

Analisis Komposit Serat kaca/Vinil Ester terhadap Pembebanan Tekanan Internal untuk Aplikasi Tabung Gas Alam Terkompresi (*Compressed Natural Gas (CNG)*) Tipe IV

Risa Nurin Baiti dan Hosta Ardhyana

Jurusan Teknik Material dan Metalurgi, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

E-mail: hostaa@mat-eng.its.ac.id

Abstrak—Gas alam dalam bentuk *Compressed Natural Gas (CNG)* memiliki tekanan 20 MPa. Komposit serat kaca/vinil ester memiliki potensi untuk dibentuk menjadi tabung CNG. Studi ini menggunakan metode analisa numerik untuk mengkaji kemampuan komposit dalam menerima beban tekanan internal. Faktor keamanan yang digunakan adalah 1,5 sehingga nilai tekanan internal yang diaplikasikan sebesar 35 MPa. Konstanta teknik yang diinputkan pada analisa numerik diperoleh melalui pengujian tarik. Jumlah lapisan dan arah serat dipilih sebagai variabel bebas. Analisa numerik tabung CNG dilakukan dengan pendekatan tubular menggunakan program MSC Nastran. Distribusi beban pada tabung menunjukkan sudut (± 50) optimal untuk diaplikasikan. Konfigurasi sudut ($\pm 70, \pm 25$), memberikan hasil yang lebih optimum daripada penggunaan satu sudut. Jumlah lapisan minimum diperoleh dengan mengacu pada kriteria kegagalan laminat Hill. Komposit berada pada kondisi aman pada lapisan ke 180. Tetapi, komposit serat kaca/vinil ester dapat diaplikasikan pada pembuatan tabung liquified natural gas (LNG) yang bertekanan 2MPa dengan 23 lapis lamina. Sehingga, material komposit serat kaca/vinil ester tidak disarankan untuk digunakan pada pembuatan tabung CNG.

Kata Kunci—analisa numerik, komposit laminat, serat kaca, tabung compressed natural gas (CNG), vinil-ester.

I. PENDAHULUAN

PENGGUNAAN gas alam pada kendaraan bermotor umumnya menggunakan *Compressed Natural Gas (CNG)* daripada *Liquified Natural Gas (LNG)*. Hal ini dikarenakan efisiensi produksi CNG lebih tinggi daripada LNG yang memerlukan proses regasifikasi sebelum dapat didistribusikan melalui jalan darat [1]. Namun, salah satu permasalahan dari penggunaan CNG adalah kebutuhannya terhadap tempat penyimpanan yang lebih baik dari LNG karena tekanannya yang lebih besar, sekitar 200-220 bar [2]. Oleh karena itu, berbagai jenis material telah dikembangkan agar dapat memenuhi standar tersebut.

Terdapat empat macam tabung CNG. Tabung tipe IV terbuat dari komposit polimer yang menggunakan plastik HDPE di bagian dalam yang diproduksi dengan *blow molding*. Tetapi 90% tabung CNG yang saat ini beredar di pasaran masih terbuat dari logam yang merupakan jenis tabung tipe I. Logam sebagai material yang memiliki massa jenis yang tinggi dapat menghambat laju dari kendaraan sehingga mulai

dikembangkan dan dipasarkan tabung tipe IV yang bermassa lebih ringan. Permasalahan yang muncul dari penggunaan tabung CNG tipe IV adalah harganya yang mahal jika dibandingkan dengan tiga jenis tabung lainnya.

Berbagai macam jenis komposit polimer dapat digunakan dalam pembuatan tabung CNG tipe IV selama dapat memenuhi standard E/ECE/324. Telah banyak penelitian yang berusaha mencari komposisi komposit yang tepat agar diperoleh sifat yang optimum. Resin epoksi telah banyak diteliti dan menunjukkan hasil yang memuaskan. Tetapi, harga resin epoksi cukup tinggi sehingga kita dituntut untuk mencari alternatif bahan yang lebih terjangkau tetapi tetap mempertahankan performansi yang ada [3]. Penelitian ini memilih material komposit serat kaca/vinil-ester untuk menggantikan dominasi serat karbon/epoksi dan serat kaca/epoksi.

Optimasi sifat mekanik dari tabung tidak hanya dengan pemilihan material tetapi juga melalui pemilihan parameter proses produksi. Komposit yang bersifat anisotropik dapat direkayasa agar dapat mendekati material isotropik (material kuasi-isotropik : arah $[0, +45, -45, 90]$) dengan menggunakan lamina arah tunggal yang ditumpuk membentuk laminat dengan sudut yang berbeda – beda [4].

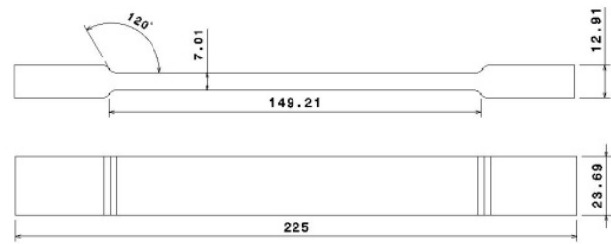
Penelitian – penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa sudut 55° merupakan besar sudut penggulungan tabung CNG [5]. Besar sudut optimum ini berlaku untuk komposit serat kaca E/epoksi dan juga serat gelas C/vinil-ester [6]. J.C. Velosa dkk [7] menggunakan sudut $[90, (+20, -20)]_2$, dan hanya dapat menahan tekanan sebesar 1,9 MPa. Dengan arah serat $[-70, +70, (-45, +45)_2, -70, 0, (+45, -45)_3, +45]$ dan rasio tegangan 0H:1A, F.Elliyin dkk [8] mengetahui bahwa terjadi penjaralan retak pada lamina arah 70° . Bakaiyan dkk [9] membandingkan nilai indeks kegagalan Hill pada tabung dengan arah serat $+\theta, -\theta, +\theta - \theta$ dan $90, 90, +\theta, -\theta$. Konfigurasi sudut $90, 90, +35, -35$ memiliki kondisi teraman. Tegangan hoop, aksial, dan radial dibandingkan untuk dianalisis pengaruh serat terhadap tekanan internal. Berdasarkan hal – hal tersebut, dapat dirancang suatu tabung komposit dengan arah serat yang dapat menahan baik beban aksial tetapi juga beban hoop. Pada penelitian ini dianalisis pengaruh arah serat terhadap distribusi beban pada tabung serta mencari ketebalan minimum untuk menahan tekanan 35MPa.

II. METODE PENELITIAN

A. Pengujian

Resin vinil-ester diproduksi oleh Shanghai Showa Highpolymer Co. Ltd. *Cumene hydroperoxide* digunakan sebagai katalis sedangkan *cobalt naphthenate* sebagai promotor sebanyak 2 % dan 3%. Serat kaca yang digunakan merupakan tipe *S-glass 2400 Tex* untuk aplikasi *filament winding*, produksi Taiwan Glass Ind.Corp. Diameter serat sebesar 17 μm. Tiga panel 50 × 50 cm dibuat dengan arah serat masing – masing 0°, 45°, dan 90°. Komposisi serat adalah 50% berat.

Pengujian tarik dilakukan untuk memperoleh konstanta teknik dan mengacu pada ASTM D3039. Gambar. 1. menunjukkan dimensi spesimen uji tarik. Konstanta teknik yang diinputkan berupa modulus elastisitas tarik arah 1 dan 2 serta modulus elastisitas geser. Terdapat tiga jenis spesimen yang diuji untuk mengetahui kekuatan tarik dan geser bahan terhadap arah beban yang berbeda. Panel arah 0° diuji untuk mengetahui sifat beban pada beban searah dengan arah serat. Panel arah 90° menerima beban tegak lurus dengan arah serat. Sedangkan, arah 45° diuji untuk mengetahui kekuatan gesernya.



Gambar. 1. Dimensi spesimen uji tarik

B. Analisis Tegangan dan Regangan

Tabung komposit mengacu pada sistem koordinat silindrikan seperti yang ditunjukkan pada Gambar. 2. Sistem koordinat silindrikan dipilih karena geometri yang dianalisis berbentuk silinder. Sumbu r menunjukkan arah radial, sumbu z menunjukkan arah aksial, dan sumbu T menunjukkan arah melingkar (*hoop*).

Displacement (pergeseran) pada arah radial dan aksial hanya ditentukan oleh koordinat radial dan aksial. Sehingga, *displacement* akibat pemberian tekanan pada tabung dapat diekspresikan sebagai berikut :

$$u_r = u_r(r), u_\theta = u_\theta(r, z), u_z = u_z(z) \tag{1}$$

Tabung komposit diasumsikan sebagai material orthotropik dua dimensi [10]. Berdasarkan sistem koordinat silindrikan, hubungan tegangan regangan pada material orthotropik dua dimensi sesuai persamaan dapat diturunkan menjadi berikut :

$$\begin{bmatrix} \sigma_z \\ \sigma_\theta \\ \tau_{z\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{Q}_{11} & \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{16} \\ \bar{Q}_{12} & \bar{Q}_{22} & \bar{Q}_{26} \\ \bar{Q}_{16} & \bar{Q}_{26} & \bar{Q}_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_z \\ \varepsilon_\theta \\ \gamma_{z\theta} \end{bmatrix} \tag{2}$$

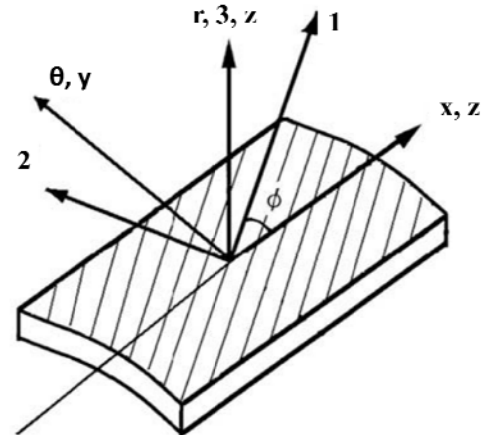
$$\begin{aligned} \sigma_z &= Q_{11}\varepsilon_z + Q_{12}\varepsilon_\theta \\ \sigma_\theta &= Q_{12}\varepsilon_z + Q_{22}\varepsilon_\theta \\ \tau_{z\theta} &= Q_{66}\gamma_{z\theta} \end{aligned} \tag{3}$$

C. Sifat Pelat Laminat Dua-Dimensi

Sifat pelat komposit dua dimensi dapat ditentukan dengan mengetahui matriks kekakuan laminat Q_{ij} .

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} & 0 \\ Q_{12} & Q_{22} & 0 \\ 0 & 0 & Q_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \gamma_{12} \end{bmatrix} \tag{4}$$

Notasi 1 dan 2 mengacu pada sumbu prinsipal material yang sejajar dan tegak lurus arah serat. Nilai komponen matriks dapat diketahui dari konstanta teknik.



Gambar.2. Hubungan antara sistem koordinat global, lokal dan silindrikan

$$Q_{11} = \frac{E_1}{1-\nu_{21}\nu_{12}} \tag{5}$$

$$Q_{12} = \frac{\nu_{12}E_2}{1-\nu_{21}\nu_{12}} \tag{6}$$

$$Q_{32} = \frac{E_2}{1-\nu_{21}\nu_{12}} \tag{7}$$

$$Q_{66} = G_{12} \tag{8}$$

Nilai tegangan dan regangan pada sistem koordinat silindrikan dan sistem koordinat lokal (serat) seperti yang tampak pada Gambar. 2. dapat dihubungkan dengan matriks transformasi $[T]$.

$$[T] = \begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin^2\theta & 2\sin\theta\cos\theta \\ \sin^2\theta & \cos^2\theta & -2\sin\theta\cos\theta \\ -\sin\theta\cos\theta & \sin\theta\cos\theta & \cos^2\theta - \sin^2\theta \end{bmatrix} \tag{9}$$

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \tau_{12} \end{bmatrix}_{70} = [T]_{70} \begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{bmatrix} \tag{10}$$

Notasi θ merupakan besar sudut serat yang mengacu pada sumbu aksial.

D. Kondisi Batas

Kondisi batas ditentukan oleh kondisi struktur geometri dan kondisi pembebanan. Slip diasumsikan tidak terjadi saat

proses pembebanan. Selain itu, tidak terdapat diskontinu pada tegangan dan *displacement*.

Tumpuan diberikan di kedua ujung tabung pada arah x,y, dan z sehingga tabung dapat mengikuti hukum newton I. Beban yang diberikan berupa internal merata pada permukaan tabung sebesar 35 MPa dengan faktor keamanan sebesar 1,5.

Persamaan integral yang dapat digunakan dalam mendefinisikan beban yang diterima tabung adalah sebagai berikut :

$$N_i = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_i dz = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \sigma_i^k dz \quad (11)$$

$$M_i = \int_{-h/2}^{h/2} z \sigma_i dz = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} z \sigma_i^k dz \quad (12)$$

Notasi N adalah gaya yang diaplikasikan sedangkan M adalah momen aplikasi.

Persamaan (13) menghubungkan antara kondisi batas dengan sifat material.

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & D_{11} & D_{12} & D_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & D_{12} & D_{22} & D_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & D_{16} & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_x^o \\ \epsilon_y^o \\ \gamma_{xy}^o \\ \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})_k] (h_k - h_{k-1}) \quad (14)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})_k] (h_k^2 - h_{k-1}^2) \quad (15)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n [(\bar{Q}_{ij})_k] (h_k^3 - h_{k-1}^3) \quad (16)$$

A, B dan D adalah konstanta integrasi. Tegangan, regangan, dan *displacement* tabung dapat diketahui setelah seluruh konstanta integrasi diketahui.

E. Kriteria Kegagalan

Kriteria kegagalan Hill digunakan untuk memprediksi kekuatan tiap lamina pada tabung komposit laminat. Kriteria kegagalan Hill ditulis dengan persamaan (15). Bentuk tensor dari kriteria ini adalah $F_{ij} \sigma_i \sigma_j = 1$. F_{ij} adalah parameter kekuatan material anisotropik.

$$\left[\frac{\sigma_1}{(\sigma_1^T)_{ult}} \right]^2 - \left[\frac{\sigma_1 \sigma_2}{(\sigma_1^T)_{ult}^2} \right] + \left[\frac{\sigma_2}{(\sigma_2^T)_{ult}} \right]^2 + \left[\frac{\tau_{12}}{(\tau_{12})_{ult}} \right]^2 < 1 \quad (17)$$

III. HASIL DAN DISKUSI

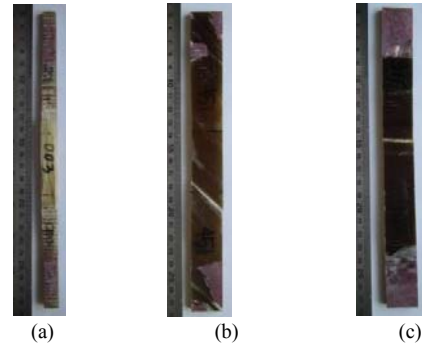
A. Sifat Tarik Komposit

Nilai kekuatan tarik spesimen arah 0° diperoleh setelah lima kali pengulangan pengujian. Tabel 1 menampilkan nilai kekuatan tarik dan modulus elastisitas rata – rata material. Gambar. 3. menunjukkan kondisi spesimen setelah diuji tarik. Pada spesimen arah 90°, empat dari lima spesimen mengalami patah di daerah *gage length*. Sehingga, nilai kekuatan tarik rata - ratanya menjadi lebih rendah dari yang diharapkan.

Tabel 1.

Kekuatan tarik komposit serat kaca/vinil ester.

Arah Serat	Kekuatan (MPa)	Modulus Elastisitas (MPa)
0°	515,8±18,5	5119,3+388,7
45°	47,2±11,4	779,2±193
90°	11,1±2,9	408,0 ± 52,9



Gambar. 3. Spesimen setelah diuji tarik (a) Arah beban searah arah serat, (b) Arah beban membentuk sudut 45° terhadap arah serat, dan (c) Arah beban tegak lurus arah serat.

Konstanta –konstanta teknik yang dibutuhkan adalah sebagai berikut :

$$E_1 = 5119,3 \pm 388,7 \text{ MPa,}$$

$$E_2 = 408,0 \pm 52,9 \text{ MPa,}$$

$$G_{12} = 422,7 \text{ MPa,}$$

$$\nu_{12} = 0,304,$$

sedangkan, sifat mekanik dari komposit serat kaca/vinil ester adalah sebagai berikut :

$$\sigma_1^{ult} = 515,8 \pm 18,5 \text{ MPa,}$$

$$\sigma_2^{ult} = 11,1 \pm 2,9 \text{ MPa,}$$

$$\tau_{12}^{ult} = 47,2 \pm 11,4 \text{ MPa.}$$

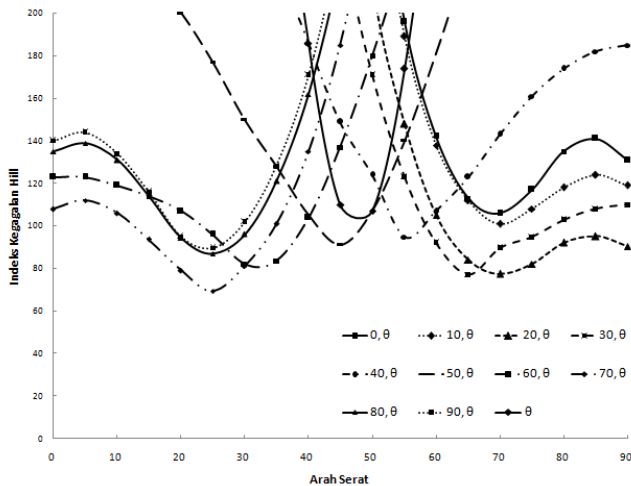
B. Sudut Optimum Penggulungan

Pengaruh arah serat terhadap nilai kriteria kegagalan Hill komposit dapat diketahui dengan memodelkan 20 lamina dengan sudut $[\pm\theta]$ yang disusun secara berulang sebanyak 10 kali. Gambar.4. menunjukkan bahwa sudut optimum penggulungan satu sudut adalah 50° karena memiliki indeks kegagalan Hill yang terendah. Hasil permodelan tersebut dapat dibandingkan dengan hasil penelitian - penelitian sebelumnya.

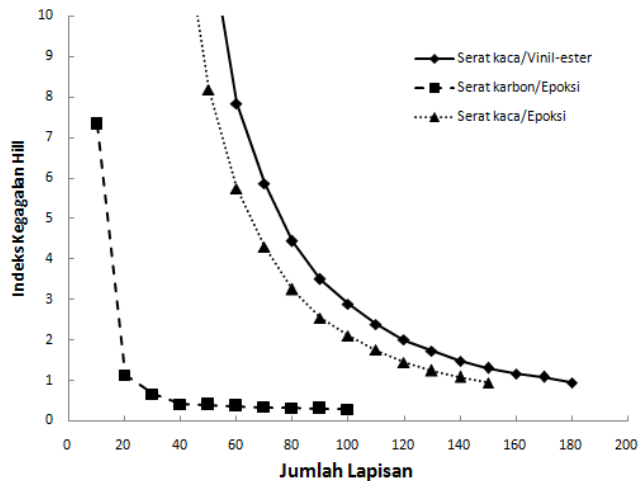
Konfigurasi yang terdiri atas lebih dari satu jenis sudut dapat meningkatkan kekuatan secara signifikan [11]. Nilai indeks kegagalan Hill yang lebih rendah mungkin diperoleh melalui kombinasi dua sudut yang berbeda. Oleh karena itu, permodelan dilakukan pada seluruh kemungkinan kombinasi dua sudut dengan mengabaikan posisi sudut. Gambar. 4. juga menunjukkan bahwa nilai kriteria kegagalan minimum dicapai oleh konfigurasi sudut $[+70,-70,+25,- 25]_s$ yaitu sebesar 69,4. Nilai ini meningkat 35,14% dari konfigurasi sudut tunggal $[+50,-50]$.

C. Ketebalan Minimum Tabung

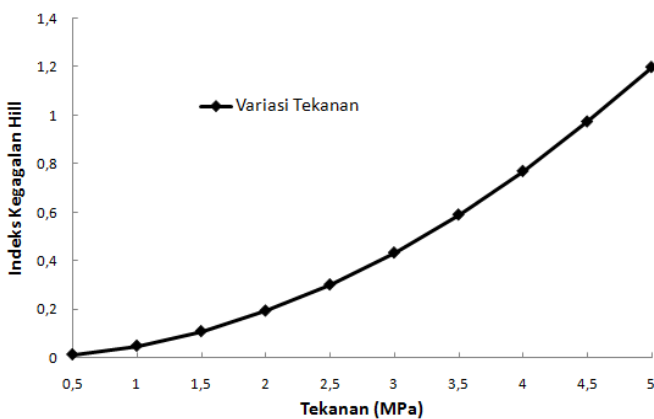
Konfigurasi sudut optimum yang telah diperoleh sebelumnya digunakan untuk mencari jumlah lapisan minimum yang dibutuhkan. Permodelan akan dihentikan saat nilai indeks kegagalan telah dibawah satu.



Gambar. 4. Pengaruh arah serat terhadap nilai indeks kegagalan Hill

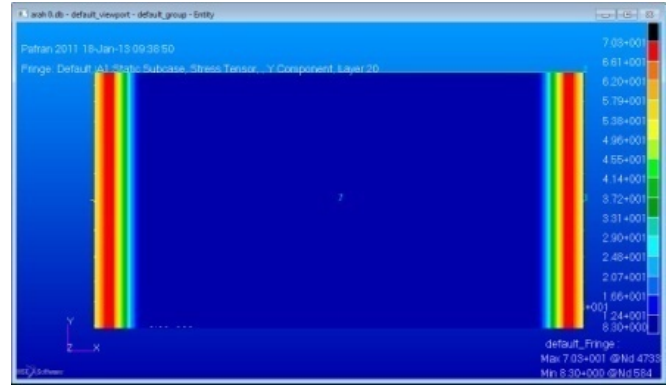


Gambar. 5. Perbandingan nilai indeks kegagalan Hill untuk tiga jenis komposit

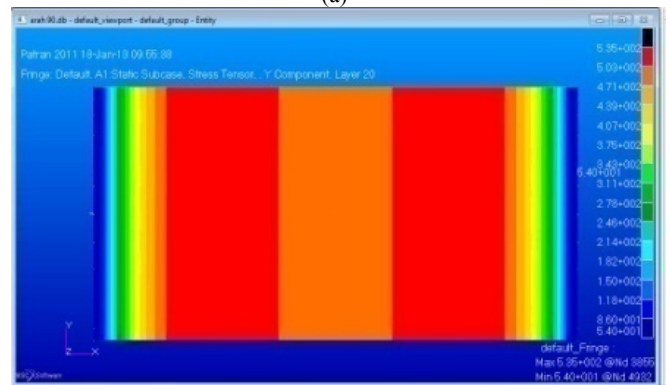


Gambar. 6. Nilai indeks kegagalan Hill untuk beberapa nilai tekanan dengan jumlah lapisan 23 lapis

Gambar. 5. menunjukkan bahwa jumlah lapisan minimum yang mampu menahan tekanan sebesar 35 MPa adalah sebanyak 180 lapis atau setebal 90mm. Nilai ini dianggap tidak efektif untuk diaplikasikan karena nilainya yang terlalu



(a)



(b)

Gambar. 7. Distribusi tegangan arah 2 pada komposit laminat 20 lapis (a) arah 0° dan (b) arah 90°

besar. Hasil permodelan telah memperhitungkan pengaruh arah serat terhadap tegangan hoop, tegangan aksial, dan tegangan geser hoop-aksial. Sehingga, perhitungan mekanika teknik klasik tidak dapat digunakan.

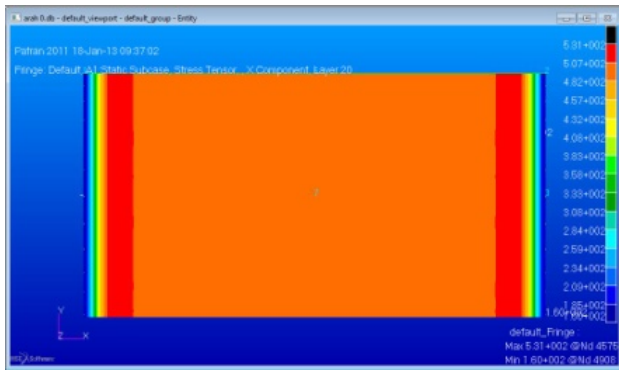
Beberapa jenis material dibandingkan nilai indeks kegagalan Hill-nya. Asumsi yang diberikan sama berupa tebal per lapisan, besar tekanan internal, tumpuan, dan geometri model. Komposit serat karbon/epoksi membutuhkan 23lapis (hasil interpolasi) untuk mampu menerima tekanan 35 MPa. Gambar. 5. juga menggambarkan bahwa komposit serat kaca/vinil ester memiliki nilai yang tidak jauh berbeda dengan komposit serat kaca/epoksi dimana kedua jenis komposit tersebut tidak mampu mensubstitusi serat karbon/epoksi. Sehingga, komposit serat kaca/vinil ester tidak disarankan untuk digunakan dalam aplikasi pembuatan tabung CNG yang bertekanan tinggi.

Gambar. 6. menunjukkan bahwa komposit serat kaca/vinil ester dengan jumlah lapisan yang sama (23 lapis) hanya mampu menahan tekanan sebesar 4,56MPa.

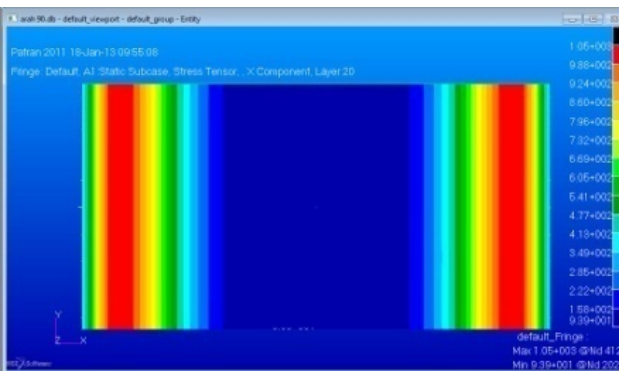
D. Distribusi Tegangan

Distribusi beban seperti yang nampak pada Gambar. 7. memplot distribusi tensor tegangan 1 dan 2 (koordinat lokal) pada lapisan ke-20 (terdalam). Nilai tegangan hoop dua kali lebih besar daripada tegangan aksial sehingga lebih berpeluang menyebabkan kegagalan.

Terdapat perbedaan yang signifikan terhadap perubahan besar sudut penggulungan terhadap distribusi tegangan arah y. Pada sudut yang relatif kecil (0°-40°), sebagian besar luasan

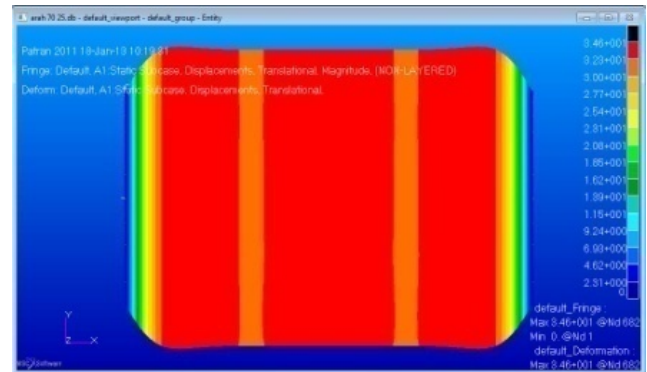


(a)

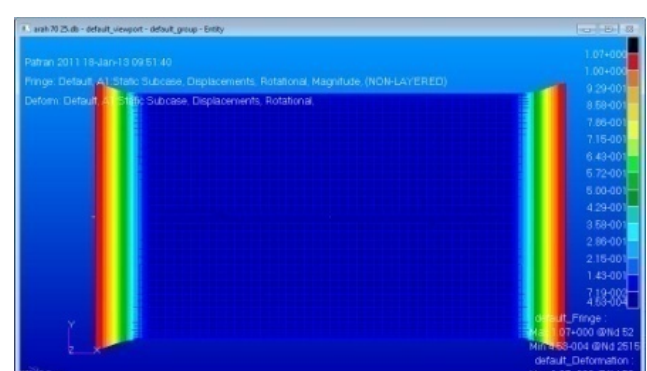


(b)

Gambar. 8. Distribusi tegangan arah 1 pada komposit laminat 20 lapis (a) arah 0° dan (b) arah 90°

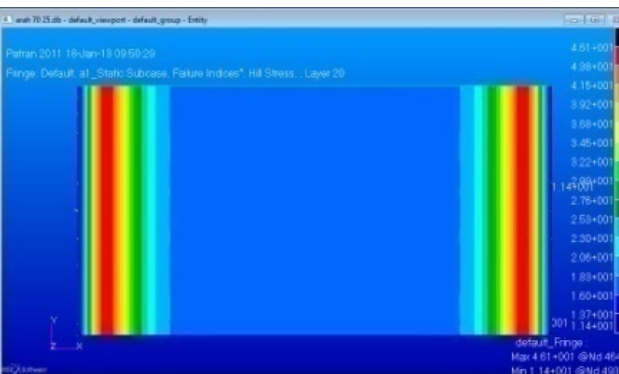


(a)



(b)

Gambar. 10. Pola dan distribusi displacement (a) terhadap sumbu θ (b) terhadap sumbu z



(a)



(b)

Gambar. 9. Variasi nilai indeks kegagalan Hill (a) Pada lapisan $\pm 25^\circ$ dan (b) Pada lapisan $\pm 70^\circ$

tabung di bagian tengah memiliki nilai yang rendah. Hal yang bertolakbelakang ditunjukkan pada tabung dengan sudut penggulangan relatif besar ($60,01^\circ-90^\circ$). Arah penggulangan sudut mendekati sumbu z sehingga serat lebih banyak menerima tegangan aksial daripada tegangan hoop.

Gambar. 8. menunjukkan distribusi tegangan arah x . Pada keempat sudut, bagian ujung tabung menjadi daerah teraman karena tumpuan tidak menahan tegangan pada arah x . Pada sudut kecil, serat lebih banyak menerima tegangan aksial sehingga daerah yang semula menjadi kritis. Pada penggulangan dengan sudut menengah, tabung memiliki daerah aman yang terluas daripada sudut yang lain.

Sudut optimum penggulangan diperoleh dengan mencari irisan dari distribusi tegangan x dan y . Sudut menengah memiliki kombinasi tegangan x dan y yang seimbang atau tidak berbeda drastis. Hal ini menjadi sebuah penjelasan mengapa sudut 50° merupakan sudut optimum penggulangan karena serat dapat menahan tegangan hoop dan tegangan aksial secara bersamaan.

Gambar. 9. menunjukkan variasi nilai indeks kegagalan Hill pada tabung. Pada komposit laminat 20 lapis, konfigurasi ($\pm 70^\circ, \pm 25^\circ$), lapisan ke-18 merupakan lamina arah -25° . Sedangkan, lapisan ke-20 merupakan lamina arah -70° .

Bagian yang memiliki nilai terendah adalah di bagian ujung tabung. Lapisan dengan arah $\pm 25^\circ$ memiliki nilai indeks kegagalan yang lebih rendah. Tidak ada perbedaan yang berarti antara lapisan dengan sudut $\pm 25^\circ$ serta lapisan dengan sudut $\pm 70^\circ$. Sudut $\pm 70^\circ$ memiliki nilai tegangan hoop yang lebih besar daripada tegangan aksialnya. Hal tersebut sesuai

dengan pembahasan sebelumnya mengenai pengaruh sudut terhadap tegangan arah x dan y .

Pembebanan berupa tekanan internal pada tabung juga menimbulkan perubahan dimensi atau deformasi. Nilai pergeseran terhadap sumbu θ lebih besar dari pergeseran terhadap sumbu z . Hal ini disebabkan nilai tegangan hoop lebih besar daripada tegangan aksial. Gambar. 10. menunjukkan pola dan distribusi *displacement* terhadap sumbu z dan θ pada komposit laminat 20 lapis. Tabung mengembang dengan membesarnya radius serta bertambah panjang. Bagian tengah tabung mengalami peningkatan radius yang paling besar. Daerah dengan penambahan radius terendah merupakan daerah yang diberi tumpuan pada arah θ . Pada *displacement* terhadap sumbu z , tabung bertambah panjang terutama di bagian ujungnya.

IV. KESIMPULAN

Arah serat memberikan pengaruh yang signifikan pada distribusi beban di tabung. Pembebanan tekanan internal ditransformasikan menjadi tegangan hoop dan tegangan aksial yang nilainya bervariasi terhadap arah serat. Hal ini ditunjukkan pada distribusi tegangan arah 1 dan arah 2 pada beberapa arah serat. Sehingga kombinasi antara sudut besar dan sudut kecil memberikan hasil paling optimum. Komposit serat kaca/vinil ester tidak memberikan hasil yang optimal untuk diaplikasikan sebagai tabung CNG tipe IV. Tetapi, material ini dapat diaplikasikan sebagai tabung LNG yang bertekanan sepuluh kali lebih rendah daripada CNG.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M.P. Hendriks, H.J.F. Franka, A.P.C. Faij, and M.L. Neelis, "Natural gas as an alternative to crude oil in automotive fuel chains well-to-wheel analysis and transition strategy development," *Energy Policy*, Vol. 33 (2005) 579-594.
- [2] *E/ECE/324Addendum 109: Regulation No.110*. United Nation (2008)
- [3] N. Gupta, R. Ye, and M. Porfiri, "Comparison of tensile and compressive characteristics of vinyl ester/glass microballoon syntactic foams," *Composites : Part B*, Vol.41 (2010) 236-245.
- [4] M.C.Y. Niu, *Composite Airframe Structure : Practical Design Information and Data*. Hong Kong : Commilit Press Ltc (1992) Ch. 2.
- [5] L. Parnas dan N. Katrici, "Design of fiber-reinforced composite pressure vessels under various loading conditions," *Composite Structures*, Vol. 58 (2002) 83-95.
- [6] M.W.K. Rosenow, "Wind angle effects in glass fibre-reinforced polyester filament wound pipes," *Composites*, Vol.15 (1984) 144-152.
- [7] J.C. Velosa, J.P. Nunes, J.P. Antunes, P.J. Silva, and A.T. Marques, "Development of a new generation of filament wound composite pressure cylinders," *Composite Science and Technology*, Vol. 69 (2009) 1348-1353.
- [8] F.Elliyin, M. Carroll, D. Kujawski, and A.S. Chiu, "The Behavior of Multidirectional Filament Wound Fiberglass/Epoxy Tubulars Under Biaxial Loading," *Composites Part A*, Vol.28A (1997) 781-790.
- [9] H. Bakaiyan, H. Hosseini, and E. Ameri, "Analysis of multi-layered filament-wound composite pipes under combined internal pressure and thermomechanical loading with thermal variations," *Composites Structure*, Vol. 88 (2009) 532-541.
- [10] V. Calard, *Formulas and Equations for The Classical Laminate Theory*. London (2011).
- [11] P. Mertiny, F. Elliyin, and A. Hothan, "An experimental investigation on the effect of multi-angle filament winding on the strength of tubular composite structure," *Composite Science and Technology*, Vol. 64 (2004) 1-9.