

ANALISIS TEGANGAN DAN FAKTOR KEAMANAN TANGKI HIDROGEN TIPE I BERBAHAN AISI 4130 MENGGUNAKAN METODE ELEMEN HINGGA

*Thoriq Muhammad Almujaiddid¹, Sulisty², Mohammad Tauviqirrahman²

¹Mahasiswa Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*E-mail: thor.thoriq20@gmail.com

Abstrak

Penggunaan hidrogen sebagai sumber energi alternatif yang bersih mendorong pentingnya teknologi penyimpanan bertekanan tinggi yang aman dan andal. Tangki hidrogen tipe I berbahan AISI 4130 banyak digunakan karena kekuatan mekaniknya yang tinggi, namun rentan terhadap fenomena hydrogen embrittlement (HE). Penelitian ini bertujuan menganalisis distribusi tegangan dan faktor keamanan tangki hidrogen tipe I menggunakan metode elemen hingga (FEM) pada tiga variasi tekanan internal: 30 MPa, 40 MPa, dan 50 MPa. Simulasi dilakukan menggunakan perangkat lunak berbasis FEM untuk memperoleh tegangan ekuivalen (von-Mises) dan safety factor. Hasil menunjukkan bahwa peningkatan tekanan internal menyebabkan peningkatan tegangan dan penurunan faktor keamanan. Meskipun demikian, semua variasi masih berada dalam batas aman. Studi ini memberikan kontribusi dalam memahami perilaku struktural tangki tipe I terhadap tekanan tinggi serta menjadi dasar rekomendasi desain yang lebih aman.

Kata kunci: aisi 4130; faktor keamanan; fem; hidrogen; tangki tipe i; tegangan von-mises

Abstract

The use of hydrogen as a clean alternative energy source emphasizes the need for reliable and safe high-pressure storage technology. Type I hydrogen storage tanks made of AISI 4130 steel are widely adopted due to their high mechanical strength but are susceptible to hydrogen embrittlement (HE). This study aims to analyze the stress distribution and safety factor of a Type I hydrogen tank using the Finite Element Method (FEM) under three internal pressure variations: 30 MPa, 40 MPa, and 50 MPa. Simulations were performed using FEM-based software to obtain equivalent (von-Mises) stress and safety factor. The results show that increasing internal pressure leads to higher stress and lower safety factors. However, all conditions remain within safe limits. This study contributes to a better understanding of the structural behavior of Type I tanks under high pressure and provides a design basis for improved safety.

Keywords: aisi 4130; fem; hydrogen; safety factor; type i tank; von-mises stress

1. Pendahuluan

Penggunaan hidrogen sebagai sumber energi alternatif yang bersih dan berkelanjutan semakin menjadi fokus utama dalam upaya transisi energi global. Hidrogen memiliki keunggulan sebagai bahan bakar yang ramah lingkungan dengan potensi besar untuk menggantikan bahan bakar fosil dan mengurangi emisi karbon [1]. Penyimpanan hidrogen dalam tekanan tinggi merupakan aspek krusial yang menentukan kelayakan dan keamanan penerapan teknologi ini. Tangki penyimpanan tipe I berbahan baja paduan AISI 4130 banyak dipilih karena kekuatan mekanik serta efisiensi biayanya. Namun, baja ini rentan terhadap fenomena hydrogen embrittlement (HE), yaitu penurunan sifat mekanik dan retakan mikrostruktur akibat difusi dan akumulasi atom hidrogen [2].

Hydrogen embrittlement dipengaruhi oleh parameter mekanik dan termal serta distribusi tegangan dalam material tangki. Tegangan yang tidak merata dapat mempercepat akumulasi hidrogen di batas butir, meningkatkan risiko kerusakan [3]. Suhu tempering juga efektif dalam mengurangi kadar hidrogen terperangkap, sehingga meningkatkan ketahanan material [2]. Namun, beban tekanan tinggi hingga 50 MPa yang umum pada aplikasi praktis menuntut analisis yang mendalam terkait distribusi tegangan dan faktor keamanan tangki [4].

Metode Elemen Hingga (FEM) telah menjadi alat simulasi utama yang mampu memprediksi distribusi tegangan internal pada tangki penyimpanan hidrogen dengan tingkat akurasi tinggi, termasuk prediksi titik-titik stres konsentrasi kritis yang dapat memicu inisiasi retakan akibat HE dan kelelahan material [5]. FEM juga memungkinkan kajian efek siklus beban dan kerusakan termal akibat kebakaran yang menurunkan kekuatan material, sehingga mempengaruhi faktor keamanan tangki secara signifikan [6].

Pentingnya optimasi desain tangki juga sangat ditekankan, terutama pada daerah transisi seperti antara nozzle dan kepala tangki yang rawan konsentrasi tegangan tinggi [5]. Berbagai parameter desain, proses tempering, dan kondisi operasi harus dievaluasi secara komprehensif untuk mengurangi risiko kegagalan mendadak yang berpotensi menyebabkan bahaya keselamatan [4].

Seiring dengan perkembangan energi terbarukan, produksi hidrogen hijau dari sumber-sumber seperti tenaga angin dan biomassa juga menjadi aspek kunci dalam mendukung penyimpanan dan distribusi yang aman [7]. Produksi hidrogen yang efisien, seperti yang dioptimalkan melalui gasifikasi dalam proses pembangkitan hidrogen in-well, juga memerlukan pemahaman yang baik

tentang hubungan penyimpanan dan keamanan tangki [8]. Konteks ini menegaskan kebutuhan akan studi menyeluruh yang mengkaji faktor-faktor mekanik, termal, dan desain guna memastikan integritas dan keselamatan tangki penyimpanan hidrogen tipe I berbahan AISI 4130.

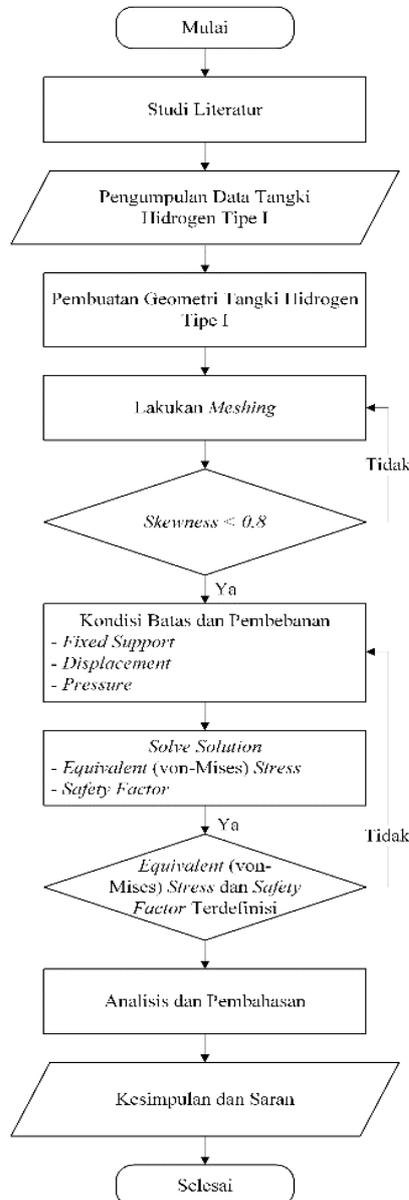
Penelitian ini bertujuan melakukan analisis mendalam terhadap distribusi tegangan dan faktor keamanan tangki hidrogen tipe I menggunakan pendekatan FEM dengan variasi tekanan operasional 30, 40, dan 50 MPa. Studi ini akan mengintegrasikan pemahaman terkait hydrogen embrittlement, pengaruh tempering, serta efek kerusakan termal untuk menghasilkan rekomendasi desain yang dapat meningkatkan keandalan dan keselamatan dalam penyimpanan hidrogen bertekanan tinggi.

2. Metodologi Penelitian

Langkah-langkah dalam penelitian ini diawali dengan penelusuran referensi terkait tangki hidrogen Tipe I, baik dari sisi karakteristik desain maupun sifat mekanik material logam yang umum digunakan, yaitu baja paduan AISI 4130. Setelah itu, data geometrik tangki disusun dan dimodelkan dalam bentuk tiga dimensi menggunakan perangkat lunak rekayasa berbasis metode elemen hingga (FEM).

Selanjutnya, model tangki dikenai variasi tekanan internal sebesar 30 MPa, 40 MPa, dan 50 MPa. Tahapan meshing dilakukan dengan memperhatikan kualitas elemen, terutama nilai skewness yang dijaga agar tetap di bawah batas ambang (0,8). Setelah model dinyatakan layak, pembebanan dan batasan diterapkan, meliputi tekanan internal dan dukungan tetap (*fixed support*).

Simulasi dijalankan untuk memperoleh tegangan ekuivalen (von-Mises) serta faktor keamanan sebagai *output* utama. Hasil yang diperoleh dianalisis untuk mengetahui respons struktur tangki terhadap perubahan tekanan. Alur proses penelitian secara menyeluruh ditampilkan pada Gambar 1.



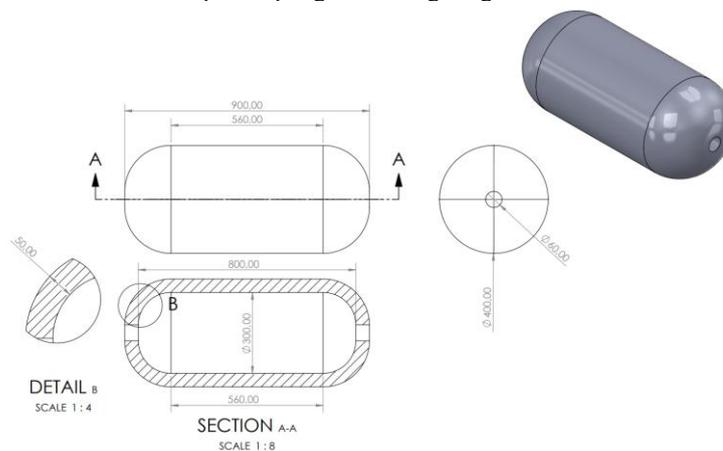
Gambar 1. Diagram Alir Metode Penelitian

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah baja paduan AISI 4130, yang secara luas diterapkan pada struktur bertekanan tinggi seperti tangki penyimpanan bahan bakar. Tabel 1 menunjukkan parameter mekanik utama material ini, termasuk modulus elastisitas, rasio Poisson, serta kekuatan luluh dan tarik maksimum. Data diambil dari literatur relevan [9] yang telah divalidasi melalui pengujian laboratorium dan studi numerik. Properti tersebut menjadi acuan utama dalam penentuan perilaku mekanis tangki selama simulasi.

Tabel 1. Mechanical Properties AISI 4130 [9]

<i>Mechanical Properties</i>	<i>Nilai</i>
<i>Density</i>	7850 kg/m ³
<i>Modulus Young</i>	210.000 MPa
<i>Poison's Rasio</i>	0.3
<i>Yield strength</i>	1186 MPa
<i>Ultimate Tensile Strength</i>	1289 MPa

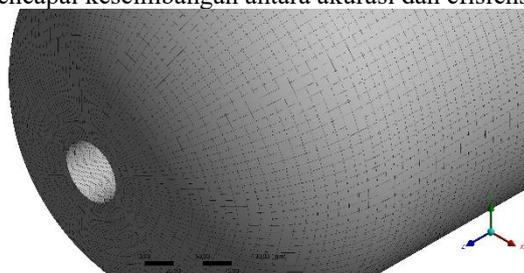
Model geometris tangki disusun berdasarkan standar desain silinder dengan kedua ujung berbentuk hemisferik. Dimensi tangki terdiri dari diameter luar sebesar 600 mm dan panjang keseluruhan 900 mm, dengan ketebalan dinding tangki sebesar 20 mm. Pemilihan bentuk ini ditujukan untuk menghindari konsentrasi tegangan pada ujung-ujung tangki, serta mencerminkan konfigurasi umum dari tangki Tipe I yang seluruhnya terbuat dari logam. Gambar 2 menunjukkan tampilan keseluruhan geometri beserta irisan penampang melintang tangki.



Gambar 2. Geometri Tangki Hidrogen Tipe I

Dalam proses simulasi elemen hingga, kualitas mesh sangat mempengaruhi akurasi hasil analisis seperti yang divisualisasikan pada Gambar 3. Salah satu parameter penting dalam evaluasi mesh adalah *skewness*, yang mengukur sejauh mana bentuk elemen menyimpang dari bentuk ideal. Nilai *skewness* yang tinggi dapat menyebabkan distorsi numerik dan mengurangi akurasi hasil simulasi. Oleh karena itu, dalam penelitian ini, mesh dirancang sedemikian rupa agar nilai *skewness* berada di bawah 0,8, memastikan kualitas mesh yang memadai untuk analisis struktur tangki hidrogen Tipe I.

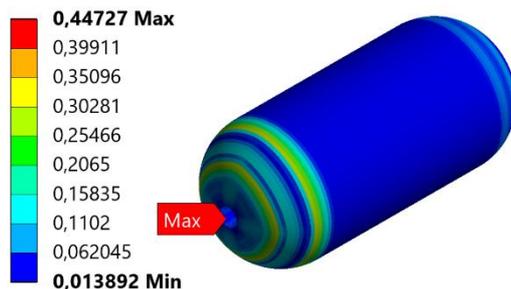
Menurut penelitian oleh Pisarciuc, peningkatan kepadatan mesh dapat meningkatkan akurasi hasil analisis elemen hingga, namun juga meningkatkan kebutuhan komputasi. Oleh karena itu, pemilihan ukuran elemen mesh dilakukan secara hati-hati untuk mencapai keseimbangan antara akurasi dan efisiensi komputasi [10].



Gambar 3. Mesh

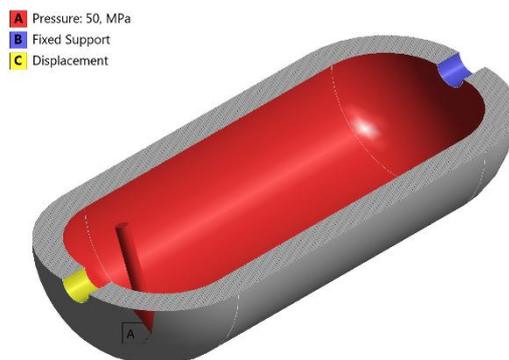
Evaluasi kualitas mesh dilakukan menggunakan parameter *skewness*, yang mengukur seberapa dekat bentuk elemen terhadap bentuk ideal. Nilai *skewness* berkisar antara 0,013 hingga 0,447 seperti pada Gambar 4, menunjukkan bahwa semua elemen berada di bawah ambang batas 0,8 yang disarankan untuk analisis numerik yang akurat. Hal ini

sejalan dengan temuan dalam studi oleh Fatchurrohman dan Chia, yang menekankan pentingnya menjaga nilai *skewness* rendah untuk memastikan stabilitas dan akurasi dalam analisis elemen hingga [11].



Gambar 4. *Skewness*

Pada Gambar 5 diperlihatkan bahwa simulasi dilakukan dengan menerapkan tekanan internal sebesar 50 MPa pada bagian dalam tangki, sementara ujung tangki lainnya ditetapkan sebagai *fixed support* serta *displacement*. Pendekatan ini mencerminkan kondisi operasional nyata dari tangki hidrogen dan telah digunakan dalam studi oleh Reda, yang menganalisis integritas struktural tangki hidrogen di bawah berbagai kondisi tekanan menggunakan analisis elemen hingga [12].



Gambar 5. Kondisi Batas dan Pembebanan

Penelitian ini mengevaluasi respons mekanik tangki terhadap variasi tekanan internal sebesar 30 MPa, 40 MPa, dan 50 MPa. Variasi ini dipilih untuk merepresentasikan rentang tekanan operasional yang umum pada aplikasi penyimpanan hidrogen. Studi oleh Reda juga menggunakan pendekatan serupa untuk menilai batas operasional termal dan integritas struktural berbagai jenis tangki tekanan hidrogen di bawah kondisi ekstrem [12].

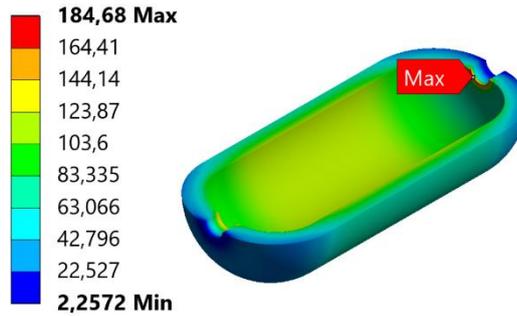
Tabel 2 Konfigurasi Variasi

Variasi	Pressure (MPa)
1	30
2	40
3	50

3. Hasil Dan Pembahasan

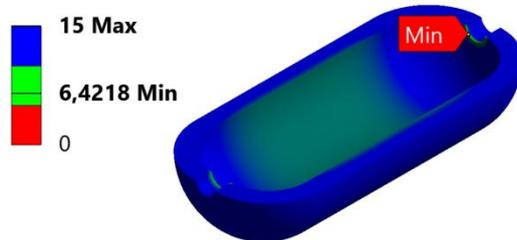
3.1 Variasi 1

Gambar 6 menampilkan distribusi tegangan ekuivalen (*von-Mises stress*) pada tangki hidrogen Tipe I saat diberikan tekanan internal sebesar 30 MPa. Tegangan maksimum tercatat sebesar 184,68 MPa, dengan konsentrasi tertinggi berada di area leher tangki. Pola distribusi tegangan ini konsisten dengan hasil penelitian oleh Reda, yang menggunakan analisis elemen hingga untuk mengevaluasi integritas struktural tangki hidrogen di bawah berbagai kondisi tekanan [12].



Gambar 6. Kontur *Equivalent (von-Mises) Stress* dengan *Pressure* 30 MPa

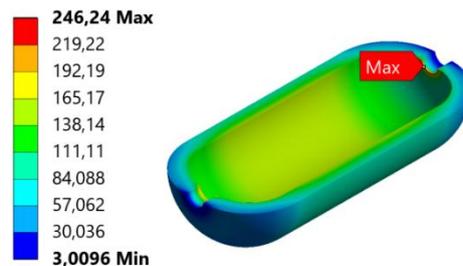
Gambar 7 menunjukkan distribusi faktor keamanan (*safety factor*) pada kondisi tekanan internal 30 MPa. Nilai minimum faktor keamanan tercatat sebesar 6,4218, yang menunjukkan bahwa tegangan kerja masih jauh di bawah batas luluh material AISI 4130. Hal ini sejalan dengan temuan dalam studi oleh Jiao et al., yang menggunakan model elemen hingga untuk mengevaluasi respons mekanis tangki penyimpanan minyak besar yang mengalami penurunan fondasi non-uniform [13].



Gambar 7. Kontur *Safety Factor* dengan *Pressure* 30 MPa

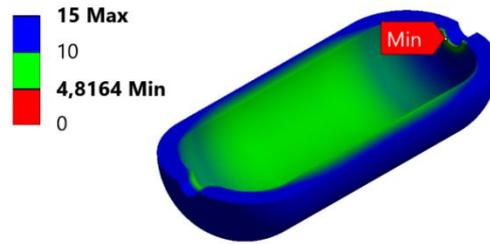
3.2 Variasi 2

Distribusi tegangan ekuivalen (*von-Mises*) akibat tekanan internal 40 MPa pada tangki hidrogen ditampilkan pada Gambar 8. Tegangan maksimum mencapai 246,24 MPa, meningkat dari variasi sebelumnya (30 MPa). Area konsentrasi tegangan tertinggi kembali terletak di bagian leher tangki, menunjukkan bahwa zona tersebut merupakan titik kritis desain. Distribusi ini mendukung hasil penelitian oleh Reda, yang menyatakan bahwa bagian sambungan atau transisi geometri cenderung mengalami peningkatan stres secara signifikan [14].



Gambar 8. Kontur *Equivalent (von-Mises) Stress* dengan *Pressure* 40 MPa

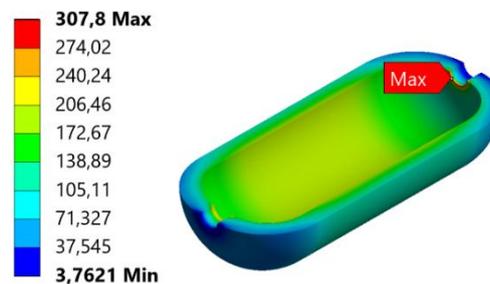
Gambar 9 menampilkan distribusi faktor keamanan (*safety factor*) pada tangki hidrogen tipe I saat dikenai tekanan internal sebesar 40 MPa. Nilai minimum faktor keamanan tercatat sebesar 4,8164, menunjukkan penurunan dibandingkan kondisi sebelumnya (30 MPa), namun masih berada dalam batas aman untuk aplikasi tekanan tinggi. Pola distribusi ini konsisten dengan temuan dalam studi oleh Reda, yang melakukan analisis elemen hingga untuk mengevaluasi integritas struktural tangki hidrogen di bawah berbagai kondisi tekanan [14].



Gambar 9. Kontur *Safety Factor* dengan *Pressure* 40 MPa

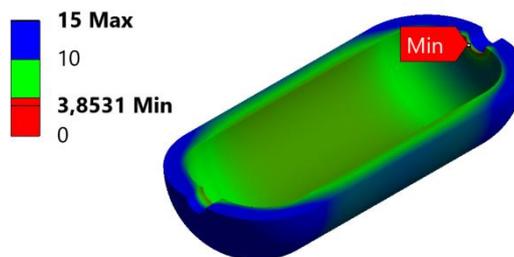
3.3 Variasi 3

Gambar 10 menunjukkan hasil simulasi tegangan ekuivalen (*von-Mises*) pada tangki hidrogen tipe I dengan tekanan internal sebesar 50 MPa. Tegangan maksimum yang tercatat adalah 307,8 MPa, yang meningkat tajam dari variasi sebelumnya. Distribusi tegangan masih menunjukkan konsentrasi tertinggi di area leher tangki, konsisten dengan efek konsentrasi tegangan akibat perubahan geometri. Pola ini juga dilaporkan oleh Reda dalam studi analisis struktural tangki penyimpanan hidrogen berbasis AISI 4130 menggunakan pendekatan elemen hingga [14].



Gambar 10. Kontur *Equivalent (von-Mises) Stress* dengan *Pressure* 50 MPa

Gambar 11 menampilkan sebaran nilai *safety factor* pada kondisi tekanan 50 MPa. Nilai minimum yang diperoleh adalah 3,8531, menunjukkan adanya penurunan margin keamanan dibandingkan tekanan 40 MPa, namun tetap berada dalam batas aman (>2) untuk aplikasi tekanan tinggi. Hasil ini menegaskan pentingnya evaluasi variasi tekanan dalam desain tangki hidrogen. Metode dan pola penurunan faktor keamanan ini juga didukung oleh hasil simulasi yang dilaporkan dalam kajian oleh Reda [14].



Gambar 11. Kontur *Safety Factor* dengan *Pressure* 50 MPa

3.4 Perbandingan Variasi

Tabel 3 menyajikan hasil perbandingan antara nilai tegangan ekuivalen (*Equivalent von-Mises Stress*) dan *safety factor* pada masing-masing variasi tekanan internal (30 MPa, 40 MPa, dan 50 MPa). Berdasarkan hasil simulasi, terdapat tren peningkatan tegangan seiring bertambahnya tekanan, dari 184,68 MPa pada variasi 1 menjadi 307,80 MPa pada variasi 3. Hal ini menunjukkan bahwa struktur tangki mengalami beban mekanik yang lebih besar seiring naiknya tekanan.

Sebaliknya, *safety factor* mengalami penurunan, dari 6,42 pada variasi 1 menjadi 3,85 pada variasi 3. Penurunan ini menunjukkan semakin kecilnya margin keamanan struktur terhadap tegangan luluh (*yield strength*) material, meskipun secara keseluruhan nilai masih berada dalam batas aman (>2).

Hasil ini konsisten dengan prinsip dasar mekanika material bahwa tegangan meningkat secara linier terhadap tekanan internal, sementara faktor keamanan menurun secara proporsional. Tren ini juga sejalan dengan temuan Hazizi dan Ghaleh yang mengemukakan bahwa tekanan internal merupakan salah satu faktor dominan dalam penurunan integritas struktural tangki tekanan tinggi berbasis baja karbon AISI 4130 [15].

Tabel 3. Perbandingan Variasi

Variasi	Equivalent (von-Mises) Stress	Safety Factor
1	184,68 MPa	6,42
2	246,24 MPa	4,82
3	307,80 MPa	3,85

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi tegangan dan faktor keamanan pada tangki hidrogen Tipe I berbahan AISI 4130 terhadap variasi tekanan internal sebesar 30 MPa, 40 MPa, dan 50 MPa, maka dapat disimpulkan hal-hal berikut:

1. Tekanan internal berbanding lurus dengan tegangan yang terjadi. Nilai tegangan ekuivalen (*von-Mises*) meningkat seiring dengan bertambahnya tekanan internal, dari 184,68 MPa pada 30 MPa, menjadi 307,80 MPa pada tekanan 50 MPa.
2. Faktor keamanan mengalami penurunan seiring peningkatan tekanan. *Safety factor* menurun dari 6,42 pada tekanan 30 MPa menjadi 3,85 pada tekanan 50 MPa. Meskipun demikian, seluruh nilai masih berada di atas batas minimum keamanan umum (>2), menunjukkan desain masih tergolong aman.
3. Distribusi tegangan tertinggi konsisten terjadi di area leher tangki. Hal ini disebabkan oleh perubahan geometri yang menyebabkan konsentrasi tegangan lokal, yang perlu diperhatikan secara khusus dalam desain manufaktur.
4. Material AISI 4130 menunjukkan performa struktural yang baik. Dengan yield strength sebesar 1186 MPa dan ultimate tensile strength 1289 MPa, material ini mampu menahan tekanan tinggi hingga 50 MPa tanpa mengalami kegagalan struktural.

5. Daftar Pustaka

- [1] M. Taylor *et al.*, "International Journal of Hydrogen Energy Offshore renewable hydrogen potential in Australia : A techno-economic and legal review," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 152, no. November 2024, p. 149923, 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.06.113.
- [2] Y. Sun, W. Ding, M. Li, Y. Li, X. Lu, and Z. Gan, "Investigations of hydrogen diffusion and embrittlement behavior in tempered high-strength carbon steel AISI 4130," *Int. J. Press. Vessel. Pip.*, vol. 214, no. July 2024, p. 105447, 2025, doi: 10.1016/j.ijpvp.2025.105447.
- [3] G. A. Martiniano, J. E. S. Leal, R. F. da Silva Alvarenga, W. W. Bose Filho, M. T. Piza Paes, and S. D. Franco, "Effect of mechanical strength on the hydrogen embrittlement susceptibility and fracture behavior of a modified AISI 4130 steel," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 136, no. April 2024, pp. 765–776, 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.04.167.
- [4] X. Wang *et al.*, "Challenges and opportunities in hydrogen storage and transportation: A comprehensive review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 219, no. December 2024, p. 115881, 2025, doi: 10.1016/j.rser.2025.115881.
- [5] U. B. Beak, J. Park, K. O. Bae, and T. T. Nguyen, "Understanding cracking behavior in type I hydrogen storage vessels and critical crack size assessment," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 101, no. December 2024, pp. 1054–1069, 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.12.478.
- [6] M. Ayvaz, S. İ. Ayvaz, and İ. Aydin, "A novel method for determining effects of fire damage on the safety of the Type I pressure hydrogen storage tanks," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 43, no. 44, pp. 20271–20283, 2018, doi: 10.1016/j.ijhydene.2018.05.092.
- [7] E. Cordioli, J. de Maigret, M. Testi, and L. Crema, "Green hydrogen in the Alps: Mapping local stakeholders perspectives and identifying opportunities for decarbonization," *Energy Reports*, vol. 14, no. May, pp. 128–140, 2025, doi: 10.1016/j.egy.2025.06.001.
- [8] M. Hamdy and M. A. Nemitallah, "International Journal of Hydrogen Energy Optimizing coke generation / gasification of in-situ combustion gasification process of oil for enhanced in-well hydrogen production," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 149, no. February, p. 150098, 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.150098.
- [9] A. Díaz, I. I. Cuesta, and J. M. Alegre, "A methodology for the numerical assessment of autofrettage influence on hydrogen content near a notch in a 4130 steel pressure vessel," *Theor. Appl. Fract. Mech.*, vol. 92, no. July, pp. 205–213, 2017, doi: 10.1016/j.tafmec.2017.07.024.
- [10] C. Pisarciuc, I. Dan, and R. Cioară, "The Influence of Mesh Density on the Results Obtained by Finite Element Analysis of Complex Bodies," *Materials (Basel)*, vol. 16, no. 7, p. 2555, 2023, doi: 10.3390/ma16072555.
- [11] N. Fatchurrohman and S. T. Chia, "Performance of hybrid nano-micro reinforced mg metal matrix composites brake calliper: Simulation approach," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 257, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/257/1/012060.
- [12] R. Reda, S. Ataya, and A. Ashraf, "Finite Element Modeling of Different Types of Hydrogen Pressure Vessels Under Extreme Conditions for Space Applications," *Processes*, vol. 13, no. 5, 2025, doi: 10.3390/pr13051429.
- [13] Y. Jiao, Y. Wang, J. Li, and X. Liu, "Finite Element Analysis and Improved Evaluation of Mechanical Response in Large Oil Storage Tanks Subjected to Non-Uniform Foundation Settlement," *Processes*, vol. 12, no. 12, 2024, doi: 10.3390/pr12122838.

-
- [14] R. Reda, M. Khamis, A. E. Ragab, A. Elsayed, and A. M. Negm, “Numerical analysis of the impact of winding angles on the mechanical performance of filament wound type 4 composite pressure vessels for compressed hydrogen gas storage,” *Heliyon*, vol. 10, no. 13, p. e33796, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e33796.
- [15] K. Hazizi and M. Ghaleeh, “Design and Analysis of a Typical Vertical Pressure Vessel Using ASME Code and FEA Technique,” *Designs*, vol. 7, no. 3, 2023, doi: 10.3390/designs7030078.