

## Analisis Kekuatan dan Ekspansi Volume Tangki Toroidal Penampang Eliptik dengan Beban *Internal Pressure*

Asnawi Lubis, Jamiatul Akmal, Made Yoga Adi Winata

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Lampung

Jalan Professor Sumantri Brojonegoro No. 1, Gedongmeneng, Bandar Lampung 35145

Telp. (0721) 3555519, Fax. (0721) 704947

\*Email: [asnawi.lubis@eng.unila.ac.id](mailto:asnawi.lubis@eng.unila.ac.id)

### Abstrak

In order to reduce the Public Service Obligation (PSO) on oil fuel, the government of Indonesia initiated a program of conversion of oil fuel into gas fuel (BBG) for passenger cars. In supporting this program, it is required to develop the component of combustion system. One of the components is storage tank for BBG that must be carefully designed to avoid burst type failure. Based on previous research, a toroidal tank can withstand higher limit pressure than the PERTAMINA LPG 3kg storage tank used nowadays in Indonesia household. The present study was extended to toroidal tank of elliptic cross-section. The strength in term of limit pressure was evaluated numerically using the ANSYS 13 finite element software. The ANSYS SHELL 181 element type was used. Limit pressure were obtained via nonlinear analysis using the well-known Newton-Raphson algorithm, and corresponding stress and strain were evaluated. The results show that toroidal tank having elliptic ratio ( $a/b$ ) of 1.0 (circular) can withstand highest limit pressure, both for in-plane and out-of-plane elliptic, i.e., 1.16 times the pressure to yield ( $p_y$ ). Attachment of a nozzle on intrados position results in reducing the limit pressure by 5.21%, becomes 1.1  $p_y$ . The result of corresponding volume expansion when the limit pressure was reached is 0.337 % of the initial volume. It is interesting to note that limit pressure become lower than the pressure to yield when the ratio of major to minor axis of the ellip higher than 1.4. In conclusion, the value of ellipticity  $a/b$  must not be higher than 1.4 for further development of a toroidal tank.

**keywords:** toroidal, in-plane elliptic, out-of-plane elliptic, limit pressure, volume expansion

### PENDAHULUAN

Gas merupakan jenis bahan bakar yang sudah banyak digunakan dalam keperluan sehari-hari, khususnya untuk keperluan rumah tangga. Gas yang digunakan untuk bahan bakar yaitu gas LPG (*Liquefied Petroleum Gas*). Sejak tahun 2007 konversi minyak tanah ke LPG merupakan salah satu program pemerintah untuk dapat menekan subsidi bahan bakar minyak, dengan pertimbangan harga bahan bakar gas yang lebih murah dibandingkan bahan bakar minyak. Selain minyak tanah, permasalahan akan subsidi bahan bakar minyak juga terjadi pada jenis premium dan solar. Dewasa ini pemerintah juga menggalakkan pemakaian BBG untuk transportasi. Pemerintah telah memulai membangun infrastruktur seperti membangun beberapa stasiun BBG dan mewajibkan beberapa kendaraan untuk memakai BBG. Untuk mendukung program tersebut, perlu dilakukan penelitian untuk penguasaan teknologinya. Penelitian ini memfokuskan kajian dalam pengembangan tabung sebagai wadah BBG di kendaraan.

Tabung LPG yang digunakan saat ini adalah berbentuk silinder dengan tutup setengah ellip pada dua ujungnya. Tegangan bending akibat *internal pressure* terjadi pada *junction* bagian silinder dengan tutup

setengah ellip. Tegangan bending tersebut dapat mengurangi kekuatan tabung yang berakibat pada kegagalan dari tabung itu sendiri [1].

Untuk itu dicoba mengubah bentuk tabung LPG silinder menjadi bentuk toroidal sebagai sebuah bentuk yang paling mendekati bentuk silinder. Bentuk geometri pada tabung LPG 3 kg model toroidal lebih baik dalam menahan stress dibandingkan tabung LPG yang ada saat ini. Tabung LPG 3 kg model toroidal dapat mencapai limit tekanan 2 kali limit tekanan pada tabung silinder. Penelitian ini telah dilakukan sebelumnya oleh Handika [2] dan *Mu'roj* [3].

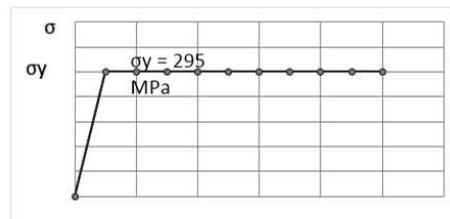
Tanki berbentuk toroidal telah banyak dipakai sebagai tanki BBG pada mobil penumpang di beberapa negara di Eropa. Penelitian tentang perilaku stress dan kekuatan shell toroidal juga telah dilakukan oleh banyak peneliti. Pengujian limit tekanan external shell toroidal telah dilakukan oleh Btchut [4] terhadap tiga buah tanki toroidal, dua diantaranya difabrikasi dari baja karbon sedang dengan proses spinning dua bagian shell dan dilas secara longitudinal pada extrados dan intrados. Satu sample lainnya difabrikasi dengan mengelas empat buah elbow 90°. Analisis elemen hingga terhadap perilaku tegangan dan regangan pada tanki LPG telah dilakukan oleh Velickovic [5]. Kisioglu [6] adalah satu dari sedikit peneliti yang telah melakukan investigasi limit tekanan tanki toroidal yang

dipakai sebagai tanki LPG pada mobil penumpang di Turki. Pengujian limit tekanan secara experimental beberapa tanki toroidal dengan penampang oval juga telah dilakukan oleh Kisioglu [7]. Desain kekuatan tanki toroidal lingkaran sebagai usulan substitusi tabung LPG Pertamina 3 kg yang dipakai pada rumah tangga di Indonesia telah dilakukan oleh Lubis [8]. Analisis elemen hingga untuk menentukan posisi circumferensial nosel silinder radial dan nosel non-radial pada tabung toroidal lingkaran telah dilaporkan oleh Lubis dkk [9,10]. Investigasi pengaruh perbandingan jari-jari dan ovality penampang terhadap limit tekanan tanki toroidal telah dilaporkan oleh Lubis dkk [11] dan menunjukkan bahwa tanki toroidal dengan penampang out-of-plane oval lebih kuat terhadap tekanan internal. Tulisan ini menyajikan hasil analisis kekuatan tanki toroidal penampang eliptik terhadap tekanan internal. Penampang eliptik adalah bentuk yang mendekati bentuk lingkaran dengan perbandingan sumbu panjang,  $a$ , terhadap sumbu pendek  $b$ . Rasio  $a/b$  yang memberikan limit tekanan tertinggi merupakan tujuan utama yang penelitian yang telah dilakukan.

## METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan secara numerik menggunakan metode elemen hingga. Studi parameter untuk menentukan nilai perbandingan jari-jari  $R/r$ , dan perbandingan sumbu panjang terhadap sumbu pendek ellip  $a/b$ , yang menghasilkan limit tekanan tertinggi dilakukan dengan analisis nonlinear dari ANSYS 13. Nilai  $R/r$  dan limit tekanan yang berkaitan telah dievaluasi untuk nilai 2.5 s.d 5.0. Sedangkan nilai perbandingan sumbu-sumbu ellip,  $a/b$  telah dievaluasi untuk nilai 1.0 s.d 2.0. Tebal dinding tabung adalah 2.3 mm, sesuai dengan tebal tabung LPG 3kg yang saat ini dipakai dalam rumah tangga di Indonesia. Jari-jari dan tinggi nosel yang diletakkan pada bagian intrados masing-masing adalah 12.5 mm dan 10 mm.

Sifat-sifat material (*material properties*) yang diperlukan dalam analisis ini adalah modulus Young,  $E$ , tegangan luluh,  $\sigma_y$ , dan rasio Poisson,  $\nu$ . Nilai-nilai ini diambil dari sifat-sifat material tabung LPG 3kg (JIS G3116 SG-295), masing-masing adalah 207 GPa, 295 MPa, dan 0.3 [12]. Dalam analisis ini, digunakan asumsi shell dinding tipis (*thin shell*), ketebalan seragam dengan memiliki permukaan yang halus dan tidak ada *ovality* pada penampang toroidal. Material diasumsikan bersifat *elastic-perfectly plastic*, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. *Elastic-perfectly plastic material model.*

Tanki toroidal akan diletakkan pada posisi ban cadangan sebuah mobil penumpang, sehingga spesifikasi geometri ban merupakan parameter utama geometri. Pada penelitian ini tanki toroidal akan digunakan untuk kendaraan Toyota Innova type G dengan ukuran ban 205/65/R15, yang artinya 205 adalah lebar tapak ban yg diukur dari bagian paling luar kedua sisi ban dalam satuan milimeter. Angka 65 merupakan aspek ratio yaitu ketinggian ban dibandingkan dengan lebar ban yang diukur dalam prosentase. Dalam hal ini ketebalan ban adalah  $205 \times 65 \% = 133,25$  milimeter. Sedangkan notasi R adalah diameter dari ring (velg). Angka R15 berarti diameter ban pada sisi dalam dengan satuan hitung 15 inchi.

Volume sebuah toroidal dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$V = (\pi r^2) \cdot h$$

$$V = (\pi r^2)(2\pi R)$$

$$= 2 \pi^2 r^2 R \quad (1)$$

Dimana:  $r$  = jari-jari penampang toroidal, mm

$R$  = jari-jari kelengkungan toroidal, mm

Teori membrane untuk toroidal shell [13] menunjukkan bahwa tekanan luluh sebuah tanki toroidal penampang lingkaran dengan jari-jari penampang  $r$ , tebal  $t$ , dan perbandingan jari-jari  $\rho$ , adalah

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

dapat dilihat bahwa semakin besar perbandingan jari-jari ( $\rho = R/r$ ), semakin tinggi limit tekanan sebuah tanki toroidal, tetapi volume yang berkaitan semakin kecil. Untuk memperoleh  $R/r$  yang optimum, Mahyunis [14] melakukan optimasi dengan kriteria limit tekanan dan volume tanki dengan model tanki tanpa nosel. Hasil analisisnya menunjukkan bahwa nilai perbandingan jari-jari  $R/r = 4$  merupakan nilai yang optimum.

Karena tanki akan diletakkan pada posisi ban cadangan sebuah mobil penumpang, maka ukuran jari-jari tanki harus sesuai, sehingga jari-jari ekstrados harus tetap. Karena panjang jari-jari ekstrados dipengaruhi oleh nilai sumbu panjang,  $a$ , maka nilai  $a$  juga harus

tetap. Jika nilai  $a/b = e$ , maka nilai  $b$  dari persamaan (1) menjadi:

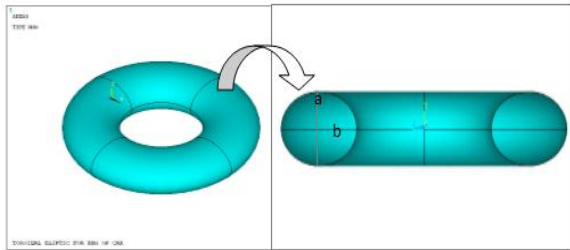
$$V = 2 \cdot \pi^2 \cdot b \cdot e \cdot b \cdot R$$

$$b^2 = \frac{V}{2 \cdot \pi^2 \cdot e \cdot R}$$

atau,

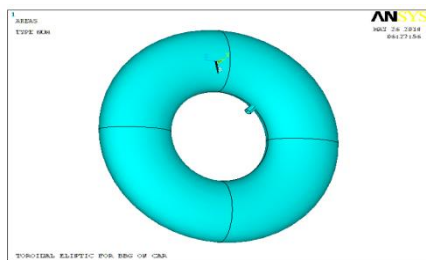
$$b = \sqrt{\frac{V}{2\pi^2 eR}} \quad (3)$$

Typical model tanki toroidal penampang eliptik dapat dilihat pada Gambar 2.



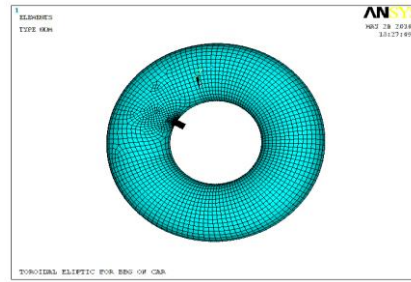
Gambar 2. Model tanki toroidal penampang eliptik

Setelah model tabung toroidal terbentuk, maka selanjutnya dibuat nosel silinder dengan jari-jari dan tinggi masing-masing 12,5 mm dan 10 mm sesuai dengan nosel tabung gas LPG 3 kg. Peletakan nosel dianggap paling aman pada posisi intrados dengan pertimbangan keamanan nosel tersebut dari benturan benda asing dan mempermudah peletakan tanki toroidal ini pada tempat ban cadangan. Arah nosel adalah radial terhadap penampang tanki seperti terlihat pada Gambar 3.



Gambar 3. Tabung toroidal dengan nosel silinder

Tipe elemen yang digunakan adalah SHELL 181. Jumlah elemen yang digunakan untuk toroidal saja adalah 120 pada arah longitudinal dan 36 ke arah keliling penampang. Model tanki toroidal yang telah dibagi elemennya (*meshing*) dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. *Meshing* pada ANSYS

Kondisi batas yang digunakan pada pemodelan ini adalah perpindahan dan rotasi nol untuk semua node pada posisi longitudinal sebuah potongan penampang, tetapi perpindahan radial diizinkan untuk mengakomodasi ekspansi volume akibat tekana internal. Beban *internal pressure* yang diberikan dapat diperkirakan dari persamaan (2). Peningkatan beban *internal pressure* sampai dicapai limit tekanan sepenuhnya dilakukan oleh software ANSYS berdasarkan langkah awal, langkah minimum dan langkah maksimum pada perintah DELTIM. Kedua opsi nonlinear material dan nonlinear geometri telah diaktifkan dalam memperoleh limit tekanan.

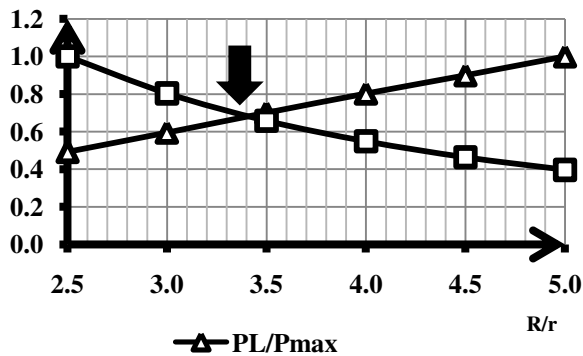
## HASIL DAN DISKUSI

Penelitian ini dilakukan dengan dua model penampang eliptik, yaitu *in-plane* eliptik dan *out-of-plane* eliptik. Penampang eliptik memiliki sumbu panjang  $a$  dan sumbu pendek  $b$ . *In-plane* eliptik adalah elip dengan sumbu panjang berada pada bidang toroidal, sedangkan *out-of-plane* eliptik adalah elip sumbu panjang tegak lurus bidang toroidal.

### Penentuan Optimasi Geometri

Teori membrane toroidal shell menunjukkan bahwa semakin besar nilai perbandingan jari-jari  $\rho$ , semakin besar limit tekanan yang dapat diterima oleh tanki, namun volumenya semakin kecil. Oleh karena itu perlu ditentukan nilai  $\rho$  yang optimum. Optimasi sederhana telah dilakukan oleh Mahyunis [12] untuk menentukan nilai perbandingan jari-jari yang optimum berdasarkan limit tekanan dan volume tanki. Studi dilakukan untuk typical ukuran tanki berdasarkan dimensi dari sebuah roda dengan ukuran 185/70/R14. Dari data yang diperoleh tersebut, Mahyunis [12] kemudian membuat grafik nondimensional yang menggambarkan tekanan dan volume. Grafik tak berdimensi dibuat dengan membagi limit tekanan pada masing-masing nilai  $\rho$  dengan limit tekanan maksimum dan volume pada masing-masing  $\rho$  dengan volume maksimal. Titik potong yang diperoleh antara volume dan limit tekanan yang tak berdimensi tersebut

dianggap sebagai nilai  $\rho$  yang paling optimal. Grafik nondimensional tersebut dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik nondimensional volume dan limit tekanan [12]

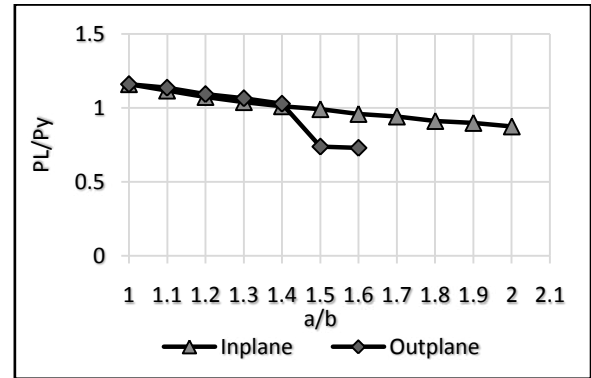
Gambar 5 menunjukkan bahwa titik potong antara tekanan nondimensional dan volume nondimensional adalah pada titik  $\rho = 3,4$ . Nilai ini telah diambil sebagai dimensi awal pada penelitian ini. Ukuran ban sebagai dasar untuk menentukan dimensi tanki toroidal diambil dari spesifikasi 205/65/R15. Volume tanki toroidal yang berkaitan adalah 26,58 liter.

#### Limit tekanan

Tekanan luluh yang bekerja pada sebuah tabung toroidal dengan penampang lingkaran dapat ditentukan dengan memodifikasi persamaan (2). Untuk perbandingan jari-jari  $R/r = 3,4$ , tekanan luluh dihitung sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 P_y &= \frac{2\sigma_y t}{r} \left( \frac{\rho - 1}{2\rho - 1} \right) \\
 &= \frac{2(295\text{Mpa})2,3\text{mm}}{73,5795455\text{ mm}} \left( \frac{3,4 - 1}{2(3,4) - 1} \right) \\
 &= 7,63143123\text{ MPa}
 \end{aligned}$$

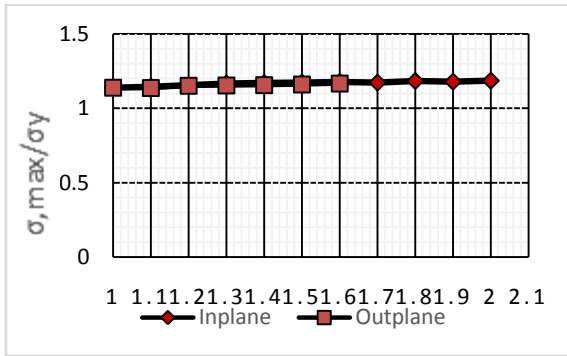
Nilai limit tekanan akan sedikit lebih tinggi daripada nilai  $p_Y$ . Bila perbandingan tertentu sumbu panjang terhadap sumbu pendek elip memberikan limit tekanan kurang dari  $p_Y$ , maka geometri ini tidak dapat dipakai untuk pengembangan selanjutnya sebuah tanki toroidal. Nilai beban maksimum atau *limit internal pressure* yang bekerja pada tanki toroidal penampang eliptik dengan perbandingan  $a/b$  yang berbeda berdasarkan hasil komputasi dapat dilihat pada Gambar 6.



Gambar 6. Grafik perbandingan limit tekanan

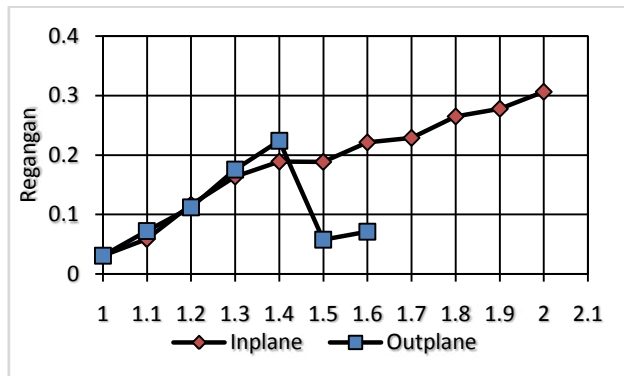
Gambar 6 menunjukkan bahwa limit tekanan yang terjadi pada setiap perbandingan eliptik berbeda. Nilai yang diperoleh cenderung menurun dengan meningkatnya perbandingan eliptik, baik untuk *in-plane* eliptik maupun *out-of-plane* eliptik. Dari seluruh perbandingan nilai eliptik, model terbaik yang memiliki limit tekanan tertinggi adalah ellip dengan nilai  $e = 1,0$ , ini adalah sebuah lingkaran. Nilai limit tekanan pada tanki toroidal berpenampang lingkaran mencapai  $1,1598 p_Y$ . Hal ini berarti bahwa tekanan gas LPG yang akan dimasukkan ke dalam tanki tidak boleh melebihi limit tekanan tersebut. Limit tekanan  $1,1598 p_Y$  adalah kondisi sesaat sebelum tanki pecah. Semakin kuat tanki toroidal menahan limit tekanan, maka semakin aman digunakan. Tanki toroidal yang baik dan dapat digunakan adalah pada saat limit tekanan yang dicapai lebih besar dari tekanan yield karena akan lebih kuat dalam menahan tekanan maksimal dari LPG. Terlihat bahwa untuk penampang *in-plane* dan *out-of-plane* eliptik, tanki toroidal penampang eliptik yang dapat dikembangkan adalah tanki dengan perbandingan eliptik 1,4. Gambar 6 juga menunjukkan bahwa untuk penampang *out-of-plane* eliptik, tanki toroidal tidak dapat menerima tekanan internal bila perbandingan eliptik melebihi 1,6.

Gambar 7 menunjukkan tegangan maksimum pada tanki toroidal ketika limit tekanan dicapai. Nilai ini cenderung tyang digunakan pada tabung gas 3 Kg berbentuk silinder yang adaidak berbeda untuk setiap perbandingan eliptik. Hal ini dapat diterima karena karena saat limit tekanan dicapai, seluruh dinding tanki sudah menjadi plastis dengan asumsi material berperilaku *elastic-perfectly plastic*. Tegangan yang diambil dari komputasi merupakan tegangan intensity. Tegangan *intensity* merupakan nilai yang tepat diambil dari solusi limit tekanan karena merupakan tegangan terbesar. Untuk tabung toroidal, tegangan ini merupakan selisih tegangan hoop (tarik) dan tegangan radial (tekan).



Gambar 7. Grafik perbandingan tegangan maksimum.

Gambar 8 menunjukkan nilai regangan maksimum untuk setiap perbandingan sumbu elliptic. Sebagaimana halnya tegangan, nilai regangan maksimum diambil sebagai nilai regangan pada saat limit tekanan dicapai. Pada simulasi ini yang dilakukan adalah melihat regangan plastis pada desain terbaik dengan perbandingan sumbu eliptik penampang  $a/b$ . Nilai regangan maksimum yang diperoleh untuk penampang in-plane dan out-of-plane eliptik dapat dilihat pada Gambar 8.

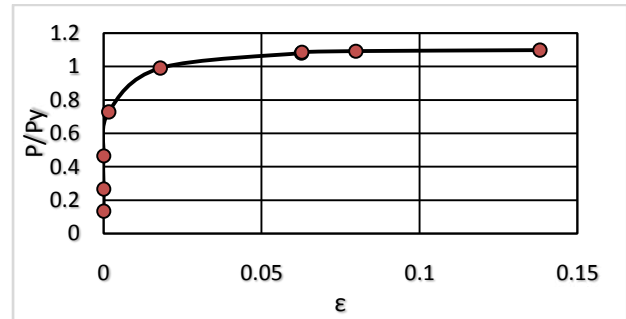


Gambar 8. Grafik perbandingan regangan ( $\epsilon$ ) maksimal

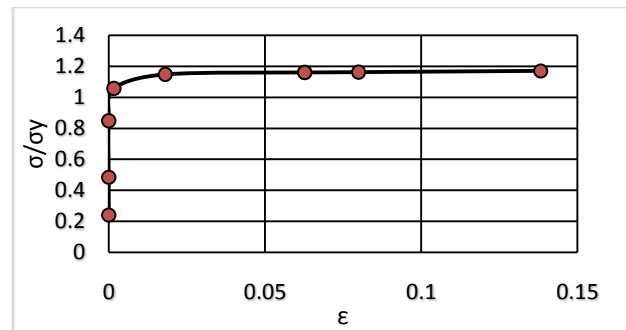
Untuk menentukan desain terbaik tanki toroidal penampang eliptik maka dipilih desain yang mampu menahan limit tekanan tertinggi. Dari data simulasi limit tekanan di atas, maka dapat dilihat bahwa nilai perbandingan eliptik terbaik yaitu 1,0 (lingkaran) dengan limit tekanan yang dicapai mencapai 1,1598  $P_y$ .

Setelah diketahui nilai eliptik terbaik, maka dilakukan pemberian nosel sebagai saluran pengisian dan pengeluaran bahan bakar gas. Nosel yang didesain adalah nosel radial dengan diameter lubang 12,5 mm dan tinggi 10 mm yang diletakkan di bagian intrados. Setelah itu dilakukan simulasi limit tekanan untuk tanki toroidal yang telah terpasang nosel. Grafik hubungan tekanan internal (beban) terhadap regangan, serta hubungan tegangan dan regangan pada tanki toroidal dengan nosel pada intrados berturut-turut

ditunjukkan pada Gambar 9 dan 10. Kedua gambar menunjukkan bahwa limit tekanan menurun menjadi 1.099  $p_y$ , atau 5.21%, dibandingkan dengan limit tekanan sebelum diberi nosel, yaitu 1.1598  $p_y$ .

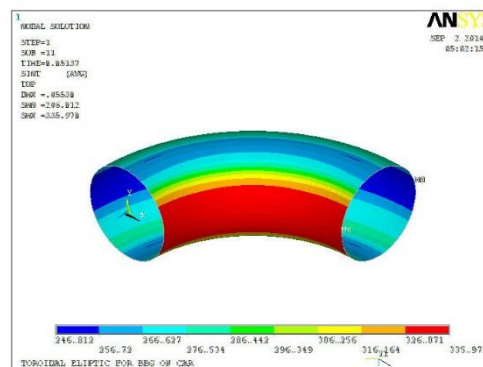


Gambar 9. Grafik limit pressure terhadap regangan

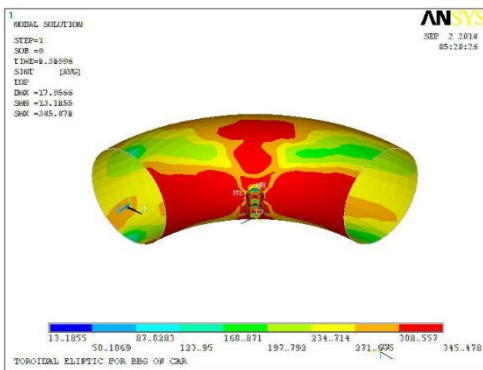


Gambar 10. Grafik Tegangan- regangan

Distribusi tegangan yang terjadi pada tanki toroidal sebelum dan setelah diberikan nosel ditunjukkan pada Gambar 11 dan 12. Gambar distribusi tegangan yang ditampilkan adalah tegangan pada saat limit tekanan dicapai untuk tanki toroidal lingkaran. Kegagalan terjadi pada daerah perpotongan (interseksi) antara tabung toroidal dengan nosel. Kegagalan pada daerah tersebut diakibatkan karena ada bagian yang *discontinue* sehingga tegangan yang terjadi terkonsentrasi pada daerah tersebut akibat bending.

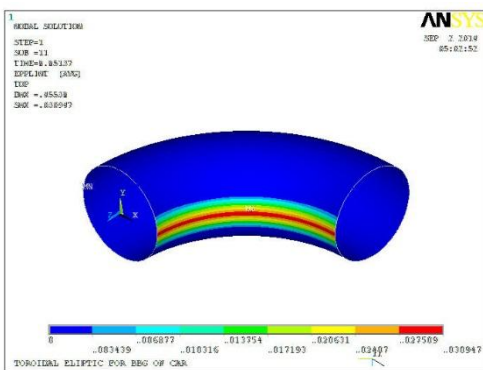


Gambar 11. Limit tegangan pada tanki tanpa nosel

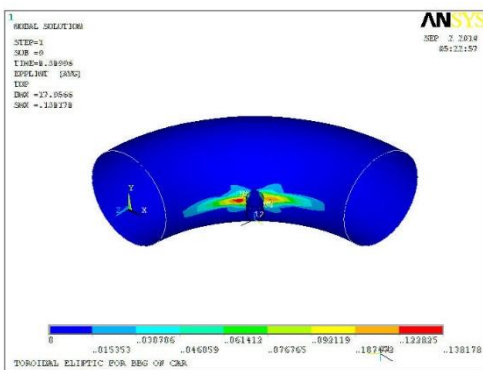


Gambar 12. Limit tegangan tanki dengan nosel

Gambar 13 dan 14 menunjukkan distribusi regangan plastis pada saat limit tekanan dicapai. Pada keadaan ini, seluruh dinding tanki telah menjadi plastis.



Gambar 13. Limit regangan tanki toroidal tanpa nosel



Gambar 14. Limit regangan tanki toroidal dengan nosel

### Ekspansi Volume

Perhitungan ekspansi volume dilakukan pada model toroidal yang dapat menahan tekanan paling tinggi, yaitu pada perbandingan eliptik 1,0 (lingkaran) tanpa nosel. Ekspansi volume yang terjadi pada tanki toroidal dihitung secara integrasi numerik dengan

menggunakan data perpindahan node dalam arah radial (pertambahan jari-jari) pada salah satu potongan penampang. Jarak setiap node pada arah circumferencial adalah  $10^0$  sehingga terdapat 36 node pada keliling penampangnya. Pertambahan panjang jari-jari pada setiap node tidak sama, sehingga luas penampang setelah ekspansi dihitung dengan integrasi numerik. Dengan integrasi numerik aturan trapesium menggunakan data perpindahan radial (pertambahan jari-jari) pada setiap node, diperoleh luas penampang menjadi  $16975,77698 \text{ mm}^2$ , sehingga volumenya menjadi  $26670141,7 \text{ mm}^3$  atau sebesar 26,67 liter. Luas penampang awal adalah  $16922,3353 \text{ mm}^2$  sehingga diperoleh volume awal tanki sebesar 26,58 liter. Dengan membandingkan volume awal dengan volume akhir, maka ekspansi volume yang terjadi adalah 0.337%.

Berdasarkan teori membrane untuk shell toroidal [13], pergeseran radial node, atau pertambahan jari-jari diberikan oleh persamaan berikut:

$$\delta = r \left( \frac{pr}{Et} \left[ \frac{\cos \phi + 2\rho}{2(\cos \phi + \rho)} \right] - \frac{\mu p r}{2Et} \right) \quad (4)$$

Dengan dimensi yang dimiliki oleh tanki toroidal dan setelah beban diberikan, maka dapat dihitung luas penampang tabung menjadi  $16962,63 \text{ mm}^2$  sehingga volume tanki menjadi 26,649 liter. Dari nilai tersebut diketahui bahwa terjadi ekspansi volume sebesar 0,258 %. Bila dibandingkan dengan perhitungan pada penelitian ini, dimana terjadi ekspansi volume sebesar 0.337%, perbedaan ini tidak signifikan. Dapat dipahami bahwa perbedaan ini muncul dari asumsi material *linier plastic* dalam teori membrane [15], beban yang bekerja diasumsikan linier dan tidak melebihi tekanan *yield*. Sedangkan pada simulasi ini, beban yang diberikan bersifat nonlinier karena beban yang diberikan harus melebihi tekanan luluh materialnya.

### KESIMPULAN

Perilaku tanki toroidal penampang elliptic yang menerima beban internal pressure menunjukkan kesamaan antara penampang in-plane dan out-of-plane elliptic. Untuk perbandingan jari-jari yang dipilih pada penelitian ini, yaitu 3,4, pertambahan rasio elliptik (sumbu panjang terhadap sumbu pendek ellip) menurunkan limit tekanan sebuah tanki toroidal, dan toroidal penampang lingkaran ( $a/b = 1$ ) mempunyai limit tekanan paling tinggi, baik untuk in-plane maupun out-of-plane elliptik. Rasio elliptik paling tinggi yang dapat dipakai adalah 1.4, karena rasio di atas nilai ini menyebabkan limit tekanan kurang dari tekanan luluh material. Penambahan nosel pada posisi intrados menurunkan limit tekanan secara signifikan, mencapai 5.21% dibandingkan dengan limit tekanan tanki toroidal

tanpa nosel. Ekspansi volume terjadi akibat *internal pressure* mencapai 0,337 % dari volume awalnya.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1]. Azmi, A.F., 2010, *Analisi Tegangan (stress) Pada Tabung LPG 3 KG Akibat Beban Internal Pressure*. Skripsi Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung.
- [2]. Handika, E., 2010, *Studi Limit Tekanan Pada Tabung LPG 3 Kg*. Skripsi Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung.
- [3]. Mu'roj, S., 2011, *Analisis Kekuatan Tabung Toroidal Untuk Tabung LPG 3 Kg*. Skripsi Jurusan Teknik Mesin, Universitas Lampung.
- [4]. Btachat, J., 2003, Collapse Tests on Externally Pressurized Toroids. *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 125, No. 1, pp. 91 – 96.
- [5]. Velickovic, V., 2007, Stress and Strain States in the Material of the Stressed Toroidal Container for Liquefied Petroleum Gas. *Scientific Technical Review*, Vol. LVII, No.3-4, pp. 94 – 105.
- [6]. Kisioglu, Y., 2009, Burst Tests and Volume Expansions of Vehicle Toroidal LPG Fuel Tanks. *Turkish Journal of Engineering Environmental Science*, Vol.33, pp. 117 – 125.
- [7]. Kisioglu, Y., 2011, Burst pressure determination of vehicle toroidal oval cross-section LPG fuel tank. *ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 133, Juni.
- [8]. Lubis, A., 2011, *Strength Design of Toroidal Tank For LPG 3 Kg*. Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin X, Universitas Brawijaya Malang, 2-3 November 2011.
- [9]. Lubis, A., Oktazari, Z., and Tanti, N., 2012, Nonlinear Finite Element Analysis of Pressurized LPG Toroidal Tank with Non-Radial Nozzle. Prosiding Seminar Nasional Energi Terbarukan dan Produksi Bersih, Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung, Bandar Lampung, 20 – 21 Juni.
- [10]. Lubis, A., Su'udi, A., and Tanti, N., 2012, Nonlinear Finite Element Analysis of Pressurized LPG Toroidal Tank with Radial Flush Nozzle. *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XI (SNTTM XI) & Thermofluid IV*, Universitas Gadjah Mada (UGM), Yogyakarta, 16-17 Oktober 2012.
- [11]. Lubis, A., Savetlana, S., and Su'udi, A., The Influence of Radius Ratio and Cross-Section Ovality on Limit Pressure of LPG Toroidal Tanks. *Prosiding Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XII*, Universitas Lampung, Bandar Lampung, 23 - 24 Oktober 2013.
- [12]. Winarto, and Wahyuadi, J.S., 2008, Pengkajian Karakteristik Bahan Baku (Raw Material) Lembaran Baja (Steel Plate) untuk Tabung Gas 3kg Produk Lokal dan Impor Secara Matalurgi. *BSN Indonesia*.
- [13]. Flugge, W., 1973, *Stresses In Shells*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. New York.
- [14]. Mahyunis, I., 2014, Analisis Tegangan dan Ekspansi Volume tanki Toroidal Penampang Oval dengan beban Internal Pressure. Skripsi Jurusan Teknik, Fakultas Teknik Universitas Lampung
- [15]. Harvey, J.F., 1985. *Theory and Design of Pressure Vessels*. Van Nostrand Reinhold Company. New York.