

STUDI LIMIT TEKANAN PADA TABUNG LPG 3KG DENGAN METODE ELEMEN HINGGA

Asnawi Lubis^(*), Rudolf S Saragih, dan Ahmad Suudi

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Lampung
Jalan Professor Sumantri Brojonegoro No.1, Gedongmeneng, Bandar Lampung, 35145, Indonesia
Phone: (62-721)3555519, Fax: (62-721)704947, ^(*)E-mail: asnawi-lubis@unila.ac.id

Abstrak

Tulisan ini melaporkan hasil studi numerik dengan metode elemen hingga terhadap limit tekanan internal sebuah tabung LPG 3 kilogram yang dipakai dalam rumah tangga di Indonesia. Dengan mengabaikan efek sambungan las keliling dan handguard, serta dengan asumsi bahwa perilaku material adalah elastic-perfectly-plastic, limit tekanan telah diperoleh dengan analisis nonlinear menggunakan algoritma Newton-Raphson. Limit tekanan telah diperoleh sebesar 1.25 kali tekanan internal untuk mencapai luluh. Tegangan (von Mises) pada saat limit tekanan dicapai diperoleh sebesar 1.75 kali tegangan luluh. Hasil studi ini juga menunjukkan bahwa tekanan operasi tabung LPG 3 kilogram sebesar 2.1 MPa adalah nilai tekanan yang aman dengan faktor keamanan sebesar 2.48. Hasil studi ini dapat digunakan untuk memperkaya materi sosialisasi dan edukasi bagi masyarakat dalam mendukung pemerintah mempercepat konversi energy dari minyak tanah ke gas.

Kata Kunci: tabung LPG, limit tekanan, metode elemen hingga, nonlinear, algoritma Newton-Raphson

1. Pendahuluan

Dalam rangka menekan penggunaan minyak tanah (mitan) untuk rumah tangga dan mengurangi subsidi mitan yang cukup besar, pemerintah Republik Indonesia melaksanakan program pengalihan mitan ke LPG (liquified petroleum gas). Target dari program pengalihan ini yang telah dimulai sejak tahun 2007 adalah tercapainya pengurangan penggunaan mitan sebesar 9.9 juta kilo liter [Republika, 17 Desember 2009]. Hal ini dilakukan pemerintah dengan membagikan paket tabung LPG 3 kg beserta katup (valve) termasuk isi perdana dan kompor gas satu tungku beserta asesorisnya (selang gas dan regulator) secara cuma-cuma kepada rumah tangga dan usaha mikro pengguna mitan.

Percepatan program konversi mitan ke LPG berdampak pada meningkatnya kebutuhan tabung gas yang tidak diimbangi dengan pengadaan (*supply*) tabung gas yang memadai oleh produsen tabung gas dalam negeri. Keterbatasan produsen lokal dalam waktu singkat untuk memenuhi kebutuhan tabung gas sesuai dengan permintaan pemerintah, menyebabkan pemerintah membuka peluang impor. Sementara itu kontrol kualitas bahan baku (*steel plate*) secara umum kurang diperhatikan sehingga dalam pemakaiannya di lapangan banyak produk mengalami kerusakan (*failure*) seperti bocor (*leak*) dan meledak (*burst*).

Kejadian sebuah tabung LPG ukuran 12 kg yang meledak di sebuah rumah tangga di Duren Sawit Jakarta Timur telah menewaskan sepasang suami-istri

dan seorang anak mereka serta melukai tiga orang lainnya [Republika, 17 Desember 2009]. Akibat kejadian ini, tidak sedikit masyarakat yang kemudian menolak program konversi mitan ke LPG. Salah satu alasannya adalah faktor keamanan dari penggunaan LPG sebagai bahan bakar untuk memasak. *Image* di tengah masyarakat adalah bahwa tabung LPG yang saat ini beredar memiliki kualitas yang kurang bagus, sehingga kemungkinan terjadinya ledakan semakin besar.

Di lain pihak, PT Pertamina sebagai salah satu pihak yang bertanggung jawab terhadap pelaksanaan konversi mitan ke LPG menegaskan bahwa tabung LPG yang saat ini beredar di tengah masyarakat telah melalui standar teknis dan Standar Nasional Indonesia (SNI) dan aman digunakan. Untuk lebih meyakinkan masyarakat, Direktorat Jenderal Minyak dan Gas Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) menyebutkan masing-masing SNI untuk setiap barang yang masuk ke dalam paket perdana tersebut: selang dengan SNI 06-7213-2006, kompor gas satu tungku dengan SNI 7368-2007, tabung baja LPG 3kg dengan SNI 1452-2007, regulator tekanan rendah dengan SNI 7369-2007, dan katup tabung baja LPG 3kg dengan SNI 1591-2008.

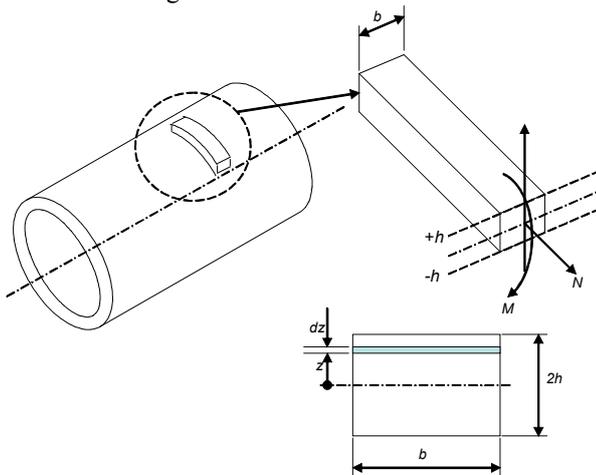
Adalah kenyataan bahwa masyarakat yang menjadi sasaran konversi mitan ke LPG masih memiliki pemahaman dan pengetahuan yang kurang terhadap penggunaan dan keuntungan LPG. Apalagi, ibu rumah tangga dan pelaku usaha kecil yang menjadi sasaran program ini telah puluhan tahun terbiasa menggunakan



mitan untuk memasak. Adalah tidak mudah untuk mengubah pola kebiasaan tersebut. Karena itu kegiatan edukasi dan sosialisasi pengalihan mitan ke LPG masih dibutuhkan dan perlu terus dilanjutkan untuk meningkatkan kesadaran dan menghilangkan kekhawatiran masyarakat terhadap kualitas tabung LPG. Materi sosialisasi juga perlu diperkaya dan divariasikan dengan menyampaikan hasil berbagai kajian dan penelitian baik secara analitik, numerik, maupun experimental. Tulisan ini menyajikan hasil studi numerik terhadap limit tekanan dan keadaan tegangan pada tabung LPG yang dipakai dalam rumah tangga, khususnya tabung ukuran 3kg.

2. Limit Load

Untuk menghindari *gross distortion* atau *bursting* adalah perlu untuk menghindari kondisi total plastis pada seluruh dinding shell. Gambar 1 menunjukkan sebuah elemen dinding shell yang mengalami stress pada satu sumbu. Dinding sebuah shell dapat diidealisasikan sebagai sebuah beam dengan lebar b dan tebal $2h$ (or t) yang menerima gaya normal N dan momen bending M .



Gambar 1 dinding shell dianalisis sebagai sebuah beam

Definisikan $\sigma(z)$ sebagai circumferential stress pada jarak z dari mid-surface dinding. Pada potongan z , persamaan keseimbangan dapat ditulis dimana beban external yang diberikan M dan N sama dengan gaya internal, yaitu stress pada beam. Hasilnya adalah persamaan berikut:

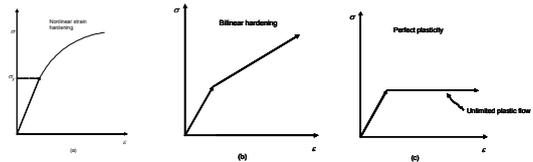
$$M = F \cdot z = \int_{-h}^h \sigma A \cdot z = \int_{-h}^h \sigma b dz \cdot z = b \int_{-h}^h \sigma z \cdot dz \quad (1)$$

$$N = \int_{-h}^h \sigma A = \int_{-h}^h \sigma b \cdot dz = b \int_{-h}^h \sigma \cdot dz \quad (2)$$

Jika perilaku material adalah elastik murni, kedua persamaan di atas menghasilkan persamaan berikut:

$$\sigma(z) = \frac{N}{A} + \frac{Mz}{I} \quad (3)$$

dimana, A = luas penampang beam = $2bh$
 I = momen inersia penampang



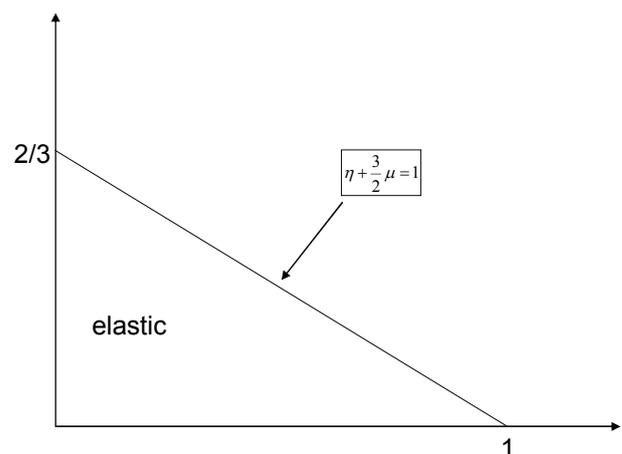
Gambar 2 Hubungan tegangan-regangan, (a) nonlinear elastic, (b) bilinear hardening, (c) elastic-perfectly-plastic.

Dengan asumsi bahwa perilaku material adalah *elastic-perfectly-plastic* (Gambar 2c), dan dengan tegangan luluh σ_y , maka dengan N adalah gaya tarik, tegangan luluh pertama akan terjadi sebagai tarik pada serat terluar ($z = +h$), bila

$$\frac{N}{2bh} + \frac{3M}{2bh^2} = \sigma_y \quad (4)$$

$$\text{atau, } \frac{N}{2bh\sigma_y} + \frac{3M}{2bh^2\sigma_y} = 1 \quad (5)$$

Persamaan (5) didefinisikan sebagai *initial yield condition* seperti pada Gambar 3.



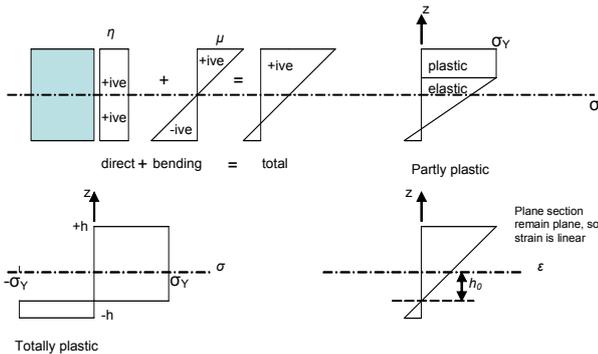
Gambar 3 Initial yield condition

Setelah luluh, jika beban terus dinaikkan, plastisitas akan menyebar ke seluruh dinding shell (penampang beam) seperti pada Gambar 4. Untuk plastis sempurna, keadaan total plastis merupakan *LIMIT STATE* dengan distribusi aliran plastis yang linear seperti pada Gambar 4. Pada



kondisi ini sumbu netral berpindah sejauh h_0 dibawah garis pusat. Di atas sumbu netral dalam kondisi plastis penuh, stress sama dengan σ_Y , dan di bawah sumbu ini stress sama dengan $-\sigma_Y$. Secara matematik, distribusi stress ditulis sebagai berikut

$$\sigma(z) = \begin{cases} \sigma_Y & \dots\dots\dots z > -h_0 \\ -\sigma_Y & \dots\dots\dots z < -h_0 \end{cases} \quad (6)$$



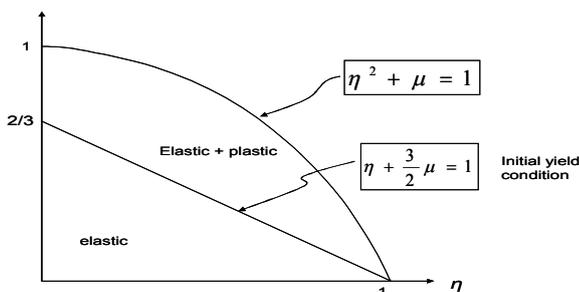
Gambar 4 rogress aliran plastisitas dalam sebuah beam

Dengan kombinasi persamaan (1) dan (2) diperoleh persamaan berikut:

$$\frac{M}{bh^2\sigma_Y} + \left(\frac{N}{2bh\sigma_Y} \right)^2 = 1 \quad (7)$$

Persamaan (7) dikenal dengan *limit load condition*.

Karena nature dari stress dalam kondisi plastis penuh, stress tidak dapat naik di atas yield stress. Jika kombinasi beban M and N berubah sedemikian sehingga persamaan (7) selalu dipenuhi maka dinding shell akan selalu dalam 'limit condition'. Biasanya beban pada vessel tidak tunggal, tapi berupa *multiple loading*. *Initial yield condition*, [persamaan (5)] atau Gambar 3, dan *limit load condition* [persamaan (7)] biasanya digambarkan pada sebuah INTERACTION DIAGRAM seperti Gambar 5.

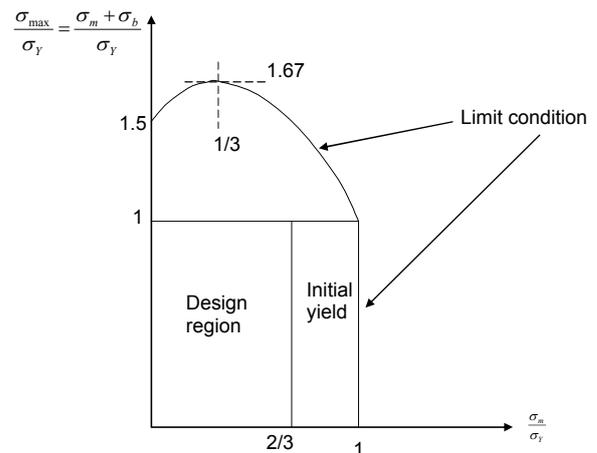


Gambar 5 Interaction diagram

Diagram interaksi seperti ditunjukkan pada Gambar 5 dapat diplot dalam bentuk lain dimana terminologi

$$\frac{N}{2bh} = \sigma_m, \text{ didefinisikan sebagai } \textit{elastic membrane stress}$$

dan terminologi $\frac{3M}{2bh^2} = \sigma_b$, didefinisikan sebagai *elastic bending stress* pada serat terluar. Dengan definisi ini, sebuah diagram untuk *design limit* dapat diplot seperti pada Gambar 6:



Gambar 6 Design limit untuk menghindari *gross distortion*

3. Pemodelan Elemen Hingga

Model tabung LPG dibuat berdasarkan data tabung LPG ukuran 3 kilogram yang dipakai dalam rumah tangga. Data tersebut diberikan pada Gambar 7:

Data Tabung LPG 3 kilogram:

Temperature	: -40 sd 60 -oC
Volume	: 7.3 L
Tekanan operasi	: 2.1 MPa
Tekanan hidrotest	: 3.2 MPa
Test kebocoran	: 2.1 MPa
Berat isi tabung	: 3 K
Diameter luar	: 260 mm
Tinggi	: 300 mm
Diameter footing	: 190 mm
Diameter handguard	: 182 mm
Berat kosong	: 5 kg



Gambar 7 Tabung LPG 3-kg

Dengan asumsi bahwa *handguard* dan *footring* tidak berpengaruh secara signifikan terhadap distribusi tegangan pada tabung, maka *handguard* dan *footring* tidak dimodelkan dalam *finite elemen model*.

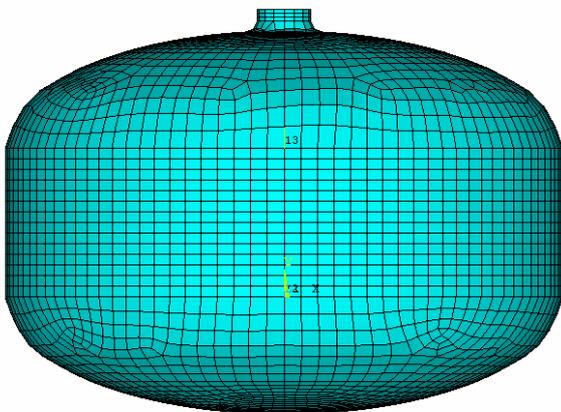


Tabung LPG 3 kg terbuat dari baja lembaran (plat) produksi PT Krakatau Steel dengan spesifikasi JIS G 3116 SG-295, dengan tebal 2.3 mm. Untuk *handguard* dan *footring* menggunakan baja karbon dengan spesifikasi JIS G 3101 SS42, tebal 2.5 mm juga disuplai dari PT Krakatau Steel. Sedangkan kawat las yang digunakan untuk sambungan *circumferential* tabung disuplai dari Cina dengan spesifikasi EM 12 K.

Material properties yang diperlukan adalah modulus elastisitas E , kekuatan luluh σ_Y , dan rasio Poisson ν , masing-masing sebesar 207 GPa, 295 MPa, dan 0.3. Dalam analisis ini, diasumsikan bahwa sambungan *circumferensial* silinder adalah sempurna (efisiensi sambungan bernilai 1) dengan dua buah tutup elip dengan perbandingan sumbu 0.423 di kedua ujungnya. Asumsi lain adalah bahwa tebal dinding tabung seragam di mana-mana. Prilaku material diasumsikan *elastic-perfectly-plastic* dengan modulus tangen sama dengan nol (Gambar 2c).

Elemen hingga (*finite element*) pada model dibagi secara longitudinal dan *circumferential*. Tipe elemen yang digunakan adalah SHELL181. Elemen SHELL181 dapat digunakan untuk analisis struktur *shell* tipis atau tebal. Elemen ini terdiri dari 4 *node* dengan enam DOF pada setiap *node*: translasi pada arah x , y , dan z , serta rotasi terhadap sumbu x , y , dan z . SHELL181 dapat digunakan untuk analisis linier, *large rotation*, dan analisis non-linier dengan *large strain*. Model elemen hingga untuk sebuah tabung LPG 3 kg dapat dilihat pada Gambar 8.

Untuk model elemen hingga seperti pada Gambar 8 yang menerima beban internal pressure, kondisi batas yang diperlukan adalah perpindahan nol (*zero displacement*) pada arah sumbu tabung untuk seluruh node pada bagian bawah tabung dalam radius *foot ring*.



Gambar 8 Model elemen hingga tabung LPG 3-kg

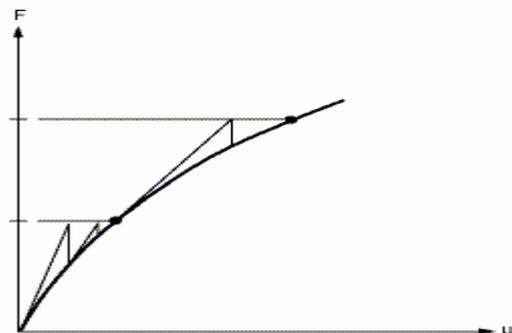
Beban internal pressure (MPa) yang harus diberikan untuk mendapatkan limit tekanan dapat diperkirakan dengan menghitung tekanan dalam untuk

mencapai tegangan luluh material, σ_y . Dari data tabung pada Gambar 14 ($r = 130\text{mm}$) dan sifat material tabung JIS G 3116 SG-295 ($\sigma_Y = 295\text{ MPa}$), tekanan internal untuk mencapai luluh dapat dihitung sebagai berikut:

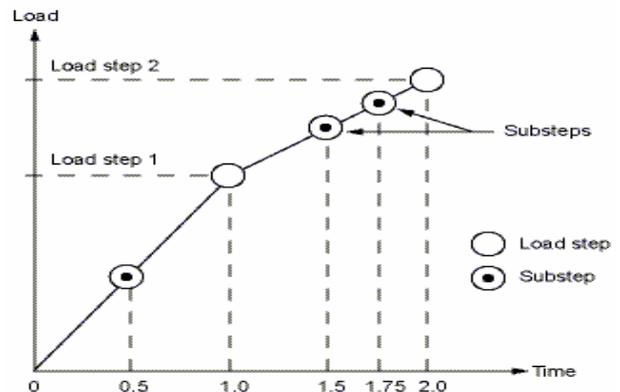
$$p_y = \frac{\sigma_y \cdot t}{r} = \frac{(295\text{MPa})(2.3\text{mm})}{130\text{mm}} = 5.22\text{ MPa}$$

Beban tekanan internal sebesar 5.22 MPa adalah tekanan yang diperlukan untuk material mulai plastis. Tekanan yang diperlukan untuk gagal (total plastis) adalah lebih besar daripada nilai ini. Untuk analisis elemen hingga dengan ANSYS, beban dapat diberikan secara *step* untuk mencapai luluh, kemudian disusul dengan pemberian beban secara *ramp* setelah luluh untuk mengetahui limit tekanan. Beban maksimum yang dapat diberikan adalah $2p_y$.

Untuk mengetahui limit tekanan yang bekerja, beban internal pressure sebesar 10 MPa diberikan dalam satu *load step* secara *ramp*. Metode "Newton-Raphson" (Gambar 9) digunakan dalam penyelesaian nonlinear. Pada metode ini, beban dibagi ke dalam rangkaian peningkatan pembebanan (*sub-step*) seperti pada Gambar 10. Pada setiap *sub-step*, dilakukan beberapa iterasi kesetimbangan untuk mendapatkan solusi yang konvergen.



Gambar 9 Metode Newton-Raphson untuk solusi nonlinear

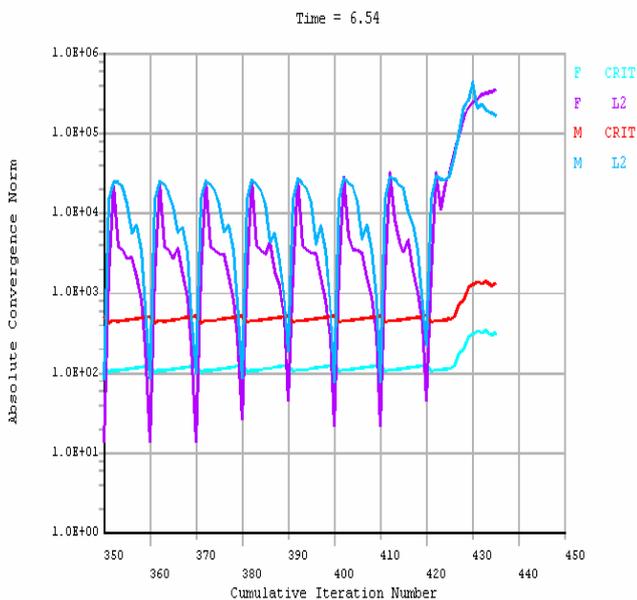


Gambar 10 Load step, sub-step, dan time



Sebelum memberikan solusi, metode Newton-Raphson mengevaluasi simpangan dari vektor beban keseimbangan yang mana perbedaan antara gaya-gaya diperbaiki (beban yang berhubungan dengan tegangan elemen dan gaya yang diberikan. Metode ini memberikan solusi nonlinier dengan menggunakan simpangan beban keseimbangan dan memeriksa konvergensi yang terjadi. Jika kriteria konvergensi tidak dipenuhi, simpangan beban keseimbangan dievaluasi ulang, matrik kekakuan diperbarui sehingga didapatkan solusi yang baru. Prosedur iterasi terus dilanjutkan selama masih terjadi konvergensi solusi dan akan berhenti setelah solusi tidak konvergen (Gambar 11). Solusi yang tidak konvergen ditandai dengan sub-step 999999 seperti pada Tabel 1.

SET	P, M.Pa	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	1	1	1	1
2		1	2	2
3	3.5	1	3	5
4	4.175	1	4	14
5	4.4324	1	5	32
6	4.5527	1	6	43
7	4.6655	1	7	54
8	4.7569	1	8	73
9	4.8483	1	9	80
10	4.9485	1	10	87
11	4.9975	1	11	98
12	5.0465	1	12	106
13	5.0955	1	13	114
14	5.1445	1	14	122
15	5.1935	1	15	130
16	5.2425	1	16	138
17	5.2915	1	17	146
18	5.3405	1	18	154
19	5.3895	1	19	162
20	5.4385	1	20	170
21	5.4875	1	21	178
22	5.5365	1	22	186
23	5.5855	1	23	194
24	5.6345	1	24	202
25	5.6835	1	25	210
26	5.7324	1	26	218
27	5.7814	1	27	226
28	5.8304	1	28	234
29	5.8794	1	29	242
30	5.9284	1	30	250
31	5.9774	1	31	258
32	6.0264	1	32	266
33	6.0754	1	33	274
34	6.1244	1	34	282
35	6.1734	1	35	290
36	6.2224	1	36	299
37	6.2714	1	37	307
38	6.3204	1	38	315
39	6.3404	1	39	330
40	6.3604	1	40	340
41	6.3804	1	41	350
42	6.4004	1	42	360
43	6.4204	1	43	370
44	6.4404	1	44	380
45	6.4604	1	45	390
46	6.4804	1	46	400
47	6.5004	1	47	410
48	6.5204	1	48	420
49	10	1	999999	435



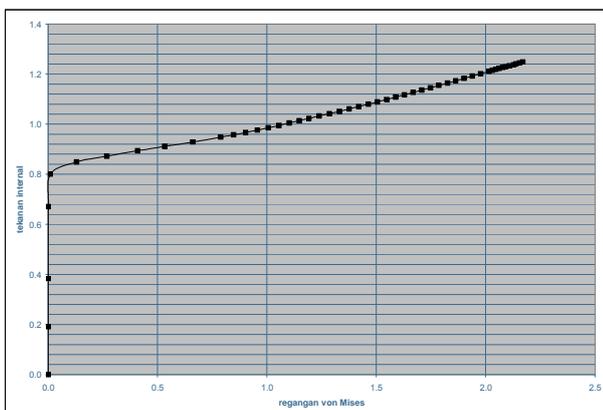
grafik dapat dibaca bahwa limit tekanan adalah:

4. Limit Tekanan Tabung LPG 3-kg

Gambar 12 menunjukkan grafik beban (tekanan internal) terhadap regangan (kriteria von Mises). Dari

$$\frac{p_L}{p_y} = 1.25, \text{ atau } p_L = 1.25 p_y$$

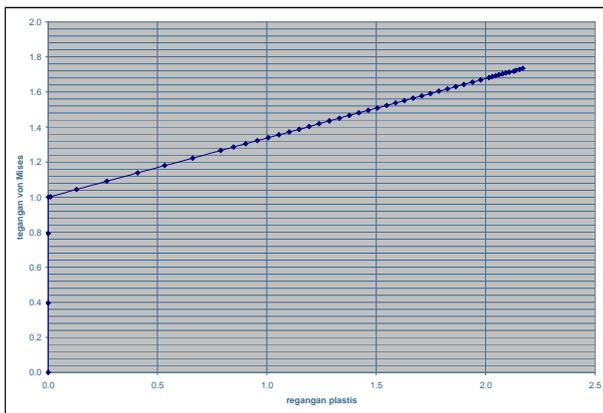
Gambar 12 hubungan tekanan internal (nondimensional) terhadap regangan (von Mises)



Gambar 13 menunjukkan grafik hubungan tegangan terhadap regangan. Dapat dilihat bahwa saat limit tekanan dicapai, tegangan maksimum (von Mises) adalah:

$$\frac{\sigma_L}{\sigma_y} = 1.73 \quad \text{atau,} \quad \sigma_L = 1.73 \sigma_y$$





Gambar 23 tegangan (nondimensional von Mises) terhadap regangan (von Mises)

5. Kesimpulan

Dari studi limit tekanan tabung LPG 3kg yang telah dilakukan dengan metode elemen hingga, beberapa kesimpulan dapat diperoleh sebagai berikut:

1. Limit tekanan tabung LPG 3 kilogram adalah 1.25 kali tekanan untuk mencapai tegangan luluh;
2. Limit tegangan (von Mises) pada saat material mengalami plastis total adalah 1.75 kali tegangan luluh;
3. Tekanan operasi tabung LPG 3 kilogram sebesar 2.1 MPa adalah pada tingkat yang aman dengan faktor keamanan sebesar 2.48.
4. Daerah yang mengalami tegangan tertinggi pada saat limit tekanan dicapai adalah daerah sekitar opening (dekat katup)

Ucapan Terima Kasih

Penulis sangat berterima kasih kepada PEMDA provinsi Lampung yang telah menyediakan dana untuk penelitian ini melalui program *peningkatan kualitas proses pembelajaran melalui riset* di Fakultas Teknik Universitas Lampung dengan perjanjian kontrak Nomor 800/14801.1/III.1/DP.4/2009 tanggal 5 Oktober 2009.

References

- [1]. ANSYS, 2009, ANSYS on-line help, Swanson Analysis System, New Jersey, USA.
- [2]. ASME, 2007, ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII Div.1.
- [3]. British Standard, 2002, PD5500 Unfired Pressure Vessel
- [4]. Benham, P.P., and C.G. Armstrong, 1996, Mechanics of Engineering Materials. Longman, UK.
- [5]. Flugge, W., 1973, Stresses in Shells. Springer-Verlag, Germany
- [6]. Timoshenko, S.P., and J.M. Gere, 1999, Mechanics of Materials. Stanley Thornes (Publisher) Ltd, UK.

