

ANALISIS NUMERIK VARIASI LAPISAN PADA BEJANA TEKAN KOMPOSIT TIPE IV MENGGUNAKAN FEM

*Fathan Nadhir Rusyandi¹, Mohammad Tauviqirrahman², Sulardjaka²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

E-mail: fathanadhir@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini menyelidiki perilaku struktural bejana tekan komposit Tipe IV di bawah tekanan internal menggunakan analisis elemen hingga (FEA). Model yang digunakan memiliki liner dari polietilena densitas tinggi (HDPE) yang diperkuat dengan lapisan luar komposit polimer yang diperkuat serat karbon. Analisis difokuskan pada pengaruh jumlah lapisan komposit terhadap tegangan lingkaran, dan deformasi total. Empat konfigurasi lapisan dievaluasi. Peningkatan jumlah lapisan dari 5 menjadi 20 menyebabkan penurunan tegangan lingkaran sebesar 69,9% dan pengurangan deformasi sebesar 66,7%. Hasil ini menyoroti pengaruh signifikan ketebalan laminasi terhadap perilaku tegangan. Optimasi jumlah lapisan dapat secara signifikan meningkatkan keamanan dan efisiensi bejana tekan komposit, khususnya untuk aplikasi penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi.

Kata Kunci : analisis elemen hingga; bejana tekan komposit; deformasi; jumlah lapisan; tegangan lingkaran

Abstract

This study investigates the structural behavior of Type IV composite pressure vessels under internal pressure using finite element analysis (FEA). The model features a high-density polyethylene (HDPE) liner reinforced with outer layers of carbon fiber-reinforced polymer composite. The analysis focuses on the effect of composite layer quantity on circumferential stress and total deformation. Four layer configurations were evaluated. Increasing the number of layers from 5 to 20 resulted in a 69.9% reduction in circumferential stress and 66.7% decrease in deformation. These results highlight the significant influence of laminate thickness on stress behavior. Optimizing the number of layers can substantially enhance the safety and efficiency of composite pressure vessels, particularly for high-pressure hydrogen storage applications.

Keywords : circumferential stress; composite pressure vessel; deformation; finite element analysis; number of layers

1. Pendahuluan

Perkembangan bejana tekan komposit tipe IV (CPV) telah menjadi kemajuan penting dalam bidang ilmu material, khususnya untuk aplikasi penyimpanan hidrogen. Bejana ini dirancang dengan liner polietilen densitas tinggi (HDPE) dan diperkuat dengan lapisan polimer yang diperkuat serat karbon (CFRP), menawarkan solusi yang kuat, ringan, dan mampu menahan tekanan tinggi. Interaksi kompleks antara berbagai lapisan, terutama di bawah variasi tekanan internal, memerlukan analisis numerik yang mendalam untuk memastikan integritas struktural dan kinerjanya.

Variasi lapisan termasuk ketebalan, orientasi serat, dan komposisi material merupakan faktor kritis dalam menentukan perilaku mekanis bejana tekan komposit. Penelitian menunjukkan bahwa variasi susunan lapisan dan konfigurasinya dapat secara signifikan memengaruhi distribusi tegangan dan mekanisme kegagalan [1]. Selain itu, interaksi antar-lapisan dan rasio ketebalan juga berperan penting dalam memprediksi tekanan burst serta ketahanan struktural, seperti yang ditekankan dalam studi multiskala [2] dan analisis hibridisasi lapisan [3]. Pemahaman mendalam tentang parameter ini esensial untuk optimasi desain, meningkatkan keamanan, dan kinerja bejana.

Lebih lanjut menjelaskan bagaimana variasi desain lapisan dapat mengoptimasi sifat mekanik bejana Tipe IV, dengan fokus pada prediksi tekanan burst yang stabil melalui pemodelan akurat. Temuan mereka memperkuat gagasan bahwa pertimbangan cermat terhadap susunan material sangat penting untuk menyeimbangkan kekuatan dan berat.

Jumlah lapisan komposit merupakan parameter struktural utama yang memengaruhi kemampuan bejana untuk menahan tegangan internal. Studi telah menunjukkan bahwa peningkatan jumlah lapisan meningkatkan kekuatan mekanik dan mengurangi deformasi secara keseluruhan [4]. Penggabungan pengaturan lapisan hoop dan heliks yang tepat dapat mengoptimalkan distribusi tegangan internal [5]. Selanjutnya, penelitian tentang menekankan risiko dari penyelarasan serat yang tidak memadai dan jumlah lapisan yang tidak mencukupi, yang keduanya dapat menyebabkan kegagalan struktural yang signifikan [6]. Sensitivitas tegangan aksial terhadap strategi penumpukan lapisan [7][8].

Teknik manufaktur memainkan peran penting dalam mencapai konfigurasi lapisan yang optimal. Penelitian menyoroti tantangan dalam penerapan lapisan ganda yang presisi selama fabrikasi bejana tekan komposit, di mana

ketidaksempurnaan lapisan dapat menyebabkan masalah kinerja [9][10]. Inovasi seperti *laser-assisted tape winding* telah diterapkan untuk meningkatkan adhesi dan keseragaman lapisan, mendukung produksi bejana komposit berkualitas tinggi.

Bejana tekan komposit Tipe IV terus menarik perhatian besar dalam penelitian karena rasio kekuatan-terhadap-beratnya yang tinggi, ketahanan terhadap korosi, dan kemampuannya untuk menyimpan gas bertekanan tinggi seperti hidrogen. Meskipun banyak studi telah membahas perilaku tegangan dan deformasi, masih diperlukan penelitian lanjutan untuk ketebalan lapisan. Analisis elemen hingga (FEA) tetap menjadi alat penting untuk menyelidiki pola tegangan dan deformasi, namun masih terdapat tantangan dalam memahami sepenuhnya mekanisme deformasi dan interaksi kompleks dari berbagai parameter desain. Studi ini bertujuan untuk memperdalam pemahaman mengenai distribusi tegangan dan deformasi melalui optimasi jumlah lapisan komposit, yang akan berkontribusi pada desain bejana tekan Tipe IV yang lebih aman dan efisien.

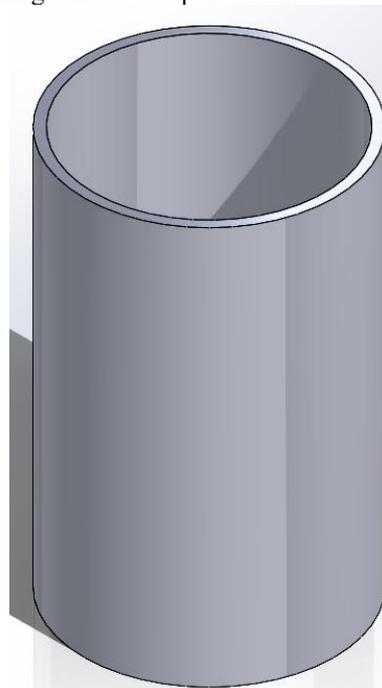
2. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan simulasi numerik berbasis metode elemen hingga (FEM) untuk menyelidiki respons mekanik bejana tekan komposit yang dikenai tekanan internal. Analisis difokuskan pada pemeriksaan pengaruh jumlah lapisan laminasi terhadap distribusi tegangan dan perilaku deformasi. Sebuah metodologi yang sistematis dan terstruktur diterapkan untuk memastikan akurasi model, konsistensi proses simulasi, dan validitas interpretasi hasil yang diperoleh.

2.1 Material dan Geometri

Material yang digunakan adalah komposit serat karbon UD T700/epoksi dan liner dari polietilena densitas tinggi (HDPE). Material HDPE Liner memiliki modulus elastisitas sebesar 0,9 GPa yang menunjukkan tingkat kekakuannya dalam menahan deformasi elastis. Rasio Poisson material ini sebesar 0,42 menggambarkan perilakunya saat menerima tegangan lateral. Kekuatan luluh HDPE Liner mencapai 23 MPa, yang merupakan batas tegangan maksimum sebelum material mulai mengalami deformasi plastis permanen. Material ini memiliki densitas relatif rendah yaitu 958 kg/m³, yang khas untuk material polimer. Secara keseluruhan, HDPE Liner bersifat isotropik dimana sifat mekaniknya seragam di segala arah.

Komposit unidirectional T700/Epoxy menunjukkan sifat mekanik yang sangat anisotropik akibat orientasi seratnya. Pada arah serat utama (X), modulus elastisitas mencapai 98,4 GPa yang sangat tinggi, sementara pada arah transversal (Y dan Z) modulusnya turun drastis menjadi 6,45 GPa. Rasio Poisson bervariasi mulai dari 0,3 untuk bidang XY dan YZ, hingga 0,11 untuk bidang XZ yang menunjukkan respons berbeda terhadap pembebanan. Modulus geser material ini berkisar antara 2,69-2,89 GPa dengan nilai tertinggi pada bidang XZ. Perbedaan signifikan sifat mekanik pada berbagai arah ini merupakan karakteristik khas material komposit berpenguat serat unidirectional. Geometri bejana tekan berbentuk silinder berongga dengan diameter luar 224 mm, diameter dalam 207 mm, ketebalan dinding 2 mm, dan panjang 360 mm. Gambar 1 menunjukkan geometri dari percobaan.



Gambar 1 Geometri *Isometric*

2.2 Simulation Setup

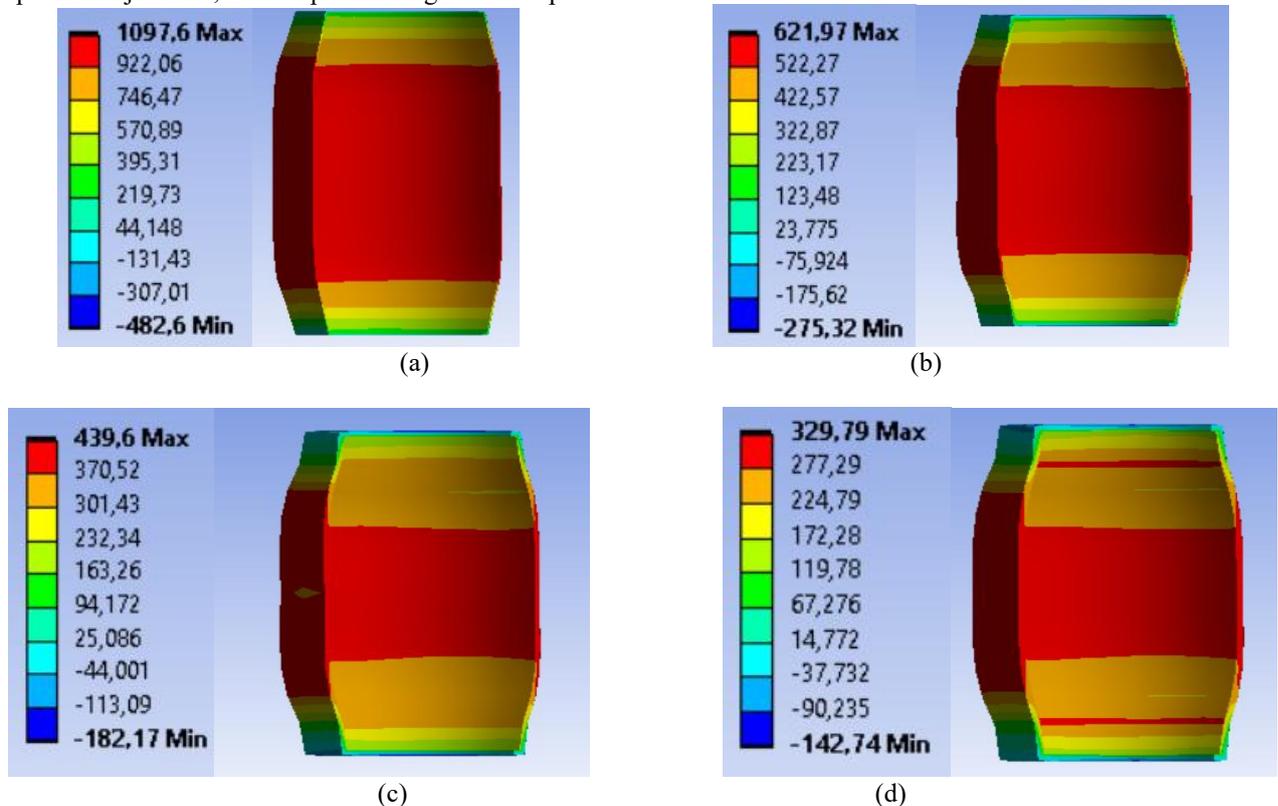
Simulasi elemen hingga dilakukan menggunakan ANSYS Workbench, dengan konfigurasi lapisan komposit yang didefinisikan melalui modul ANSYS Composite PrePost (ACP). Simulasi dilakukan untuk mempelajari pengaruh jumlah lapisan (5, 10, 15, 20) terhadap respons struktural, dengan pola susunan serat yang konstan yaitu [+55/-55/+55/-55/+55/-55/+55/-55/+55/-55] untuk setiap konfigurasi.

Analisis struktural statis dilakukan dengan memberikan tumpuan tetap pada kedua ujung bejana dan mendistribusikan tekanan internal sebesar 25 MPa secara merata. Pengukuran tegangan dan deformasi dilakukan pada titik-titik referensi tertentu untuk menilai kinerja bejana tersebut.

3. Hasil dan Pembahasan

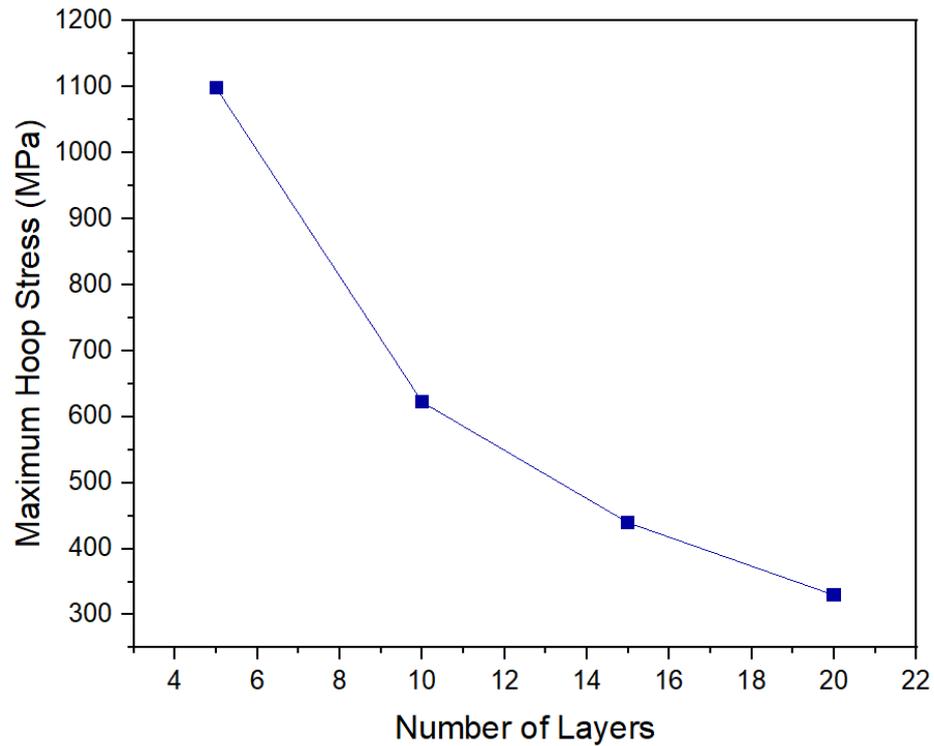
Pengaruh jumlah lapisan telah dibahas dalam bagian ini. Jumlah lapisan, bersama dengan orientasi serat, merupakan faktor desain yang krusial dan memengaruhi berbagai aspek kinerja bejana. Penambahan lebih banyak lapisan komposit meningkatkan kekuatan dan kekakuan bejana, sehingga meningkatkan kapasitas beban dan kekakuan strukturnya. Tekanan pecah juga dipengaruhi oleh jumlah lapisan, karena lapisan tambahan memberikan penguatan yang lebih besar. Namun, peningkatan jumlah lapisan dapat menyebabkan struktur menjadi lebih tebal, yang mungkin menambah berat suatu pertimbangan penting dalam aplikasi di mana berat menjadi faktor utama.

Penelitian dilakukan dengan perbandingan antara konfigurasi dengan 5, 10, 15, dan 20 lapisan komposit. Secara khusus, seperti ditunjukkan pada Gambar 2, tegangan lingkaran menurun dari 1097,6 MPa pada konfigurasi 5 lapisan menjadi 329,79 MPa pada konfigurasi 20 lapisan.



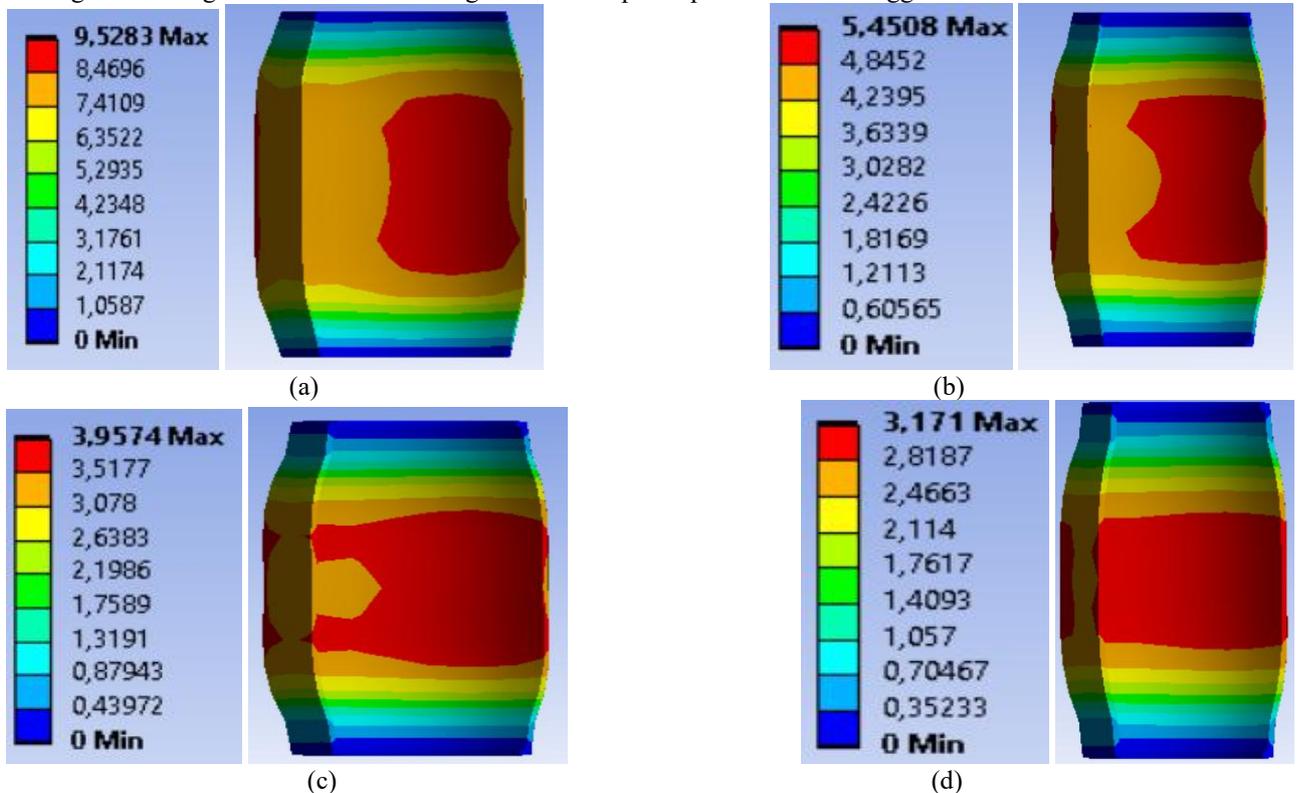
Gambar 2 Tegangan lingkaran untuk berbagai konfigurasi lapisan: (a) 5 Lapisan, (b) 10 Lapisan, (c) 15 Lapisan, (d) 20 Lapisan [+55/-55/+55/-55/+55/-55/+55/-55/+55/-55].

Gambar 3 menunjukkan histogram tegangan untuk keempat kasus. Peningkatan tegangan lingkaran (1097,6 MPa) diamati ketika jumlah lapisan dikurangi dari 10 menjadi 5. Dengan kata lain, terdapat penurunan tegangan sebesar 43,33% antara konfigurasi 5 lapisan dan 10 lapisan. Selain itu, penambahan 5 lapisan dengan sudut lilitan yang sama menurunkan tegangan dari 621,97 MPa menjadi 439,6 MPa, yang menghasilkan penurunan tegangan lingkaran. Penambahan 10 lapisan juga menghasilkan penurunan tegangan lingkaran sebesar 46,98%, yaitu dari 621,97 MPa menjadi 329,79 MPa.



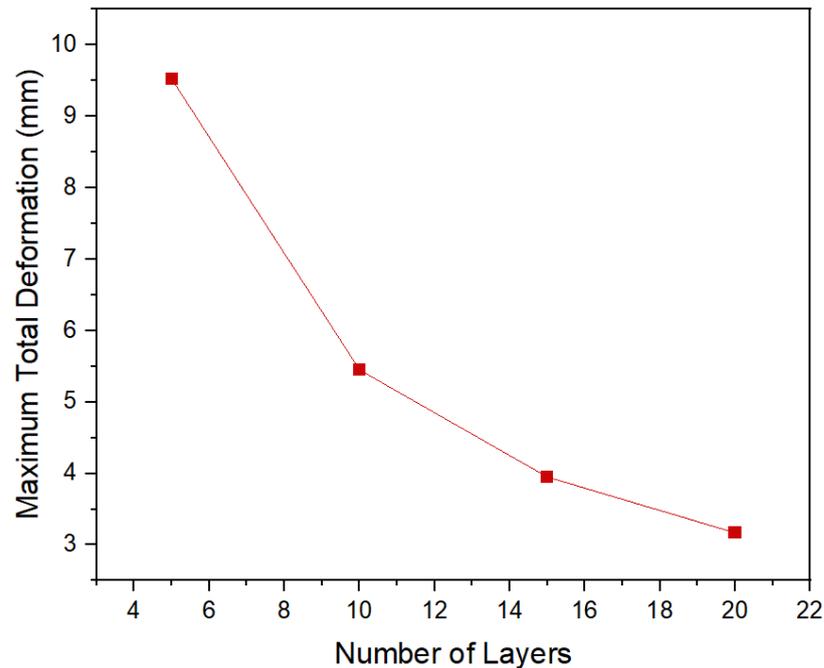
Gambar 3 Perbandingan Tegangan Hoop Berdasarkan Jumlah Lapisan

Gambar 4 menunjukkan bahwa deformasi maksimum turun dari 9,53 mm menjadi 3,17 mm. Tren ini menunjukkan bahwa penambahan lapisan berkontribusi pada distribusi beban yang lebih baik, pengurangan konsentrasi tegangan, dan peningkatan kekakuan. Oleh karena itu, mengoptimalkan jumlah lapisan komposit sangat penting untuk meningkatkan integritas struktural dan margin keamanan pada aplikasi tekanan tinggi.



Gambar 4 Deformasi total pada bejana tekan komposit dengan: (a) 5 Lapisan, (b) 10 Lapisan, (c) 15 Lapisan, (d) 20 Lapisan [55/-55/55/-55/55/-55/55/-55/55/-55]

Gambar 5 menunjukkan hasil simulasi deformasi total untuk bejana tekan berlapis komposit dengan jumlah lapisan yang bervariasi. Hasilnya menunjukkan bahwa deformasi berkurang seiring dengan peningkatan jumlah lapisan, yang berkisar dari 10 mm dengan lapisan lebih sedikit hingga 3 mm dengan lapisan lebih banyak. Tren ini menyoroti bahwa lapisan tambahan meningkatkan kekakuan struktural dan mengurangi deformasi di bawah tekanan internal dengan mendistribusikan tegangan secara lebih merata. Temuan ini menekankan pentingnya jumlah lapisan dalam meningkatkan kinerja struktural dan keselamatan bejana tekan.



Gambar 5 Perbandingan Deformasi Total Berdasarkan Jumlah Lapisan

4. Kesimpulan

Penelitian ini menganalisis respons struktural bejana tekan komposit Tipe IV di bawah tekanan internal menggunakan analisis elemen hingga (FEA), dengan fokus pada jumlah lapisan komposit. Efek jumlah lapisan dianalisis dalam hal tegangan hoop, tegangan aksial, dan perilaku deformasi. Validasi terhadap data referensi mengonfirmasi akurasi model simulasi.

Hasilnya menunjukkan bahwa peningkatan jumlah lapisan dari 5 hingga 20 secara efektif mengurangi tegangan hoop dan deformasi total, meningkatkan kekakuan dan integritas struktural. Di antara skema lapisan yang dievaluasi, konfigurasi dengan lebih banyak lapisan menunjukkan distribusi tegangan yang lebih baik dan tegangan yang lebih rendah. Analisis rasio tegangan menyoroti pentingnya mengoptimalkan jumlah lapisan untuk mencapai kinerja mekanik yang diinginkan.

Sebagai kesimpulan, mengoptimalkan jumlah lapisan laminasi sangat penting dalam meningkatkan kekuatan dan kinerja bejana tekan komposit, memberikan wawasan berharga untuk desain sistem penyimpanan bertekanan tinggi yang lebih aman dan efisien.

5. Daftar Pustaka

- [1] Kang, H., He, P., Zhang, C., Dai, Y., Lv, H., Zhang, M., ... & Yang, D. (2020). Stress-strain and burst failure analysis of fiber wound composite material high-pressure vessel. *Polymers and Polymer Composites*, 29(8), 1291-1303.
- [2] Nguyen, T. D. & Simmons, J. J. (2012). "Layer Configuration Effects on the Failure Mechanisms of Composite Pressure Vessels". *Journal of Composite Materials*, 46(4), 521-546.
- [3] Kangal, C., & Sharifzadeh, M. (2019). "Investigation of interlayer hybridization effect on burst pressure performance of composite overwrapped pressure vessels with load-sharing metallic liner." *Journal of Composite Materials*, 53(11),
- [4] Nebe, R., Fechner, M., & Schmitt, K. (2019). "Mechanical Performance of Composite Pressure Vessels: The Effect of Layer Count". *Composites Part B: Engineering*, 165, 461-470.
- [5] Beese, A. M., Cato, E. R., & Thorp, T. (2021). "Impact of Fiber Orientation on Internal Pressure Distribution in Composite Vessels". *Materials & Design*, 197, 109182.
- [6] Khan, S. and Kumar, A. (2024). Failure analysis in advance cylindrical composite pressure vessel under pressure & temperature for hydrogen storage: a comprehensive review. *Polymer Composites*, 46(4), 2933-2973.

-
- [7] Park, Y. H., Kim, H. J., & Lee, J. Y. (2021). "Axial Stress Sensitivity in Composite Pressure Vessels: A Layered Approach". *Journal of Composite Materials*, 55(4), 673-685.
 - [8] Okten, Y. and Kaynak, C. (2022). Mechanical performance of composite flat specimens and pressure vessels produced by carbon/epoxy towpreg dry winding. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 42(11-12), 558-576.
 - [9] Zhang, Q., Xu, H., Jia, X., Zu, L., Cheng, S., & Wang, H. (2020). Design of a 70 mpa type iv hydrogen storage vessel using accurate modeling techniques for dome thickness prediction. *Composite Structures*, 236, 111915.
 - [10] Wang, R., Jiao, W., Liu, W., & Yang, F. (2011). Dome thickness prediction of composite pressure vessels by a cubic spline function and finite element analysis. *Polymers and Polymer Composites*, 19(2-3), 227-234.