

ANALISIS KEKUATAN STRUKTUR TANGKI HYDROGEN TIPE 2 DENGAN TEKANAN KERJA 20MPa MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

*Zidane Ilham Ramadhan Achmad Sanusi¹, Sulisty², Mohammad Tauviqirrahman²

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: zidanilham3636@gmail.com

Abstrak

Analisis kekuatan struktur pada tangki hydrogen tipe 2 dengan tekanan kerja 20 MPa dilakukan dalam penelitian ini menggunakan metode elemen hingga (Finite Element Method, FEM). Tangki tipe 2 ini memiliki liner berbahan baja karbon AISI 1045 dan selimut komposit dari serat karbon yang direkatkan dengan resin epoxy, yang berperan dalam menahan tekanan tinggi gas hydrogen. Pemodelan numerik dilakukan untuk mengevaluasi distribusi tegangan, deformasi, dan potensi titik kegagalan pada tangki akibat tekanan internal. Hasil simulasi FEM menunjukkan bahwa kombinasi material AISI 1045 dan carbon fiber epoxy memberikan kekuatan struktural yang memadai untuk tekanan kerja yang ditetapkan, dengan distribusi tegangan yang relatif merata dan deformasi yang masih dalam batas aman. Penelitian ini menegaskan kemampuan metode elemen hingga dalam mengkaji keamanan dan performa tangki hydrogen tipe 2 dengan pengaruh material komposit modern sebagai penguat.

Kata kunci: aisi 1045; faktor keamanan; fem, hidrogen; tangki tipe ii; tegangan von-mises

Abstract

The structural strength analysis of type 2 hydrogen tanks with a working pressure of 20 MPa is conducted in this study using the Finite Element Method (FEM). The type 2 tank features a liner made of AISI 1045 carbon steel and a composite sleeve made of carbon fiber bonded with epoxy resin, which functions to withstand the high pressure of hydrogen gas. Numerical modeling is performed to evaluate the stress distribution, deformation, and potential failure points of the tank under internal pressure. The FEM simulation results show that the combination of AISI 1045 and carbon fiber epoxy provides adequate structural strength for the specified working pressure, with relatively uniform stress distribution and deformation within safe limits. This study confirms the capability of the Finite Element Method in assessing the safety and performance of type 2 hydrogen tanks reinforced with modern composite materials.

Keywords: aisi 1045; fem; hydrogen; safety factor; type ii tank; von-mises stress

1. Pendahuluan

Dalam menghadapi tantangan perubahan iklim global dan meningkatnya kebutuhan energi bersih, hidrogen muncul sebagai salah satu solusi paling menjanjikan untuk mendukung transisi menuju sistem energi berkelanjutan. Sebagai vektor energi yang bersifat karbon netral, hidrogen memiliki keunggulan utama berupa emisi nol saat digunakan, serta fleksibilitas tinggi dalam berbagai sektor seperti transportasi, industri, pembangkitan listrik, dan sistem penyimpanan energi terbarukan [1][2][3]. Sifat hidrogen yang ringan, memiliki energi tinggi per satuan massa, dan kemampuannya untuk diproduksi dari sumber daya terbarukan menjadikannya kandidat utama dalam pengembangan sistem energi masa depan [4], [5].

Hidrogen dapat dihasilkan melalui berbagai metode, seperti elektrolisis air menggunakan energi terbarukan (green hydrogen), reformasi metana dengan penangkapan karbon (blue hydrogen), maupun metode pirolisis metana yang menghasilkan karbon padat sebagai produk samping tanpa emisi CO₂ [5]. Kendati demikian, produksi hidrogen yang ramah lingkungan perlu disertai dengan sistem penyimpanan dan distribusi yang aman, efisien, dan ekonomis agar dapat digunakan secara luas. Salah satu tantangan terbesar dalam penggunaan hidrogen sebagai sumber energi adalah bagaimana menyimpan dan mengangkut gas ini dengan aman, mengingat densitas energi volumetriknya yang rendah dalam kondisi atmosferik serta sifatnya yang mudah merembes dan reaktif terhadap material tertentu [6], [7].

Dalam konteks ini, pengembangan teknologi tangki penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi menjadi sangat krusial. Beberapa teknologi tangki telah dikembangkan dan diklasifikasikan berdasarkan material dan

struktur pembuatnya, mulai dari tangki Tipe I (seluruhnya dari logam) hingga Tipe IV (liner polimer dengan pelapis komposit penuh) [8], [9]. Di antara berbagai jenis tersebut, tangki hidrogen Tipe II menempati posisi penting sebagai solusi antara yang menggabungkan kekuatan mekanik logam dengan penguatan parsial menggunakan material komposit. Tangki tipe II terdiri dari liner logam (biasanya aluminium atau baja) yang dibungkus secara parsial—khususnya pada bagian hoop—dengan serat komposit seperti karbon atau kaca yang dilapisi resin, guna meningkatkan ketahanan terhadap tekanan internal dan mengurangi massa total struktur.

Dibandingkan tangki Tipe I, tangki Tipe II menawarkan rasio kekuatan terhadap berat yang lebih baik, dengan pengurangan bobot yang signifikan berkat penguatan kompositnya. Hal ini penting khususnya untuk aplikasi kendaraan seperti mobil berbahan bakar sel hidrogen, di mana efisiensi berat sangat menentukan performa dan jangkauan kendaraan [10]. Di sisi lain, bila dibandingkan dengan tangki Tipe III dan IV yang lebih ringan, Tipe II masih memiliki keunggulan dalam hal biaya produksi dan kompatibilitas material terhadap hidrogen, terutama karena liner logamnya cenderung lebih tahan terhadap difusi dan permeasi hidrogen yang berisiko menyebabkan embrittlement atau kebocoran [8].

Selain itu, tangki Tipe II juga dinilai lebih mudah diproduksi secara massal karena tidak memerlukan teknologi pembentukan liner polimer seperti pada Tipe IV, dan tetap dapat mencapai tekanan kerja tinggi di atas 200 bar, tergantung spesifikasi desainnya. Keandalan struktural tangki Tipe II dalam menyimpan gas hidrogen bertekanan juga telah diuji melalui simulasi numerik dan pengujian eksperimental yang menunjukkan bahwa penguatan komposit secara selektif dapat secara signifikan meningkatkan kapasitas tekan, mengurangi risiko delaminasi, serta meminimalkan tegangan berlebih pada daerah kritis seperti dome dan neck tangki [8].

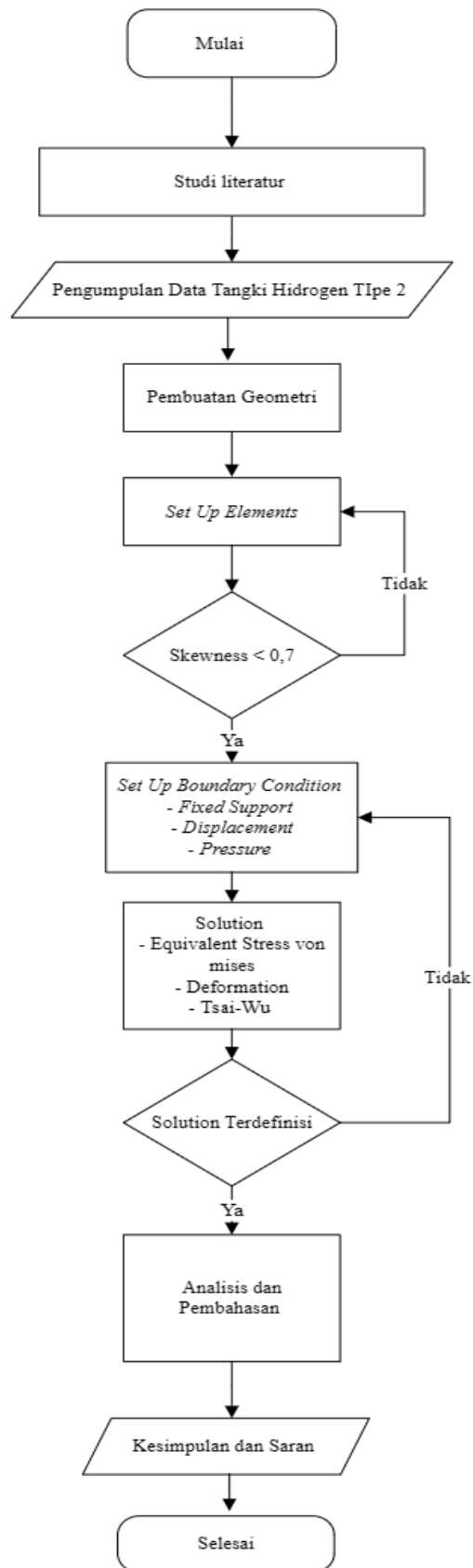
Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan struktur dari tabung penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi yang menggunakan material utama stainless steel 316L (SS316L) sebagai liner. Tabung ini dirancang untuk beroperasi pada tekanan kerja sebesar 20 MPa, dengan ketebalan dinding liner logam sebesar 10 mm. Untuk meningkatkan ketahanan terhadap tekanan internal, khususnya pada arah melingkar (hoop), tabung ini diperkuat dengan lapisan komposit setebal 5 mm yang dililitkan secara selektif di bagian hoop. Pendekatan ini menggabungkan keunggulan mekanik dari material logam SS316L yang memiliki ketahanan terhadap korosi dan kekuatan tarik yang tinggi, dengan efisiensi struktural dari material komposit yang mampu meningkatkan rasio kekuatan terhadap berat. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi apakah konfigurasi ketebalan dan material tersebut mampu menahan tekanan internal tanpa mengalami kegagalan struktural, serta untuk menilai distribusi tegangan dan deformasi pada struktur gabungan tersebut. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap perancangan tangki hidrogen yang aman, efisien, dan layak secara teknis untuk aplikasi penyimpanan energi berkelanjutan.

2. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian ini diawali dengan studi literatur mendalam mengenai tabung hidrogen tipe II, khususnya yang menggunakan kombinasi liner logam dan penguat komposit pada bagian hoop. Kajian ini difokuskan pada aspek desain geometri serta karakteristik mekanik dari material stainless steel 316L yang digunakan sebagai bahan dasar liner. Setelah informasi material dan spesifikasi geometri diperoleh, dilakukan pemodelan tiga dimensi tabung menggunakan perangkat lunak berbasis metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM).

Langkah berikutnya adalah pemberian beban berupa tekanan internal sebesar 20 MPa untuk mensimulasikan kondisi operasi riil. Proses pembentukan mesh dilakukan dengan mempertimbangkan kualitas elemen, di antaranya menjaga nilai *skewness* tetap berada di bawah ambang batas 0,8 untuk menjamin validitas hasil simulasi. Setelah model tervalidasi secara numerik, pembebanan dan kondisi batas diterapkan, meliputi tekanan internal sebagai gaya utama dan dukungan tetap (*fixed support*) pada bagian tertentu dari struktur tabung.

Simulasi dijalankan untuk memperoleh data tegangan ekuivalen von Mises dan menghitung faktor keamanan struktur terhadap tekanan kerja yang diberikan. Selain itu, analisis juga difokuskan pada efektivitas lapisan komposit setebal 5 mm yang dililitkan pada daerah hoop dalam membantu memperkuat kemampuan tabung dalam menahan tekanan internal. Seluruh tahapan proses metodologi penelitian digambarkan secara sistematis dalam Diagram Alir pada Gambar 1.



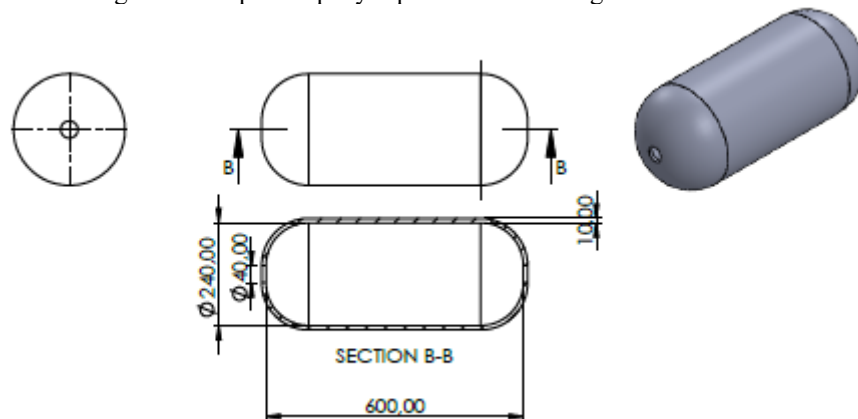
Gambar 1. Diagram Alir Tahapan Penelitian

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah SS316L, yaitu baja tahan karat yang umum digunakan untuk aplikasi tekanan tinggi karena memiliki ketahanan terhadap korosi dan karakteristik mekanik yang stabil. Parameter penting seperti modulus elastisitas, rasio Poisson, tegangan luluh, dan kekuatan tarik maksimum disusun dalam Tabel 1. Data ini diperoleh dari sumber referensi yang telah diakui keabsahannya dan digunakan sebagai input utama dalam simulasi untuk memprediksi perilaku mekanik tabung selama proses pembebanan.

Tabel 1. Mechanical Properties SS316L [11]

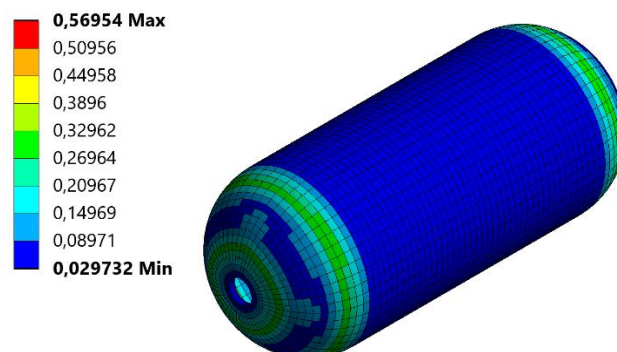
<i>Mechanical Properties</i>	<i>Nilai</i>
<i>Density</i>	
<i>Modulus Young</i>	193.000 MPa
<i>Poison's Rasio</i>	0,33
<i>Yield strength</i>	270 MPa
<i>Ultimate Tensile Strength</i>	520 Mpa

Gambar 2 menunjukkan geometri tangki tipe 2 yang berbentuk silinder dengan kedua ujungnya melengkung, sesuai dengan standar desain tangki tekanan. Tangki memiliki diameter luar 400 mm dan panjang total 600 mm, dengan ketebalan selimut tabung sebesar 5 mm yang terdiri dari bahan komposit. Selimut tabung berbahan komposit ini berfungsi untuk memberikan kekuatan struktural tambahan sekaligus ketahanan terhadap korosi dan tekanan internal. Pada gambar bagian penampang (section B-B), terlihat jelas lapisan selimut tabung dengan ketebalan 5 mm yang membungkus silinder utama tangki. Bagian kepala tangki berbentuk ellips dengan radius 100 mm pada kedua ujungnya, yang dirancang untuk menahan tekanan dengan efisien. Desain ini mengoptimalkan kekuatan dan keawetan tangki dalam aplikasi penyimpanan cairan atau gas bertekanan.

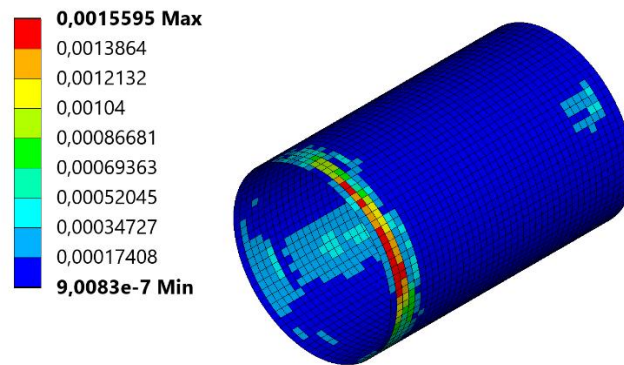


Gambar 2. Geometri Tabung Hidrogen Tipe 2

Pada analisis struktur tangki tipe 2 ini, mesh yang digunakan pada bagian liner memiliki nilai skewness sebesar 0,56954, yang menunjukkan distribusi elemen mesh dengan tingkat kemiringan tertentu untuk memastikan akurasi dan kestabilan perhitungan. Sementara itu, pada laminate yang membungkus selimut tabung, nilai skewness mesh lebih kecil yaitu 0,0015595, mencerminkan kualitas mesh yang sangat baik dengan elemen yang lebih seragam dan presisi tinggi. Perbedaan nilai skewness ini penting untuk mengoptimalkan performa simulasi elemen hingga pada komposit dan liner, guna memperoleh hasil tegangan dan deformasi yang akurat.

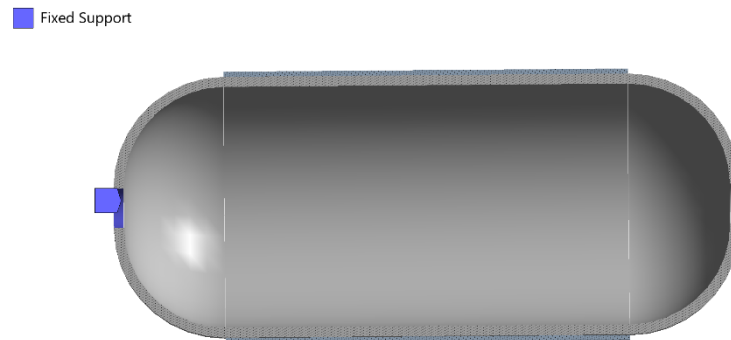


Gambar 3. Skewness Liner



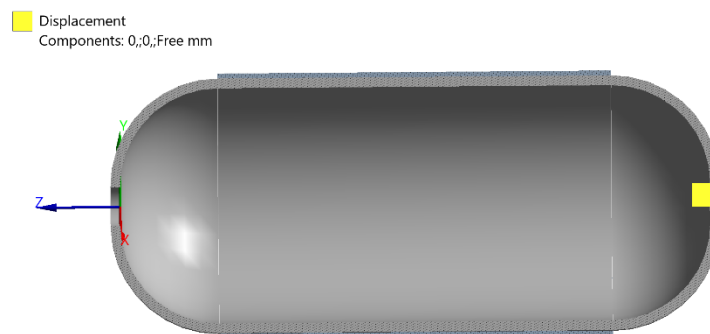
Gambar 4. Skewness Laminate

Pada ujung tangki diberikan kondisi fixed support, yang berarti ujung-ujung tangki tersebut dipasang atau dikunci secara kaku sehingga tidak dapat bergerak atau berputar. Penempatan fixed support ini berfungsi untuk mensimulasikan kondisi penahan tangki yang sebenarnya di lapangan, memberikan kestabilan struktural dengan mencegah pergerakan pada area tersebut selama tangki menerima beban atau tekanan internal.



Gambar 5. Fixed Support

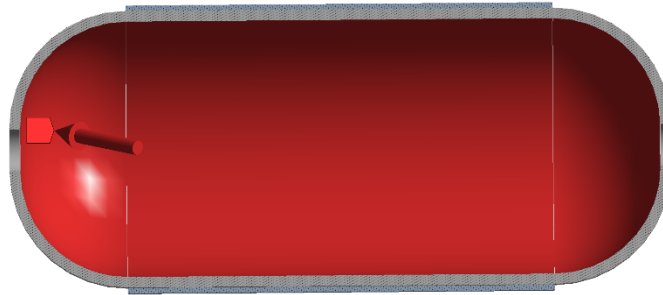
Pada analisis perpindahan, tangki diberikan kondisi displacement axially free, yang artinya sepanjang sumbu aksial tangki diperbolehkan bergerak bebas tanpa pembatasan perpindahan. Kondisi ini memungkinkan tangki mengalami peregangan atau kontraksi akibat tekanan internal tanpa terhambat, sehingga simulasi dapat merefleksikan perilaku dinamis tangki saat beroperasi sebenarnya.



Gambar 6. Displacement

Tangki didesain dan dianalisis dengan tekanan internal sebesar 20 MPa, sebuah tekanan yang cukup tinggi, untuk memastikan bahwa struktur tangki mampu menahan beban tekanan tersebut tanpa mengalami kegagalan. Tekanan ini diaplikasikan secara merata ke permukaan dalam tangki, memberikan gambaran nyata tentang kondisi operasi maksimum yang harus ditanggung oleh tangki selama masa penggunaannya.

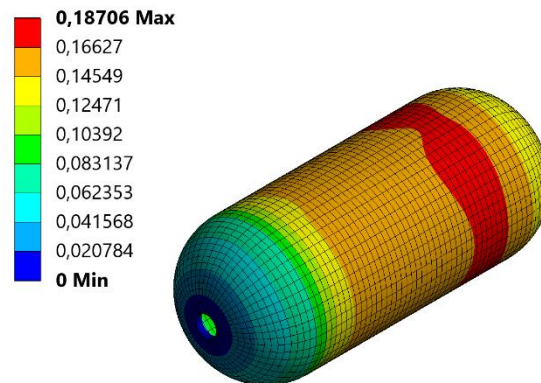
Pressure: 20, MPa



Gambar 7. Pressure

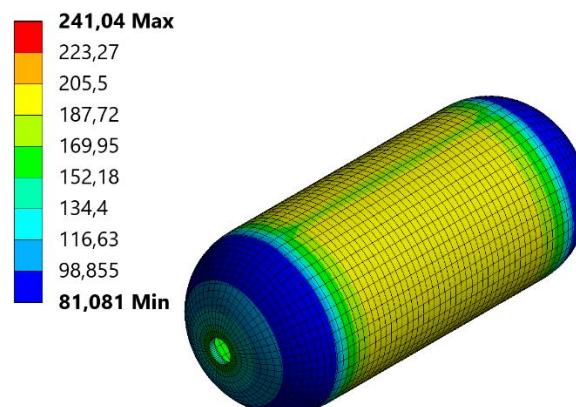
3. Hasil dan Pembahasan

Hasil analisis menunjukkan deformasi maksimum yang terjadi pada tangki tipe 2 sebesar 0,18706 mm. Nilai deformasi ini relatif kecil, menunjukkan bahwa struktur tangki tetap stabil dan mampu menahan beban yang diberikan tanpa mengalami perubahan bentuk yang signifikan. Deformasi yang minimal ini mengindikasikan kekakuan yang baik pada material dan desain geometri tangki yang efektif dalam menjaga integritas struktural selama operasi.



Gambar 8. Deformation

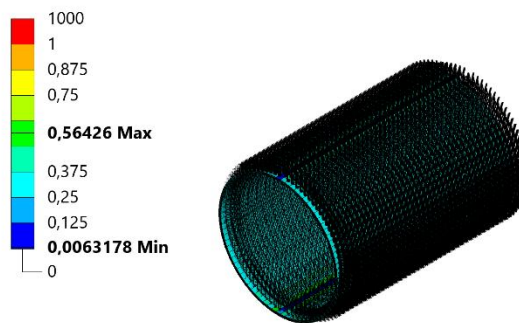
Nilai tegangan ekuivalen Von Mises yang terukur pada tangki mencapai 241,04 MPa. Berdasarkan standard keamanan material yang umum digunakan pada tangki komposit, nilai tegangan ini termasuk dalam kategori aman sehingga tidak terjadi kegagalan atau kerusakan akibat beban tekanan. Tegangan Von Mises ini menunjukkan distribusi tegangan yang merata dan menandakan tangki mampu menahan tekanan internal sebesar 20 MPa dengan margin keamanan yang memadai.



Gambar 9. Equivalent Stress von misses

Nilai tegangan ekuivalen Von Mises yang terukur pada tangki mencapai 241,04 MPa. Berdasarkan standard keamanan material yang umum digunakan pada tangki komposit, nilai tegangan ini termasuk dalam kategori aman sehingga tidak terjadi kegagalan atau kerusakan akibat beban tekanan. Tegangan Von Mises ini menunjukkan

distribusi tegangan yang merata dan menandakan tangki mampu menahan tekanan internal sebesar 20 MPa dengan margin keamanan yang memadai.



Gambar 10. Tsai-Wu

Analisis Tsai-Wu pada material komposit menyatakan nilai sebesar 0,56426, yang berarti tangki masih berada dalam batas aman relatif terhadap potensi kegagalan pada komposit multilayer. Nilai ini mencerminkan bahwa kombinasi tegangan pada laminate komposit belum mencapai tingkat kritis yang menyebabkan delaminasi atau kerusakan, sehingga struktur komposit tetap mampu mempertahankan performa mekaniknya secara optimal di bawah kondisi operasi saat ini.

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis struktur pada tangki hidrogen Tipe II yang menggunakan liner berbahan SS316L dan dilapisi dengan material komposit karbon setebal 5 mm di area hoop, diperoleh sejumlah temuan penting yang menunjukkan kelayakan dan keandalan desain tangki untuk aplikasi penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi.

1. Desain Geometri Tangki

Desain tangki yang mengadopsi bentuk silinder dengan ujung ellipsoidal terbukti memberikan performa struktural yang optimal. Bentuk ini secara signifikan membantu dalam menyebarkan tekanan internal secara merata ke seluruh permukaan tangki, sehingga meminimalkan konsentrasi tegangan pada titik-titik kritis. Penyebaran tekanan yang merata tersebut mendukung pencapaian kekuatan struktural maksimum dengan meminimalisir risiko kegagalan akibat deformasi lokal.

2. Validitas Pemodelan Numerik

Pemodelan numerik yang dilakukan berbasis Finite Element Method (FEM) menunjukkan hasil yang sangat memadai dan dapat dipercaya. Kualitas mesh yang digunakan dinilai sangat baik, dibuktikan dengan nilai skewness di bawah 0,8, bahkan pada area laminate (komposit), nilai skewness yang sangat rendah, yaitu 0,00156, menunjukkan bahwa elemen-elemen finite yang digunakan memiliki geometri yang sangat optimal dan tidak menyebabkan distorsi numerik. Hal ini berkontribusi langsung pada keakuratan hasil simulasi.

3. Analisis Tegangan von Mises

Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai tegangan ekuivalen maksimum berdasarkan kriteria von Mises adalah sebesar 241,04 MPa, yang masih berada di bawah batas yield strength material SS316L sebesar 270 MPa. Hal ini menunjukkan bahwa liner baja tidak mengalami deformasi plastis maupun kegagalan struktural saat tangki diberi tekanan internal sebesar 20 MPa, sehingga sistem masih berada dalam rentang elastis dan aman untuk digunakan.

4. Deformasi Maksimum

Nilai deformasi maksimum yang tercatat pada struktur adalah sebesar 0,18706 mm, yang tergolong sangat kecil dibandingkan dimensi total tangki. Hal ini menunjukkan bahwa tangki memiliki kekakuan struktural tinggi, serta mampu mempertahankan bentuk dan kestabilan geometrinya selama proses pembebanan. Deformasi minimal ini menjadi indikator bahwa sistem tangki mampu menahan tekanan kerja tanpa mengalami perubahan dimensi yang membahayakan.

5. Kriteria Kegagalan Komposit – Tsai-Wu

Analisis terhadap lapisan komposit berdasarkan kriteria Tsai-Wu menunjukkan nilai sebesar 0,56426, yang masih jauh dari nilai batas kegagalan (nilai 1). Artinya, material komposit masih bekerja dalam kondisi aman, dan belum mengalami degradasi kekuatan akibat tekanan internal. Kriteria Tsai-Wu sendiri merupakan metode failure prediction yang komprehensif dalam mengevaluasi kondisi multi-aksial pada material anisotropik seperti komposit serat karbon.

6. Peran Penguatan Komposit pada Area Hoop

Penambahan lapisan komposit pada area hoop terbukti memberikan kontribusi signifikan dalam

meningkatkan kekuatan struktural tangki terhadap tekanan internal. Area hoop merupakan zona kritis karena tekanan meradial tertinggi terjadi di bagian ini. Oleh karena itu, penguatan melalui material komposit berfungsi untuk meningkatkan kemampuan tangki dalam menahan gaya-gaya internal dan mencegah kerusakan akibat ekspansi radial berlebihan. Hal ini tidak hanya meningkatkan keamanan, tetapi juga memperpanjang umur layanan tangki secara keseluruhan.

Dari keseluruhan hasil simulasi dan analisis, dapat disimpulkan bahwa konfigurasi tangki Tipe II dengan liner SS316L dan penguatan komposit serat karbon di area hoop memenuhi syarat kelayakan teknis untuk aplikasi penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi hingga 20 MPa. Struktur tangki terbukti memiliki distribusi tegangan yang aman, deformasi yang minimal, serta daya tahan terhadap kegagalan pada lapisan komposit. Dengan demikian, desain ini dapat diandalkan untuk digunakan pada sistem penyimpanan hidrogen di sektor transportasi, industri, maupun energi, yang memerlukan tangki ringan, kuat, dan tahan tekanan tinggi.

5. Daftar Pustaka

- [1] H. Ameli, G. Strbac, D. Pudjianto, and M. T. Ameli, "A review of the role of hydrogen in the heat decarbonization of future energy systems: Insights and perspectives," *Energies*, vol. 17, no. 7, p. 1688, Apr. 2024, doi: [10.3390/en17071688](https://doi.org/10.3390/en17071688).
- [2] P. Kut, K. Pietrucha-Urbanik, and M. Zelenáková, "Assessing the role of hydrogen in sustainable energy futures: A comprehensive bibliometric analysis of research and international collaborations in energy and environmental engineering," *Energies*, vol. 17, no. 8, p. 1862, Apr. 2024, doi: [10.3390/en17081862](https://doi.org/10.3390/en17081862).
- [3] P. Cheekatamarla, "Hydrogen and the global energy transition—Path to sustainability and adoption across all economic sectors," *Energies*, vol. 17, no. 4, p. 807, Feb. 2024, doi: [10.3390/en17040807](https://doi.org/10.3390/en17040807).
- [4] E. Raouf, "Green hydrogen production and public health expenditure in hydrogen-exporting countries," *Int. J. Energy Econ. Policy*, vol. 13, no. 6, pp. 36–44, 2023, doi: [10.32479/ijeeep.14484](https://doi.org/10.32479/ijeeep.14484).
- [5] N. Sánchez-Bastardo, R. Schlögl, and H. Ruland, "Methane pyrolysis for zero-emission hydrogen production: A potential bridge technology from fossil fuels to a renewable and sustainable hydrogen economy," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 60, no. 33, pp. 11855–11881, Aug. 2021, doi: [10.1021/acs.iecr.1c01679](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.1c01679).
- [6] A. L. Sutton, J. I. Mardel, and M. R. Hill, "Metal–organic frameworks (MOFs) as hydrogen storage materials at near-ambient temperature," *Chem. Eur. J.*, vol. 30, no. e202400717, Aug. 2024, doi: [10.1002/chem.202400717](https://doi.org/10.1002/chem.202400717).
- [7] S. Molina, R. Novella, J. Gomez-Soriano, and M. Olcina-Girona, "Experimental activities on a hydrogen-fueled spark-ignition engine for light-duty applications," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 21, p. 12055, Nov. 2023, doi: [10.3390/app132112055](https://doi.org/10.3390/app132112055).
- [8] J. P. B. Ramirez, D. Halm, J.-C. Grandidier, S. Villalonga, and F. Nony, "700 bar type IV high pressure hydrogen storage vessel burst – Simulation and experimental validation," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 41, pp. 13183–13192, Jul. 2015, doi: [10.1016/j.ijhydene.2015.05.126](https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.05.126).
- [9] K. Yuan and Z. Liu, "A structural mechanics analysis on a type IV hydrogen storage tank during refueling and discharging," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 165, p. 108822, Aug. 2024, doi: [10.1016/j.engfailanal.2024.108822](https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2024.108822).
- [10] J. Wan, J. Kang, Z. Liu, H. Yan, and Y. Li, "Research on scenario construction and economic analysis for electric-hydrogen coupling," *J. Phys.: Conf. Ser.*, vol. 2728, no. 1, p. 012075, 2024, doi: [10.1088/1742-6596/2728/1/012075](https://doi.org/10.1088/1742-6596/2728/1/012075).
- [11] Tolosa, I., Garciandía, F., Zubiri, F., Zapirain, F., & Esnaola, A. (2010). Study of mechanical properties of AISI 316 stainless steel processed by "selective laser melting", following different manufacturing strategies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51, 639-647.