

ANALISIS TEGANGAN PADA TABUNG KOMPOSIT SERAT KARBON UNTUK MOTOR ROKET BERDIAMETER 200 MM DENGAN METODE *SINGLE LAYER LAMINATED ELEMENT*

Ronald Gunawan Putra, Robertus Heru Triharjanto

Peneliti Teknologi Dirgantara, LAPAN

e-mail: ronald_gp99@yahoo.com

ABSTRACT

This research analyzes rocket RWX 200 motor tube using carbon fiber reinforced for 6 mm thickness in order to optimize the weight. Carbon fiber is chosen due to its mechanical properties such as high strength and stiffness, and high temperature resistance, as the specification needs of the rocket motor tube. Rocket motor tube is manufactured by using weaving method, while the analysis and simulation is calculated by assuming it as laminate with the $[0/90]_s$ stacking sequence. From the calculation and simulation, it is determined that the X stress component of the laminates is below the strength of the material, while the Y stress component is beyond the strength of the material. It can be concluded that 90° laminae in each laminates has been failed.

Keywords: *Composite tube, Finite element method, Rocket motor*

ABSTRAK

Penelitian ini membahas tentang analisa tegangan pada tabung dengan material komposit serat karbon untuk ketebalan 6 mm. Studi ini merupakan bagian dari optimasi tabung motor roket RWX-200. Serat karbon dipilih karena memiliki kekuatan dan kekakuan yang tinggi, serta tahan temperature tinggi sesuai dengan spesifikasi material yang dibutuhkan untuk tabung motor roket. Kendati pada penelitian ini tabung roket dibuat dengan metode tenun (*weaving*), namun analisis dan simulasi diperhitungkan dengan mengasumsikan tabung motor sebagai lapisan (*laminate*) dengan sudut urutan penumpukan *laminae* (*stacking sequence*) $[0/90]_s$. Dari hasil perhitungan diketahui bahwa nilai tegangan arah X pada masing-masing *laminae* masih di bawah nilai kekuatan maksimum bahan, sedangkan tegangan arah Y di atas nilai kekuatan maksimum arah Y bahan referensi, sehingga dapat diambil kesimpulan *laminae* dengan sudut 90° pada masing-masing *laminate* telah mengalami kegagalan.

Kata kunci: *Tabung komposit, Metode elemen hingga, Motor roket*

1 PENDAHULUAN

Roket RWX-200 LAPAN merupakan salah satu roket kendali yang dikembangkan oleh LAPAN dalam rangka meningkatkan kemandirian sistem pertahanan dan keamanan Negara. Roket ini merupakan roket kendali 2 tingkat, dimana tingkat pertama merupakan *booster*, sedangkan tingkat 2 merupakan *sustainer* seperti terlihat pada Gambar 1-1. Pada tingkat pertama, pembakaran propelan dilakukan secara radial, sedangkan pada tahap 2

dilakukan secara aksial. Hal ini disesuaikan dengan fungsi dari jenis motor tersebut dalam menjalankan misinya (spesifikasi roket RWX 200 yang sedang dikembangkan terlihat pada Tabel 1-1).

Efisiensi dari roket (kecepatan dan kemampuan jelajahnya) akan sangat ditentukan oleh rasio dari berat struktur roket dibandingkan dengan total berat roket (rasio struktur). Semakin kecil rasio struktur, maka prestasi roket akan

naik secara eksponensial, sehingga banyak penelitian dilakukan untuk menggunakan bahan yang ringan namun kuat untuk menjadi struktur roket. Material struktur yang digunakan pada RWX-200 saat ini adalah Al 6061.



Gambar 1-1: Roket RWX 200 [Dokumen Teknik Pengembangan Roket LAPAN]

Tabel 1-1: SPESIFIKASI ROKET RWX 200 (Dokumen Teknik Pengembangan Roket LAPAN)

| | |
|---------------|--------------------|
| Panjang total | 263 cm |
| Massa total | 38 kg |
| Motor: | |
| 1. Booster | 270 kg (2.6 detik) |
| 2. Sustainer | 15 kg (30 detik) |
| Sudut elevasi | 50° |
| Range | 4.5 km |
| Altitude | 2 km |
| Average speed | 170 m/s |

Material roket yang digunakan saat ini memiliki permasalahan yang harus dipecahkan, mulai dari pengadaan material, hingga fleksibilitas dan kesesuaian material. Sekarang mulai dikembangkan material tabung motor menggunakan material komposit karbon (*Carbon Fiber Reinforced Plastic*) dengan matrix *Epoxy*, untuk itu diperlukan kajian mengenai material komposit karbon epoxy (CFRP) sehingga dapat ditentukan apakah material ini dapat diaplikasikan pada roket LAPAN.

Tujuan penelitian ini adalah sebagai berikut:

- Menghasilkan motor roket berdiameter 200 mm dengan rasio struktur 0,3.
- Menghitung kekuatan tabung motor roket RWX 200 LAPAN dengan material CFRP.
- Mengetahui respon tabung motor dengan material CFRP (akibat beban kerja).

Penelitian ini dibatasi hanya pada melakukan perhitungan analitik dan simulasi kekuatan tabung motor dengan ketebalan 2 mm hingga 6 mm dengan metode *laminated tube*.

- Beban dibatasi pada tekanan dari arah dalam tabung (*inner pressure*) sebesar 94 Kg/cm², dan gaya aksial sebesar 250 Kgf.
- Simulasi pada penelitian ini dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak NASTRAN 4.5.

2 DASAR TEORI

Material komposit merupakan perpaduan antara 2 atau lebih material secara makroskopis. Komposit serat merupakan material yang terdiri dari 2 fase, yaitu penguat dan matriks. Penguat berupa serat, sedangkan matrix berupa resin yang berfungsi untuk menggabungkan penguat. Masalah utama yang dihadapi adalah menggabungkan serat dan matriks sekaligus ini perlu diperjelas hingga membentuk material yang dapat diaplikasikan. [Dr. Ir. Bambang Kismono Hadi, 1995]

Bahan komposit serat karbon merupakan salah satu bahan komposit serat teknik yang banyak digunakan pada aplikasi *aerospace*. Beratnya yang hanya 1/5 berat baja memberikan keuntungan pada aplikasinya. Salah satu contohnya adalah *space shuttle* yang menggunakan komposit serat karbon pada *leading edges* dan *nose cone*, dimana temperatur kerjanya dapat mencapai 1500 C ketika kembali ke bumi. [Donald H. Middleton, 1990]

Epoxy merupakan salah satu matriks yang termasuk dalam kategori thermoset (bila dipanaskan akan mengeras). Matriks ini cukup banyak digunakan pada bidang *aerospace*, karena sifatnya yang tahan terhadap kelembaban, penyusutan rendah saat proses *curing*, tahan temperatur tinggi, mudah dalam proses fabrikasi. *Epoxy* cukup mudah didapat di Indonesia walaupun dengan harga yang terbilang cukup mahal.

Metode tenun (*weaving*) merupakan teknologi pembentukan bahan yang paling tua. Awalnya teknologi ini digunakan untuk membuat bahan-bahan tekstil. Perkembangannya sekarang telah mampu membuat bahan dengan bentuk yang kompleks menggunakan mesin, serta penggunaannya meluas sampai benda-benda yang diberi pembebanan. [Carl T. Herakovich, 1998]

Dibandingkan lamina berarah tunggal (*uni-directional*), bahan *woven* memberikan sifat mekanik yang lebih baik. Hal ini disebabkan adanya penguatan di berbagai sumbu. Selain itu, ketahanan terhadap beban impact, juga menjadikan tenunan banyak digunakan pada aplikasi struktur. Kekurangan jenis ini antara lain, kesulitan untuk dibentuk, adanya *crimp* (kerutan) benang, dan rendahnya ketahanan *in-plane* geser pada serat komposit. [Dr. Ir. Hermawan Judawisastra M., 2009]

Epoxy merupakan resin yang memiliki sifat adhesif. Fungsinya adalah menyatukan antara serat pada laminat, serta antar laminat. Diharapkan beban yang bekerja pada struktur ditahan serat bukan oleh resin dikarenakan resin tidak berfungsi menahan beban.

2.1 Monoclinic Material

Material yang simetris pada bidang x_1-x_2 akan memiliki konstanta elastik yang identik pada sumbu utama dan bahan. Implikasi dari ini dapat ditarik kesimpulan dengan memperhatikan hukum Hooke pada masing-masing

sistem koordinat, dengan demikian untuk material simetri pada bidang (x_1-x_2) , matriks kekakuan menjadi [Carl T. Herakovich, 1998]:

$$\begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{13} & 0 & 0 & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{23} & 0 & 0 & C_{26} \\ C_{13} & C_{23} & C_{33} & 0 & 0 & C_{36} \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & C_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{45} & C_{55} & 0 \\ C_{16} & C_{26} & C_{36} & 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \quad (2-1)$$

Terlihat bahwa material dengan satu bidang simetri memiliki 13 konstanta *elastic independent*, jenis material ini disebut dengan *monoclinic*.

2.2 Matriks Kekakuan

Bentuk matriks kekakuan yang telah ditransformasikan ditentukan dengan menggunakan persamaan konstitutif pada koordinat sumbu utama bahan, serta transformasi tegangan dan regangan.

$$\{\sigma\}_1 = [C]\{\varepsilon\}_1 \quad (2-2)$$

$$[T_1]\{\sigma\}_x = [C][T_2]\{\varepsilon\}_x \quad (2-3)$$

$$\{\sigma\}_x = [T_1]^{-1}[C][T_2]\{\varepsilon\}_x \quad (2-4)$$

Atau dapat ditulis

$$\{\sigma\}_x = [\bar{C}]\{\varepsilon\}_x \quad (2-5)$$

Dimana

$$[\bar{C}] \equiv [T_1]^{-1}[C][T_2] \quad (2-6)$$

matris kekakuan yang telah ditransformasi untuk material *monoclinic* untuk sudut sembarang 3 dimensi menjadi,

$$[\bar{C}_0] = \begin{bmatrix} \bar{C}_{11} & \bar{C}_{12} & \bar{C}_{13} & 0 & 0 & \bar{C}_{16} \\ \bar{C}_{12} & \bar{C}_{22} & \bar{C}_{23} & 0 & 0 & \bar{C}_{26} \\ \bar{C}_{13} & \bar{C}_{23} & \bar{C}_{33} & 0 & 0 & \bar{C}_{36} \\ 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{44} & \bar{C}_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \bar{C}_{45} & \bar{C}_{55} & 0 \\ \bar{C}_{16} & \bar{C}_{26} & \bar{C}_{36} & 0 & 0 & \bar{C}_{66} \end{bmatrix} \quad (2-7)$$

Dimana,

$$\bar{C}_{11} = m^4 C_{11} + 2m^2 n^2 (C_{12} + 2C_{66}) + n^4 C_{22} \quad (2-8)$$

$$\bar{C}_{12} = n^2 m^2 (C_{11} + C_{22} - 4C_{66}) + (n^4 + m^4) C_{12} \quad (2-9)$$

$$\bar{C}_{13} = m^2 C_{13} + n^2 C_{23} \quad (2-10)$$

$$\bar{C}_{16} = mn [m^2 (C_{11} - C_{12} - 2C_{66}) + n^2 (C_{12} - C_{22} + 2C_{66})] \quad (2-11)$$

$$\bar{C}_{22} = n^4 C_{11} + 2m^2 n^2 (C_{12} + 2C_{66}) + m^4 C_{22} \quad (2-12)$$

$$\bar{C}_{23} = n^2 C_{13} + m^2 C_{23} \quad (2-13)$$

$$\bar{C}_{26} = mn [n^2 (C_{11} - C_{12} - 2C_{66}) + m^2 (C_{12} - C_{22} + 2C_{66})] \quad (2-14)$$

$$\bar{C}_{33} = C_{33} \quad (2-15)$$

$$\bar{C}_{36} = mn (C_{13} - C_{23}) \quad (2-16)$$

$$\bar{C}_{44} = m^2 C_{44} + n^2 C_{55} \quad (2-17)$$

$$\bar{C}_{45} = mn (C_{55} - C_{44}) \quad (2-18)$$

$$\bar{C}_{55} = n^2 C_{44} + m^2 C_{55} \quad (2-19)$$

$$\bar{C}_{66} = n^2 m^2 (C_{11} - 2C_{12} + C_{22}) + (n^2 - m^2)^2 C_{66} \quad (2-20)$$

Dimana m: $\cos \theta$, n: $\sin \theta$

2.3 Teori Pelat Berlapis Klasik

Pelat berlapis (*laminated*) merupakan pelat yang terdiri dari 2 atau lebih lapisan (*laminae*) yang digabung bersama membentuk struktur yang integral. Pelat berlapis dibuat agar elemen struktur tersebut mampu menahan beban multiaksial, sesuatu yang tidak dapat dicapai dengan lapisan tunggal. Lapisan tunggal hanya kuat dalam arah seratnya, tetapi lemah dalam arah tegak lurus seratnya, oleh karena itu lapisan tunggal hanya cocok untuk beban uniaksial, sedang untuk menahan beban multiaksial, lapisan harus digabung dengan lapisan lain yang berbeda arah dengan lapisan pertama. [Robert M. Jones, 1994]

Hubungan tegangan-regangan lapisan tunggal dalam arah sumbu-sumbu utama bahan adalah:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \tau_{12} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & 0 \\ C_{12} & C_{22} & 0 \\ 0 & 0 & C_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \gamma_{12} \end{Bmatrix} \quad (2-21)$$

Pada koordinat sembarang dimana serat membentuk sudut θ terhadap sumbu x , hubungan tegangan-regangan diberikan oleh:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} C'_{11} & C'_{12} & C'_{16} \\ C'_{12} & C'_{22} & C'_{26} \\ C'_{16} & C'_{26} & C'_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2-22)$$

Asumsi-asumsi yang digunakan pada teori pelat berlapis klasik:

- Lapisan terdiri dari lapisan lapisan tunggal yang terikat sempurna.
- Setiap lapis merupakan material yang homogen dengan sifat yang telah diketahui.
- Masing-masing sifat lapisan dapat berupa isotropik, orthotropik, maupun *transversely isotropic*.
- Tiap lapisan berada pada kondisi tegangan bidang.
- Deformasi pada lapisan mengikuti hukum Kirchhoff. [Robert M. Jones, 1994]

Resultan gaya dan momen yang bekerja pada pelat berlapis diperoleh melalui integrasi tegangan yang terjadi pada setiap lapisan, sepanjang arah ketebalan pelat berlapis. Dalam arah sumbu x dinyatakan sebagai berikut:

$$N_x = \int_{-1/2}^{1/2} \sigma_x dz \quad (2-23)$$

$$M_x = \int_{-1/2}^{1/2} \sigma_x z dz$$

Dengan N_x dan M_x adalah gaya dan momen per satuan panjang. Secara lengkap persamaan gaya dan momen sering ditulis dalam bentuk:

$$\begin{Bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & A_2 & A_6 & B_1 & B_2 & B_6 \\ A_2 & A_{22} & A_{26} & B_{21} & B_{22} & B_{26} \\ A_6 & A_{26} & A_{66} & B_6 & B_{26} & B_{66} \\ B_1 & B_2 & B_6 & D_1 & D_2 & D_6 \\ B_{21} & B_{22} & B_{26} & D_{21} & D_{22} & D_{26} \\ B_6 & B_{26} & B_{66} & D_6 & D_{26} & D_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_x^0 \\ \varepsilon_y^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ \chi_x \\ \chi_y \\ \chi_{xy} \end{Bmatrix} \quad (2-28)$$

Dengan:

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n C'_{ijk} (z_k - z_{k-1}) \quad (2-24)$$

$$B_{ij} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n C'_{ijk} (z_k^2 - z_{k-1}^2) \quad (2-25)$$

$$D_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n C'_{ijk} (z_k^3 - z_{k-1}^3) \quad (2-26)$$

Matriks A_{ij} disebut sebagai matriks kekakuan panjang (*extensional striffness matrix*), sedangkan matriks B_{ij} adalah matriks kekakuan kopel (*couple striffness matrix*), dan D_{ij} adalah matriks kekakuan lentur (*bending striffness matrix*).

2.4 Modulus Elastisitas Ekuivalen

Pada struktur komposit kadang-kadang dibutuhkan data modulus elastisitas ekuivalen pelat berlapis untuk memudahkan analisis. Dalam hal ini pelat berlapis dipandang sebagai bahan homogen dengan harga modulus elastisitas tertentu. [Carl T. Herakovich, 1998]

Untuk susunan simetri seimbang, harga modulus elastisitas ekuivalen ini dapat dicari dengan mudah, yaitu:

$$E_x = \frac{(A_{11} \cdot A_{22} - A_{12}^2)}{A_{22} \cdot h} \quad (2-27)$$

$$E_y = \frac{(A_{11} \cdot A_{22} - A_{12}^2)}{A_{11} \cdot h} \quad (2-28)$$

$$v_{xy} = \frac{A_{12}}{A_{22}} \quad (2-29)$$

$$v_{yx} = \frac{A_{12}}{A_{11}} \quad (2-30)$$

3 DESAIN, PERHITUNGAN, DAN SIMULASI

3.1 Desain

Tabung motor roket RWX 200 sekarang menggunakan material Al 6061 dengan ketebalan 6 mm. Tebal tabung diperoleh dari hasil perhitungan dan simulasi beban yang bekerja pada motor roket, yang dilakukan oleh bidang

propulsi LAPAN, serta kemampuan untuk memproduksi tabung motor tersebut. Beban-beban yang bekerja pada motor roket berupa tekanan dalam (*inner pressure*), termal, dan gaya aksial akibat pembakaran propelan.

Berat tabung motor sekarang adalah 5.33 Kg, sedangkan jika dihitung dengan material CFRP dengan ketebalan yang sama, maka berat tabung akan menjadi 3.44 Kg. Ini berarti ada pengurangan berat sebesar 1.89 Kg atau 35%.

Untuk produksi awal tabung motor menggunakan material komposit karbon epoksi akan dilakukan di Balai Tekstil Departemen Perindustrian Bandung menggunakan metode tenun (*weaving*) 2D dengan sudut terbatas 0/90. Sudut tenunan terbatas disebabkan oleh spesifikasi alat yang tersedia.

Untuk mendapatkan desain tabung yang optimal, maka dilakukan studi parametrik terhadap ketebalan dan urutan penumpukan laminat. Studi parametrik dilakukan dengan variasi ketebalan 1 hingga 6 mm. Hal ini dilakukan dengan pertimbangan jika tebal tabung lebih dari 6 mm, maka komponen lain juga akan bertambah ketebalannya, yang akan mengakibatkan berat komponen tersebut bertambah. Jika tebal tabung kurang dari 3 mm, maka proses produksi komponen motor lainnya akan mengalami kesulitan.

Desain tabung motor ditargetkan terdiri dari laminat dengan sudut 0/90, dan urutan penumpukan (*stacking sequence*) dibuat simetri dengan pertimbangan utama tidak diinginkannya ada kopel antara gaya tarik dan lenturan ketika beban bekerja. Sudut 0/90 dipilih karena menyesuaikan dengan sudut tenun yang sebenarnya, yang terbatas pada sudut 0/90 saja, sehingga diharapkan akan didapat model yang bisa merepresentasikan kondisi aslinya.

Proses produksi tabung motor menggunakan mesin tenun dan kemudian diberi resin epoksi bukan merupakan proses panas, sehingga tidak

akan mengakibatkan puntiran pada produk akhir tabung motor roket.

3.2 Perhitungan

Studi parametrik dilakukan terhadap 5 laminat dengan masing-masing ketebalan 2 hingga 6 mm, dimana asumsi tebal tiap-tiap lamina adalah 0.2 mm. Beban yang diberikan adalah gaya tarik sebesar 250 Kgf arah sumbu X. Beban ini merupakan thrust rata-rata roket RWX 200.

Dengan menggunakan persamaan (2-12), diperoleh *compliance matrix* sebagai berikut:

$$S = \begin{bmatrix} 7.326 \times 10^{-3} & -4.63 \times 10^{-3} & -1.852 \times 10^{-3} & 0 & 0 & 0 \\ -4.63 \times 10^{-3} & 0.093 & -0.028 & 0 & 0 & 0 \\ -1.852 \times 10^{-3} & -0.028 & 0.093 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.13 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.179 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.179 \end{bmatrix}$$

Dari hubungan (2-3) dan (2-11), akan diperoleh *stiffness matrix* [C]:

$$[C] = \begin{bmatrix} 143.474 & 8.829 & 5.518 & 0 & 0 & 0 \\ 8.829 & 12.411 & 3.9 & 0 & 0 & 0 \\ 5.518 & 3.9 & 12.08 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5.6 \end{bmatrix}$$

Dengan menggunakan persamaan (2-22) hingga (2-34), maka nilai transformasi matriks, $[\bar{C}_0]$, untuk sudut 0 adalah:

$$[\bar{C}_0] = \begin{bmatrix} 143.474 & 8.829 & 5.518 & 0 & 0 & 0 \\ 8.829 & 12.411 & 3.9 & 0 & 0 & 0 \\ 5.518 & 3.9 & 12.08 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 7.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 5.6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5.6 \end{bmatrix}$$

Dan untuk sudut 90, adalah:

$$[\bar{C}_{90}] = \begin{bmatrix} 12.411 & 8.829 & 3.9 & 0 & 0 & 0 \\ 8.829 & 143.474 & 5.518 & 0 & 0 & 0 \\ 3.9 & 5.518 & 12.08 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 5.6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 7.7 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 5.6 \end{bmatrix}$$

3.2.1 Modulus ekuivalen & distribusi tegangan

Perhitungan modulus ekuivalen dan kekuatan laminat dengan beban aksial dilakukan dengan membuat pelat laminat dengan panjang 25 cm, lebar 2,5 cm (sesuai dengan standar pengujian komposit ASTM D3552-77) [Carl T. Herakovich, 1998], dilakukan dengan susunan masing-masing laminat adalah sebagai berikut:

Dengan menggunakan persamaan (2-36), maka akan diperoleh nilai $[\bar{C}_0]$ dan $[\bar{C}_{90}]$ untuk masing-masing laminat:

$$[\bar{C}_0] = \begin{bmatrix} 143.474 & 8.829 & 0 \\ 8.829 & 12.411 & 0 \\ 0 & 0 & 5.6 \end{bmatrix}$$

$$[\bar{C}_{90}] = \begin{bmatrix} 12.411 & 8.829 & 0 \\ 8.829 & 143.474 & 0 \\ 0 & 0 & 5.6 \end{bmatrix}$$

Untuk laminat tebal 6 mm (30 lapis) Pada laminat ini urutan penumpukan lamina (*stacking sequence*) adalah [0/90]_s. Matriks A_{ij} diperoleh dari persamaan (2-39):

$$[A_{ij}] = \begin{bmatrix} 0.494 & 0.053 & 0 \\ 0.053 & 0.441 & 0 \\ 0 & 0 & 0.034 \end{bmatrix}$$

Modulus ekuivalen ditentukan dari persamaan (2-42) hingga (2-46), yaitu:

$$E_x = 81.272 \text{ GPa}$$

$$E_y = 72.552 \text{ GPa}$$

$$\nu_{xy} = 0.12$$

$$\nu_{yx} = 0.107$$

Tegangan tiap lamina akibat beban kerja:

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_{0 \text{ ply}} = \begin{Bmatrix} 232.446 \\ 11.98 \\ 0 \end{Bmatrix} \text{ MPa}$$

$$\begin{Bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix}_{90 \text{ ply}} = \begin{Bmatrix} 18.528 \\ 13.691 \\ 0 \end{Bmatrix} \text{ MPa}$$

Tabel 3-1: DISTRIBUSI TEGANGAN LAMINAT 6 mm

| lapisan | sudut | sx (Mpa) | sy (Mpa) |
|---------|-------|----------|----------|
| ganjil | 0 | 232.446 | 11.98 |
| genap | 90 | 18.528 | 13.691 |

3.3 Simulasi

3.3.1 Simulasi laminat dengan beban aksial

Simulasi dilakukan dengan tujuan untuk membandingkan hasilnya dengan perhitungan analitik. Simulasi dilakukan dengan membuat model yang sesuai dengan standard ASTM D3552-77. Kondisi batasnya adalah di-*fix* pada salah satu ujungnya, sedangkan beban sebesar 100 KN/mm diberikan di ujung yang lain.

Tebal laminat 6 mm (30 lapis), dengan sudut 0 dan 90 derajat, distribusi tegangan pada sudut 0 derajat untuk S_x adalah 18.5 Mpa, dan untuk S_y adalah 0.38 Mpa. Pada sudut 90, nilai S_x adalah 0.75 Mpa, dan S_y 18.81 Mpa. Sudut 0 merupakan sudut pada lapisan ganjil, sedangkan 90 pada lapisan genap.

4 PEMBAHASAN

Model tabung motor komposit dianalogikan sebagai bahan komposit laminat dengan sudut terbatas [0/90]_s.

Hal ini disesuaikan dengan rencana produksi dari tabung motor yang akan dilakukan di Balai Tekstil Bandung, menggunakan metode tenun 2D, dengan sudut terbatas 0/90. Analogi ini bertujuan untuk mendapatkan hasil perhitungan dan simulasi yang mendekati kondisi sebenarnya, sehingga hasilnya dapat dibandingkan dengan hasil uji hidrostatis yang akan dilakukan di LUK BPPT.

Sifat mekanik bahan ditentukan dengan melakukan perhitungan analitik terhadap masing-masing laminat menggunakan data sifat mekanik bahan referensi yaitu bahan komposit serat karbon-epoksi T300/5208, sedangkan untuk mengetahui respon tabung terhadap beban kerja yang diberikan, dilakukan dengan 2 cara, yaitu perhitungan secara analitik, dan simulasi menggunakan perangkat lunak NASTRAN 4.5.

Pada penelitian ini beban kerja yang diberikan dibatasi hanya pada beban aksial sebesar 250 Kgf atau 100 KN/mm, yang merupakan nilai gaya dorong rata-rata roket RWX 200, dan tekanan dalam (*inner pressure*) sebesar 94 Kg/cm², yang merupakan tekanan di ruang bakar saat pembakaran terjadi dengan *load factor* 1,5. Nilai-nilai tersebut didapat berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi yang dilakukan oleh bidang Propulsi, Pusat Teknologi Roket, LAPAN.

Dari hasil perhitungan analitik didapat nilai modulus elastisitas ekuivalen untuk tebal tabung 6 mm:

| Item | Nilai |
|----------------|--------|
| Tebal | 6 mm |
| Jumlah Laminat | 30 |
| Ex (GPa) | 81.272 |
| Ey (GPa) | 72.552 |
| ν_{xy} | 0.12 |
| ν_{yx} | 0.107 |

Tegangan total tiap lamina untuk masing-masing laminat diperoleh dari penjumlahan tegangan hasil simulasi dengan beban aksial dan tekanan dalam.

Terlihat bahwa nilai tegangan pada serat dengan sudut 0 masih jauh di bawah nilai kekuatan maksimumnya, sedangkan nilai tegangan pada serat dengan sudut 90 banyak yang berada jauh di atas nilai kekuatan maksimumnya. Mengacu pada salah satu kriteria kegagalan, yaitu kriteria tegangan maksimum, maka banyak laminat sudut 90 pada masing-masing laminat telah mengalami kegagalan. Hal ini dapat dilihat dari hasil penjumlahan tegangan pada Tabel 3-1.

5 KESIMPULAN

Dari penelitian yang dilakukan dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- Telah didesain tabung komposit dengan *Stacking Sequence* laminat simetri [0/90], dengan maksud agar tidak ada puntiran akibat beban aksial. dimana sifat mekanik bahan dihitung dengan modulus ekuivalen laminat.
- Telah dihitung tegangan pada lamina tabung motor roket dengan metoda analitik, dan metoda numerik elemen hingga menggunakan NASTRAN 4.5, dimana beban kerja yang diberikan pada studi kasus tabung motor roket dibatasi hanya pada beban aksial sebesar 100 KN/mm, dan tekanan

dalam sebesar 94 Kg/cm². Dari hasil perhitungan dan simulasi diketahui bahwa lamina sudut 90 pada masing-masing laminat telah mengalami kegagalan.

- Yang bisa dilakukan agar tabung komposit tidak mengalami kegagalan adalah dengan menambahkan jumlah lamina sudut 0, yang akan menahan beban utama pada arah radial, walaupun akan mengakibatkan urutan penumpukan laminat menjadi tidak simetri.

DAFTAR RUJUKAN

- Carl T. Herakovich, 1998. *Mechanics of Fibrous Composites*, University of Virginia.
- Dr. Ir. Bambang Kismono Hadi, 1995. *Diktat Kuliah Struktur Komposit*, Institut Teknologi Bandung.
- Dr. Ir. Hermawan Judawisastra M.Eng., 2009. *Diktat Kuliah Teknologi Serat*, Institut Teknologi Bandung.
- Dokumen Teknik Pengembangan Roket LAPAN.
- Donald H. Middleton, 1990. *Composite Material in Aircraft Structures*, Longman Scientific & Technical.
- Robert M. Jones, 1994. *Mechanics of Composite Materials*, New York, McGrawhill Book Co.

