

## STUDI NUMERIK PENGARUH VARIASI LAYER KOMPOSIT TERHADAP PERILAKU DEFORMASI PADA TANGKI HIDROGEN TIPE IV

\*Rahmat Ginanto<sup>1</sup>, Ojo Kurdi<sup>2</sup>, Sulardjaka<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

<sup>2</sup>Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

\*E-mail: rahmat.ginanto@gmail.com

### Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh jumlah lapisan komposit terhadap performa mekanik tangki hidrogen tipe IV dengan menggunakan liner ABS dan komposit E-glass/epoxy melalui simulasi metode elemen hingga (FEM) di ANSYS. Variasi jumlah lapisan menunjukkan bahwa peningkatan lapisan secara umum mampu mengurangi deformasi dan meningkatkan kekakuan struktur. Namun, tidak semua peningkatan memberikan dampak signifikan, sehingga diperlukan pertimbangan efisiensi material. Konfigurasi dengan jumlah lapisan menengah terbukti memberikan keseimbangan terbaik antara kekuatan struktur dan efisiensi penggunaan material. Temuan ini memberikan dasar pertimbangan dalam perancangan tangki hidrogen yang ringan, kuat, dan aman untuk aplikasi kendaraan berbasis fuel cell.

**Kata Kunci:** deformasi; *finite element method* (fem); layer komposit; material komposit; tangki hidrogen tipe iv

### Abstract

*This study evaluates the influence of the number of composite layers on the mechanical performance of a Type IV hydrogen tank, utilizing an ABS liner and E-glass/epoxy composite through finite element method (FEM) simulation in ANSYS. The variation in layer count generally shows that increasing the number of layers reduces deformation and enhances structural stiffness. However, not all increases lead to significant improvements, highlighting the need to consider material efficiency. The mid-range layer configuration was found to offer the best balance between structural strength and material usage. These findings provide a valuable reference for designing lightweight, durable, and safe hydrogen tanks for fuel cell vehicle applications.*

**Keywords:** composite layers; composite material; deformation; finite element method (fem); type iv hydrogen tank

### 1. Pendahuluan

Penyimpanan hidrogen sangat penting untuk kemajuan teknologi hidrogen dan sel bahan bakar, terutama untuk aplikasi dalam transportasi, sumber daya stasioner, dan portabel [1]. Meskipun hidrogen memiliki energi per massa tertinggi dibandingkan bahan bakar lainnya, metode penyimpanan canggih diperlukan untuk mencapai densitas energi per satuan volume yang lebih tinggi. Penyimpanan hidrogen yang efisien sangat penting untuk keberhasilan komersialisasi aplikasi energi berbasis hidrogen, karena memungkinkan penyimpanan sejumlah besar energi bersih yang dapat digunakan saat permintaan puncak serta untuk penyeimbangan energi [2].

Karena rasio massanya yang ringan dan tinggi, tangki penyimpanan hidrogen Tipe IV adalah solusi yang bagus untuk penyimpanan hidrogen di kendaraan listrik berbahan bakar sel (FCEV). Lapisan polimer tangki ini dibungkus sepenuhnya dengan komposit serat karbon, yang memungkinkan penahanan tekanan tinggi sambil tetap ringan [3]. Untuk mengoptimalkan kinerja dan keselamatan tangki penyimpanan hidrogen Tipe IV, analisis ketebalan dinding komposit dan winding angle sangat penting. Perilaku mekanik dan integritas struktural tangki sangat dipengaruhi oleh *winding angle* dan ketebalan dinding komposit [4].

Kombinasi antara winding angle heliks positif dan negatif dapat meningkatkan tekanan ledak (burst pressure) sekaligus mengurangi berat tangki [5]. Urutan penyusunan lapisan juga memengaruhi kinerja tangki. Melakukan *winding* secara sirkumferensial terlebih dahulu, diikuti dengan winding spiral, terbukti menjadi urutan yang paling efektif [4].

Tangki hidrogen tipe IV memiliki rasio kekuatan-terhadap-beratnya yang tinggi, ketahanan terhadap korosi, dan kemampuan untuk menyimpan gas bertekanan tinggi seperti hidrogen, bejana tekan komposit Tipe IV masih menjadi subjek penelitian yang signifikan. Analisis elemen hingga (FEA) tetap menjadi alat penting untuk menyelidiki pola tegangan dan deformasi. Namun, masih ada masalah untuk memahami sepenuhnya mekanisme deformasi dan interaksi kompleks dari berbagai parameter desain. Banyak penelitian telah membahas perilaku tegangan dan deformasi. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui tentang distribusi tegangan, deformasi, dan tekanan ledak melalui variasi layer komposit dan winding angle. Hasilnya akan membantu kita mendesain bejana tekan Tipe IV yang lebih aman dan efisien.

## 2. Dasar Teori

Penyimpanan hidrogen merupakan aspek penting dalam pengembangan dan pemanfaatan hidrogen sebagai sumber bahan bakar alternatif. Teknologi penyimpanan hidrogen secara umum dapat diklasifikasikan ke dalam tiga kategori utama, yaitu metode fisik, metode kimia, dan metode hibrida [6].

Tangki hidrogen Tipe IV memiliki liner yang terbuat dari polimer (biasanya plastik seperti polyethylene dengan densitas tinggi (HDPE) atau polyamide (PA) yang dilapisi sepenuhnya dengan material komposit. Pada Tipe IV, material komposit menanggung seluruh beban struktural, sementara liner polimer berfungsi sebagai penghalang gas. Tipe IV memiliki banyak keuntungan, termasuk rasio massa penyimpanan hidrogen yang tinggi, ketahanan terhadap kelelahan material, dan biaya produksi yang lebih rendah. Tangki Tipe IV banyak digunakan dalam kendaraan hidrogen kontemporer untuk penyimpanan hidrogen yang ringan dan efisien karena keunggulan tersebut [7].

Material komposit, khususnya polimer yang diperkuat serat karbon (CFRP), telah menjadi material pilihan untuk aplikasi penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi karena sifat mekaniknya yang luar biasa dan karakteristik ringan. Serat karbon yang tertanam dalam matriks polimer, biasanya resin epoksi, memberikan kekuatan tarik yang sangat baik, rasio kekakuan-terhadap-berat yang tinggi, dan ketahanan fatigue yang sangat baik, yang merupakan faktor penting untuk memastikan kinerja dan keselamatan jangka panjang tangki penyimpanan hidrogen

Penggunaan material komposit serat karbon memberikan sejumlah keunggulan dibandingkan material konvensional seperti baja atau aluminium, antara lain bobot yang jauh lebih ringan, ketahanan mekanik yang tinggi, ketahanan korosi yang baik, serta kemampuan untuk mempertahankan integritas struktural di bawah tekanan tinggi [8].

FEA sangat berguna dalam mengoptimalkan pola pembalutan dan ketebalan lapisan untuk meminimalkan konsentrasi stress, yang sangat penting untuk meningkatkan integritas struktural tangki secara keseluruhan dan ketahanan terhadap tekanan ledak [9].

## 3. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan pendekatan simulasi numerik menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) untuk menyelidiki respons mekanik dari tangki hidrogen tipe IV berbahan komposit yang dikenai tekanan internal. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk memahami bagaimana variasi jumlah layer atau lapisan komposit memengaruhi perilaku deformasi struktur bejana tekan. Dengan memanfaatkan kemampuan FEM dalam memodelkan struktur kompleks dan perilaku material anisotropik, penelitian ini memungkinkan analisis yang lebih mendalam terhadap karakteristik struktural tangki dalam berbagai konfigurasi lapisan.

Proses simulasi dilakukan secara sistematis dan terstruktur, dimulai dari pembuatan model geometri, pendefinisian properti material, pengaturan konfigurasi layer, hingga penerapan kondisi batas dan pembebanan. Setiap langkah disusun secara cermat untuk menjaga konsistensi dan akurasi hasil yang diperoleh. Validasi internal dilakukan melalui evaluasi kualitas mesh, serta peninjauan terhadap distribusi tegangan dan deformasi yang dihasilkan. Dengan pendekatan ini, hasil simulasi diharapkan mampu merepresentasikan kondisi nyata secara realistis dan dapat dijadikan dasar yang kuat dalam pengambilan keputusan desain struktural tangki hidrogen berbahan komposit. Penelitian ini juga memberikan kontribusi terhadap pengembangan desain yang lebih efisien dan aman melalui pemanfaatan teknologi simulasi berbasis FEM.

### 3.1 Material dan Geometri

Simulasi dilakukan menggunakan ANSYS ACP untuk menganalisis perilaku mekanik tangki hidrogen tipe IV yang terdiri dari dua bagian utama, yaitu liner berbahan ABS dan lapisan komposit E-glass/epoxy. Material ABS digunakan sebagai lapisan terdalam (liner) dan dimodelkan sebagai material isotropik, yang merepresentasikan respons elastis terhadap tekanan internal dari gas hidrogen yang disimpan.

Sementara itu, lapisan komposit E-glass/epoxy dimodelkan sebagai material ortotropik dalam ANSYS ACP. Model ini memperhitungkan perbedaan sifat mekanik berdasarkan arah orientasi serat, sehingga mampu menggambarkan karakteristik anisotropik dari komposit berorientasi serat unidirectional. Lapisan-lapisan komposit disusun dalam urutan tertentu (stacking sequence) sesuai variasi desain yang diteliti.

Geometri tangki dimodelkan berbentuk silinder dengan ujung hemisferik, merepresentasikan bentuk khas bejana tekan tipe IV. Model terdiri atas bagian tengah berupa silinder memanjang dan dua ujung setengah bola yang berfungsi mendistribusikan tekanan secara merata. Setelah geometri selesai dibuat, model kemudian diimpor ke ANSYS ACP untuk proses definisi lapisan komposit, termasuk jumlah layer dan sudut orientasi serat untuk masing-masing variasi kasus.

Setelah konfigurasi lapisan selesai ditentukan, bejana tekan dikenai pembebanan berupa tekanan internal yang diaplikasikan pada permukaan bagian dalam tangki. Simulasi selanjutnya dilakukan pada modul *Static Structural* untuk mengevaluasi respons struktural tangki terhadap tekanan tersebut, termasuk deformasi total, tegangan utama maksimum, serta kriteria kegagalan berdasarkan pendekatan yang relevan dengan sifat material komposit.

### 3.2 Simulation Setup

Simulasi elemen hingga dilakukan menggunakan ANSYS Workbench, dengan konfigurasi lapisan komposit yang didefinisikan melalui modul ANSYS Composite PrepPost (ACP). Simulasi dilakukan untuk mempelajari pengaruh konfigurasi sudut winding dan jumlah lapisan terhadap respons struktural tangki tipe IV, dengan kombinasi material liner

plastik ABS dan material komposit E-glass fiber/epoxy. Simulasi dilakukan untuk mengetahui pengaruh jumlah variasi layer.

#### 4. Hasil dan Pembahasan

Pengaruh jumlah lapisan terhadap deformasi telah dibahas dalam bagian ini. Jumlah lapisan, bersama dengan orientasi serat, merupakan faktor desain penting yang memengaruhi kekakuan struktur tangki. Penambahan jumlah lapisan komposit umumnya meningkatkan kekakuan tangki, sehingga mampu menahan tekanan internal dengan deformasi yang lebih rendah. Deformasi total yang terjadi pada tangki menunjukkan bahwa variasi jumlah lapisan berdampak langsung terhadap seberapa besar tangki mengalami perubahan bentuk akibat beban tekanan internal.

Dalam penelitian ini, deformasi tangki hidrogen tipe IV akibat tekanan internal dianalisis untuk tiga variasi jumlah lapisan komposit. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan jumlah lapisan memberikan pengaruh terhadap penurunan deformasi, namun efeknya cenderung stagnan setelah jumlah lapisan mencapai tingkat tertentu. Secara khusus, perubahan deformasi antara konfigurasi menengah dan konfigurasi tertinggi sangat kecil, sehingga penambahan lapisan lebih lanjut hanya memberikan peningkatan kekakuan yang bersifat marginal. Temuan ini mengindikasikan bahwa terdapat batas optimal jumlah lapisan, di mana efisiensi struktural dan material dapat dicapai secara seimbang.

Berdasarkan hasil analisis, konfigurasi jumlah lapisan komposit sangat memengaruhi efisiensi material dan performa mekanik tangki hidrogen tipe IV. Di antara variasi yang diuji, jumlah lapisan menengah menunjukkan kemampuan untuk mempertahankan deformasi pada tingkat minimum yang sama seperti konfigurasi lapisan terendah, namun dengan tingkat kekakuan struktur yang lebih baik. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan jumlah lapisan hingga tingkat tertentu dapat memperkuat struktur tanpa harus menambah beban yang signifikan.

Konfigurasi ini juga menghindari penggunaan material berlebih seperti pada jumlah lapisan tertinggi, yang tidak memberikan peningkatan performa yang sepadan. Dengan demikian, jumlah lapisan menengah dinilai sebagai pilihan paling seimbang karena mampu menghadirkan kombinasi optimal antara kekuatan struktural, deformasi rendah, dan efisiensi material. Konfigurasi ini menjadi alternatif yang paling efektif untuk diterapkan pada desain tangki hidrogen tipe IV.

#### 5. Kesimpulan

Penelitian ini mengevaluasi pengaruh jumlah lapisan komposit terhadap tingkat deformasi pada tangki hidrogen tipe IV melalui pendekatan simulasi elemen hingga. Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan jumlah lapisan umumnya dapat mengurangi deformasi struktur. Meskipun penambahan lapisan menunjukkan kecenderungan penurunan deformasi, tidak semua peningkatan jumlah lapisan memberikan dampak yang signifikan terhadap kinerja mekanik. Pada titik tertentu, penambahan lapisan justru memberikan keuntungan yang relatif kecil dibandingkan dengan peningkatan kebutuhan material. Berdasarkan hal tersebut, jumlah lapisan menengah dinilai paling optimal karena mampu memberikan keseimbangan antara kekuatan struktur dan efisiensi penggunaan material.

#### 6. Daftar Pustaka

- [1] Ali, Imran, et al. "Recent Advances in Hydrogen Storage Methods." *ACS Symposium Series*, 21 Aug. 2024, pp. 135–179, <https://doi.org/10.1021/bk-2024-1474.ch007>. Accessed 22 Apr. 2025.
- [2] Stetson, N.T., et al. "Introduction to Hydrogen Storage." *Compendium of Hydrogen Energy*, 2016, pp. 3–25, <https://doi.org/10.1016/b978-1-78242-362-1.00001-8>
- [3] Jin, Zeping, et al. "Review of Decompression Damage of the Polymer Liner of the Type IV Hydrogen Storage Tank." *Polymers*, vol. 15, no. 10, 10 May 2023, pp. 2258–2258, <https://doi.org/10.3390/polym15102258>.
- [4] Zhang, Qian, et al. "Influence of Composite Material Laying Parameters on the Load-Carrying Capacity of Type IV Hydrogen Storage Vessel." *Science and Engineering of Composite Materials*, vol. 31, no. 1, 1 Jan. 2024, <https://doi.org/10.1515/secm-2024-0046>. Accessed 22 Apr. 2025.
- [5] Reda, Reham, et al. "Finite Element Modeling of Different Types of Hydrogen Pressure Vessels under Extreme Conditions for Space Applications." *Processes*, vol. 13, no. 5, 7 May 2025, p. 1429, <https://doi.org/10.3390/pr13051429>. Accessed 9 July 2025.
- [6] Madhavi Konni, et al. "On-Board and Off-Board Technologies for Hydrogen Storage." *Advances in Computer and Electrical Engineering Book Series*, 1 Jan. 2021, pp. 139–165, <https://doi.org/10.4018/978-1-7998-4945-2.ch006>. Accessed 19 Apr. 2025.
- [7] Zhao, Xin, et al. "Preparation of Carbon Fibre-Reinforced Composite Panels from Epoxy Resin Matrix of Nano Lignin Polyol Particles." *Journal of Cleaner Production*, vol. 428, 23 Oct. 2023, pp. 139170–139170, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.139170>. Accessed 29 Sept. 2024.
- [8] Hashim, U R, et al. "Fabrication and Characterisation of Carbon Fibre Reinforced Polymer Rods with Aluminium Foam Core." *Materials Research Innovations*, vol. 18, no. sup6, 5 Dec. 2014, pp. S6-208, <https://doi.org/10.1179/1432891714z.000000000957>. Accessed 22 Apr. 2025.
- [9] Li, Li, et al. "Studies on Modification of Polyamide 6 Plastics for Hydrogen Storage." *Polymers*, vol. 17, no. 4, 18 Feb. 2025, pp. 523–523, <https://doi.org/10.3390/polym17040523>. Accessed 19 Apr. 2025.

- 
- [10] Saharudin, Mohd Shahneel, et al. "Numerical Analysis and Life Cycle Assessment of Type v Hydrogen Pressure Vessels." *Journal of Composites Science*, vol. 9, no. 2, Feb. 2025, p. 75, [www.mdpi.com/2504-477X/9/2/75?form=MG0AV3](http://www.mdpi.com/2504-477X/9/2/75?form=MG0AV3), <https://doi.org/10.3390/jcs9020075>. Accessed 27 Apr. 2025.