\ -\sigma_Y & \text{untuk } z < -h_0 \end{cases}$$

Dari persamaan (23) diperoleh:

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

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

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

$$M = b \sigma_Y (h^2 - h_0^2)$$

(29)

Dan dari persamaan (24) diperoleh:

$$\begin{aligned}
 N &= b \int_{-h}^h \sigma \cdot dz = b \left[\int_{-h}^{-h_0} (-\sigma_Y) dz + \int_{-h_0}^h \sigma_Y \cdot dz \right] \\
 N &= b \sigma_Y \left(-z \Big|_{-h}^{-h_0} + z \Big|_{-h_0}^h \right) \\
 N &= b \sigma_Y [(h_0 - h)(h + h_0)] \\
 N &= 2b \sigma_Y h_0 \quad \Rightarrow \quad h_0 = \frac{N}{2b \sigma_Y} \tag{30}
 \end{aligned}$$

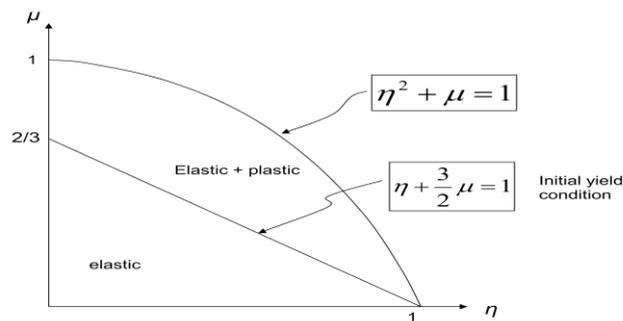
Dengan mensubstitusikan persamaan (29) dan (30), dapat diketahui bahwa :

$$\begin{aligned}
 M &= b \sigma_Y \left(h^2 - \left(\frac{N}{2b \sigma_Y} \right)^2 \right) \\
 \frac{M}{b \sigma_Y} &= h^2 \left(1 - \frac{N^2}{4b^2 h^2 \sigma_Y^2} \right) \\
 \frac{M}{\sigma_Y b h^2} + \left(\frac{N}{2bh \sigma_Y} \right)^2 &= 1 \quad \Rightarrow \quad \text{kondisi batas (limit condition)} \tag{31}
 \end{aligned}$$

Persamaan (30) dan (31) dapat ditulis sebagai:

$$\mu + \eta^2 = 1 \tag{32}$$

Kondisi awal *yield* dan kondisi batas ditunjukkan dalam diagram interaksi, dan kondisi batas pada diagram interaksi ini disebut *limit surface* seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Diagram Interaksi

Dari diagram interaksi, kita perlu memiliki kondisi :

$$\left. \begin{array}{l} \frac{M}{\sigma_y b h^2} < 1 \\ \frac{N}{2\sigma_y b h} < 1 \end{array} \right\} \quad (33)$$

Limit load untuk *beam* dalam keadaan bending (*limit moment*), M_L dapat diperoleh dari persamaan (31) dengan memasukkan nilai $N = 0$:

$$M_L = \sigma_y b h^2 \quad (34)$$

Yield moment pertama, M_Y dapat diperoleh dari persamaan (27) dengan memasukkan nilai $N = 0$:

$$M_Y = \frac{2}{3} \sigma_y b h^2 \quad (35)$$

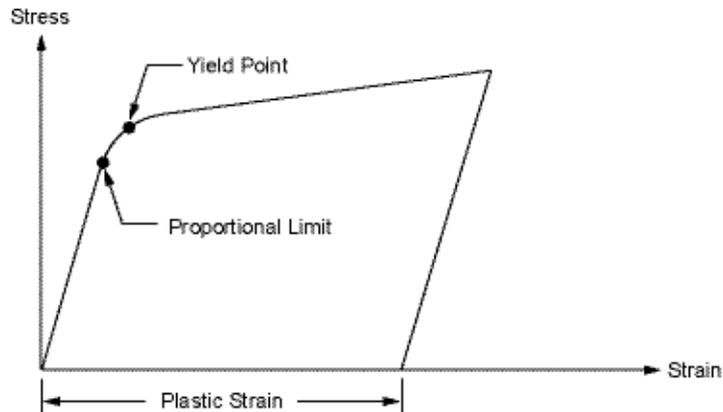
Dari dua persamaan terakhir, dapat diketahui bahwa :

$$\frac{M_L}{M_Y} = 1.5 \quad (36)$$

G. Plastisitas.

Kebanyakan material yang digunakan pada bidang teknik menunjukkan hubungan linier antara tegangan dan regangan hingga pada suatu level yang disebut dengan batas proporsional (*proportional limit*). Setelah melewati batas ini, hubungan antara tegangan dan regangan akan menjadi nonlinier, tetapi tidak juga menjadi kaku. Perilaku plastis, digambarkan oleh regangan yang tidak bisa kembali, yang terjadi saat tegangan melewati titik luluh material (*material's yield point*). Gambar 11 menunjukkan sebuah kurva tegangan regangan dari sebuah material

elastoplastik.



Gambar 8. Kurva tegangan terhadap regangan elastoplastik [ANSYS Inc., 2007]

H. Analisis Struktur *Non linier*.

Struktur *non linier* terjadi pada banyak hal. Sebagai contoh, pada alat *staples* logam akan bengkok secara permanen ke bentuk yang berbeda. Contoh lainnya, saat sebuah rak kayu dibebani dengan beban yang berat, maka lama kelamaan rak akan mengalami lenturan. Begitu juga dengan beban yang diterima oleh sebuah mobil atau truk, akan terjadi perubahan permukaan kontak antara ban dan jalan, sebagai respon terhadap beban yang diberikan.

Terdapat tiga tipe dari nonlinier, yakni:

1. Geometri *non linier*

Saat struktur mengalami deformasi yang besar dan merubah konfigurasi geometri sehingga struktur memberikan tanggapan secara *non linier*.

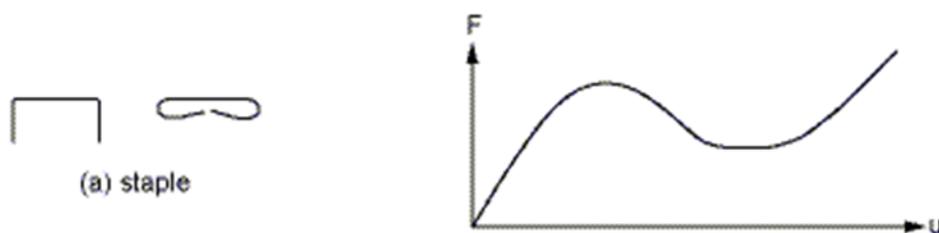
2. Material *non linier*

Saat *plastisitas*, keretakan, atau *viskoelastisitas* terjadi pada sebuah struktur. Faktor yang memengaruhi perilaku properti material meliputi beban (seperti pada tanggapan material *elastic-perfectly plastic*), kondisi

lingkungan, dan periode pembebanan.

3. Kondisi batas *nonlinier* (perubahan status)

Yakni saat masalah ketergantungan terhadap status (*status-dependent*) terjadi. Sebagai contoh, sebuah kabel dengan lendutan atau ketegangan. Perubahan status dapat dihubungkan dengan pembebanan (sebagaimana pada kasus kabel), atau dapat juga ditentukan oleh penyebab dari luar.

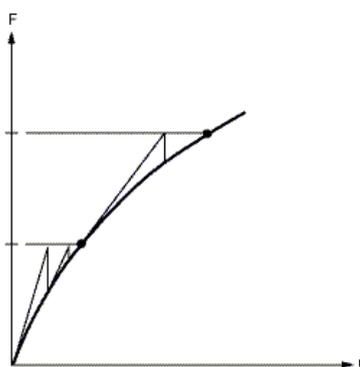


Gambar 9. Contoh perilaku nonlinier

Kombinasi dari ketiga tipe *non linier* tersebut sangat mungkin terjadi. Fenomena pada struktur sebenarnya, seperti deformasi permanen, pengecilan geometri (*necking*), penipisan, tekukan, dan nilai tegangan yang melebihi batas plastisitas, semuanya menunjukkan terjadinya perilaku *non linier*. Terdapat beberapa alasan mengapa para insinyur menghindari penyelesaian kasus *non linier*. Pada beberapa situasi terkadang sangat sulit untuk mengetahui permasalahan yang sebenarnya. Pada sebuah kasus, terjadi ketiadaan sumber atau *software* FE yang teliti. Pada beberapa kasus lainnya, analisis tidak dapat dilakukan karena tidak terdapatnya properti material yang dibutuhkan serta pembebanan dan kondisi batas yang kurang jelas, yaitu saat terjadi kontak antara dua bagian dengan lokasi kontak yang tidak diketahui [ANSYS Inc., 2007].

I. Metode Newton-Raphson.

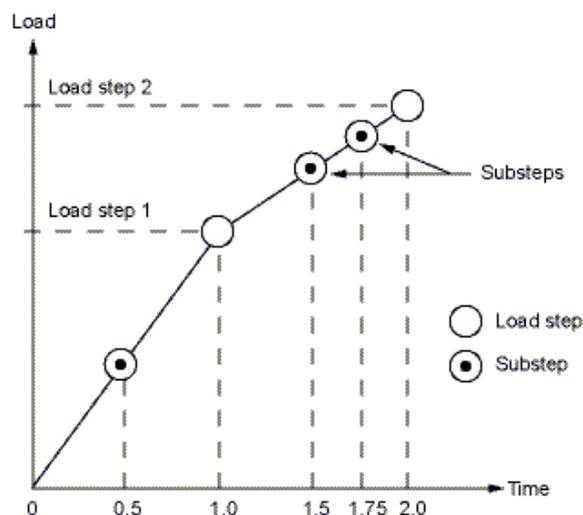
Metode “*Newton-Raphson*” biasa digunakan dalam penyelesaian permasalahan *non linier*. Pada metode ini, beban dibagi ke dalam rangkaian peningkatan pembebanan. Peningkatan beban tersebut dapat digunakan pada setiap langkah pembebanan. Gambar 10 mengilustrasikan penggunaan iterasi kesetimbangan *Newton-Raphson* pada analisis *nonlinier* dengan satu DOF.



Gambar 10.Metode *Newton-Raphson* untuk solusi nonlinier

Sebelum memberikan solusi, metode *Newton-Raphson* mengevaluasi simpangan dari *vektor* beban kesetimbangan yang mana perbedaan antara gaya yang diperbaiki (beban yang berhubungan dengan tegangan elemen) dan gaya yang diterapkan. Metode ini memberikan solusi *non linier* dengan menggunakan simpangan beban kesetimbangan dan memeriksa konvergensi yang terjadi. Jika kriteria konvergensi tidak memuaskan, simpangan beban kesetimbangan akan dievaluasi ulang, matrik kekakuan diperbarui sehingga didapatkan solusi yang baru. Prosedur iterasi akan terus dilanjutkan sampai terjadi konvergensi solusi. Untuk lebih mempermudah, saat suatu program untuk analisa elemen hingga digunakan, analisis *non linier* akan diatur ke dalam tiga *level* operasi sebagai berikut:

- *Level* atas, berupa langkah pembebanan (*load step*) yang ditentukan secara eksplisit sepanjang suatu periode waktu tertentu. Beban diasumsikan bervariasi secara *linier* dengan beberapa langkah pembebanan (untuk analisa statik).
- Dalam setiap langkah pembebanan, program dapat diarahkan untuk mendapatkan beberapa solusi (*substep* atau langkah waktu) untuk menerapkan beban secara berangsur-angsur.
- Pada setiap *substep*, program akan memberikan beberapa iterasi kesetimbangan untuk mendapatkan solusi konvergen.



Gambar 11. *Load step, substep, dan time* [ANSYS Inc., 2007]

J. Teori Kegagalan

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

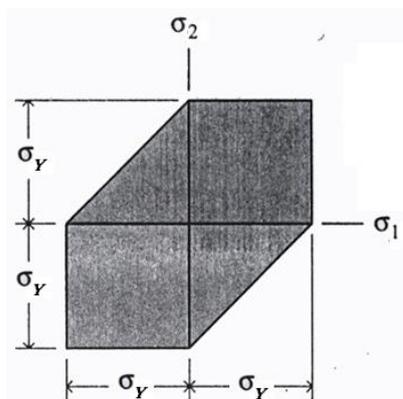
Teori tegangan geser maksimum memperkirakan kegagalan spesimen yang mengalami beban kombinasi terjadi saat tegangan geser maksimum pada suatu titik mencapai tegangan luluh hasil uji tarik atau uji tekan dari suatu material yang sama. Secara matematis, teori tegangan geser maksimum dapat dituliskan:

$$\tau_{max} = \tau_y \quad (37)$$

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

$$\tau_y = \frac{\sigma_y}{2} \quad (38)$$

dimana σ_y adalah tegangan luluh untuk pembebanan uniaksial. Grafik dari teori tegangan maksimum untuk sebuah elemen yang mengalami tegangan biaksial diperlihatkan pada Gambar 12.



Gambar 12. Grafik teori tegangan geser maksimum [Riley, 1999]

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

$$\tau_{\max} = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (39.a)$$

$$= \frac{\sigma_1}{2} \quad (\text{kuadran pertama}) \quad (39.b)$$

$$= \frac{\sigma_2}{2} \quad (\text{kuadran ketiga}) \quad (39.c)$$

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. Pada kuadran keempat, batas garis tegangan adalah:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = \sigma_Y \quad (40)$$

dan pada kuadran kedua adalah:

$$\sigma_1 - \sigma_2 = -\sigma_Y \quad (41)$$

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

Teori energi distorsi maksimum menyatakan bahwa kegagalan sebuah spesimen yang mengalami beban kombinasi terjadi saat 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:

$$u = \frac{\sigma^2}{2E} = \frac{\sigma \varepsilon}{2} \quad (42)$$

dimana u 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,

$$u = \frac{1}{2}(\sigma_1 \varepsilon_1 + \sigma_2 \varepsilon_2 + \sigma_3 \varepsilon_3) \quad (43)$$

Bila regangan diubah dalam bentuk teganganakan menjadi,

$$u = \frac{1}{2}[\sigma_1^2 + \sigma_2^2 + \sigma_3^2 - 2\nu(\sigma_1 \sigma_2 + \sigma_2 \sigma_3 + \sigma_3 \sigma_1)] \quad (44)$$

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

$$u_v = \frac{1-2\nu}{6E}[\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3]^2 \quad (45)$$

Sedangkan energi yang dihasilkan dari distorsi dapat ditentukan dengan

persamaan:

$$u_d = \frac{1+\nu}{6E} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \quad (46)$$

Teori kegagalan energi distorsi maksimum mengasumsikan bahwa perilaku tegang (*inelastic action*) akan terjadi saat energi distorsi yang ditunjukkan pada persamaan (40) melebihi nilai batas yang didapatkan dari 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,

$$(u_d)_Y = \frac{1+\nu}{3E} \sigma_Y^2 \quad (47)$$

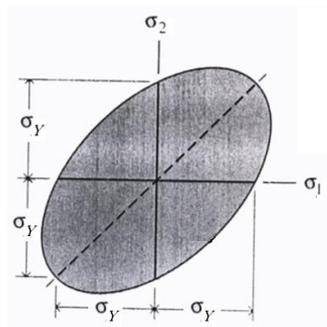
dan bila persamaan (45) disubstitusi ke persamaan (46), maka didapatkan persamaan untuk kegagalan akibat peluluhan sebagai berikut,

$$2\sigma_Y^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \quad (48)$$

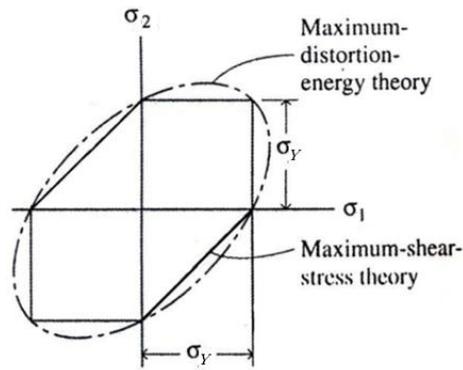
Bila kondisi tegangan bidang terjadi, dengan mengasumsikan σ_3 bernilai 0, persamaan (48) menjadi,

$$\sigma_1^2 - \sigma_1\sigma_2 + \sigma_2^2 = \sigma_Y^2 \quad (49)$$

Persamaan (43) akan menghasilkan grafik seperti diperlihatkan pada Gambar 13. Perbandingan grafik antara teori kegagalan tegangan geser maksimum dan teori kegagalan energi distorsi maksimum diperlihatkan pada Gambar 14.



Gambar 13. Grafik teori energi distorsi maksimum



Gambar 14. Grafik perbandingan antara teori *Tresca* dan teori *vonMises* [Riley, 1999]

K. Teori Gas Ideal

Ukuran (*volume*) suatu molekul cenderung tidak bergantung pada kondisi tekanan dan temperatur. Ukuran suatu molekul juga cenderung relatif tetap atau sama ketika molekul tersebut berada dalam keadaan sebagai fasa gas, fasa cair maupun fasa padat. Yang berubah sejalan tekanan dan temperatur adalah jarak antar molekul dan kecepatan gerak tiap molekul. Ketika temperatur suatu fasa gas (yang tersusun dari n molekul) meningkat, maka kandungan energi kinetik yang dimiliki tiap molekul penyusun fasa tersebut juga meningkat, sehingga kecepatan gerak tiap molekul tersebut juga meningkat. Ketika n molekul tersebut terlingkup dalam ruang *rigid* tertutup dengan volume tetap (V), maka kenaikan temperatur fasa akan diikuti dengan kenaikan tekanan fasa gas. Hal ini dapat difahami dengan uraian sebagai berikut:

1. Temperatur meningkat mengakibatkan kecepatan gerak tiap molekul meningkat.
2. Karena n molekul tersebut berada dalam ruang yang tetap, maka gerakan

molekul tersebut dapat dibayangkan sebagai gerakan mondar-mandir (bolak-balik) dari dinding ke dinding ruangan tersebut. Makin tinggi temperatur, berarti makin sering frekuensi tiap molekul untuk membentur dinding.

3. Tekanan fasa gas pada dasarnya adalah tekanan molekul-molekul gas yang dirasakan oleh dinding ruangan. Tekanan adalah gaya per satuan luas.

Gaya yang diberikan oleh molekul gas ke dinding adalah gaya *impact* saat terjadi benturan molekul ke dinding. Makin tinggi temperatur, maka makin tinggi gaya *impact* yang diterima dinding karena makin sering terjadi benturan molekul gas ke dinding, sehingga makin tinggi pula tekanan gas yang dirasakan oleh dinding. Dalam hal ini, luas permukaan dinding adalah tetap karena volume dan bentuk ruang dapat dianggap tetap atau *rigid* (meskipun terjadi perubahan temperatur). Konsep pengertian fasa gas menyatakan bahwa bila sejumlah n molekul gas dimasukkan dalam ruang tertutup dengan volume V , maka seluruh molekul tersebut akan selalu bergerak tersebar menempati seluruh ruang tersebut sehingga dapat dikatakan sejumlah n molekul gas tersebut memiliki volume V . Bila kemudian ke dalam ruang tersebut ditambahkan lagi sejumlah n molekul, maka sejumlah $2n$ molekul gas tersebut akan memiliki volume yang tetap sama yaitu V , tetapi dengan tekanan gas yang lebih tinggi.

Bila suatu tabung silinder LPG (volume tetap) diisi gas, maka tekanan gas dalam tabung tersebut akan meningkat dengan bertambahnya massa gas yang dimasukkan ke silinder tersebut. Dalam percaturan mengenai gas, massa gas seringkali dinyatakan dengan satuan volume pada kondisi rujukan tekanan dan

temperatur tertentu. Jadi, makin banyak massa gas yang dimasukkan ke dalam silinder berarti makin besar pula (dalam satuan volume standar) gas yang berada dalam silinder. Pertambahan massa gas ini tidak mengubah volume silinder, tetapi berakibat pada kenaikan tekanan gas di dalamnya.

Jumlah gas lebih mudah dinyatakan dalam mol dibanding dalam molekul sehingga, secara matematis persamaan gas ideal dapat dituliskan sebagai berikut:

$$PV = nRT \quad (50)$$

dimana:

P = Tekanan (Psi)

V = Volume (m^3)

n = Jumlah molekul (mol)

R = 0,082 (konstanta gas umum)

T = Temperatur (Kelvin)

Menurut Robert Boyle (1627-1691), Pada temperatur konstan maka tekanan (P) lebih besar bila volume (V) kecil. Hal ini berlaku pada hampir semua gas dengan kerapatan rendah.

L. Metode Elemen Hingga Dengan ANSYS

Metode elemen hingga (*finite element method*) adalah prosedur numerik yang dapat dipakai untuk mendapatkan solusi pada permasalahan teknik meliputi analisis tegangan, perpindahan panas, elektromagnetik, dan aliran fluida baik

dalam kondisi stedi, transien, *linier* ataupun *nonlinier*. Dalam penggunaannya, metode ini memiliki beberapa langkah dasar yang digunakan untuk menganalisa permasalahan teknik, meliputi:

1. Tahap *Preprocessing*

Membuat dan memisahkan solusi domain ke dalam elemen hingga, yakni membagi permasalahan ke dalam titik hubung (*node*) dan elemen. Mengasumsikan fungsi bentuk untuk menampilkan karakter fisik elemen, yakni mengasumsikan fungsi kontinu untuk menampilkan solusi perkiraan elemen. Mengembangkan persamaan untuk elemen. Membuat elemen untuk menampilkan seluruh permasalahan. Membangun matrik kekakuan global.

2. Tahap Solusi

Menyelesaikan persamaan aljabar linier ataupun nonlinier secara simultan untuk mendapatkan hasil titik hubung (*nodal results*), seperti perpindahan pada *node* yang berbeda atau nilai temperatur pada *node* yang berbeda dalam permasalahan perpindahan panas.

3. Tahap *Postprocessing*

Memperoleh hasil yang dibutuhkan. Pada tahap ini akan didapatkan nilai tegangan utama, fluk panas, dan lain-lain.

ANSYS merupakan program komputer yang menggunakan metode elemen hingga

untuk tujuan umum yang luas dan mempunyai lebih dari 100.000 baris kode. ANSYS telah dikenal program FEA yang handal dalam menyelesaikan permasalahan teknik selama lebih dari 20 tahun. Versi ANSYS saat ini telah dilengkapi dengan sistem GUI (*graphical user interface*), *dialog boxes* dan *toolbar* sehingga lebih memudahkan para penggunanya. Saat ini, ANSYS telah digunakan di berbagai bidang teknik, seperti bidang ruang angkasa, otomotif, elektronika, dan nuklir [Moaveni, 1999].

M. Faktor Keamanan

Faktor keamanan merupakan suatu nilai yang menyatakan tingkat keamanan suatu struktur, dimana nilai ini merupakan hasil perbandingan antara beban maksimum yang dapat diterima dengan beban yang mengakibatkan yield pertamakali. Secara matematis dapat ditulis:

$$f_k = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_y} \quad (51)$$