

ANALISIS KEKUATAN PEGAS DAN RANGKA ANHANG *MOVEABLE HYDROGEN TANK* DALAM SISTEM *GREEN HUB H2 PLANT*

*Kautsar Bachtiar Rahman¹, Susilo Adi Widyanto², Mochammad Ariyanto²

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

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

*E-mail: kautsar.arman@gmail.com

Abstrak

Penelitian ini membahas analisis daya tahan rangka anhang tangki hidrogen yang bisa bergerak, yang merupakan bagian dari sistem green hub pabrik H₂. Fokus utama penelitian adalah memastikan bahwa rangka tersebut mampu menahan beban yang dihasilkan oleh tangki hidrogen, baik dalam kondisi diam maupun bergerak. Metode yang digunakan adalah Analisis Elemen Hingga (FEA) dengan bantuan perangkat lunak ANSYS untuk mengecek distribusi tegangan, perubahan bentuk, serta faktor keamanan pada rangka. Spesifikasi bahan dan ukuran rangka diperoleh dari hasil desain serta standar teknis yang berlaku. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tegangan tertinggi yang terjadi masih di bawah batas daya tahan bahan yang digunakan, sehingga struktur ini dianggap aman. Faktor keamanan yang diperoleh juga sesuai dengan standar desain struktur kendaraan. Dengan demikian, bisa disimpulkan bahwa rangka anhang tangki hidrogen yang dirancang memiliki daya tahan yang cukup untuk digunakan dalam sistem green hub pabrik H₂ dengan tingkat keandalan yang tinggi.

Kata Kunci: anhang; *hydrogen tank*; analisis rangka; ansys; faktor keamanan

Abstract

This study discusses the analysis of the durability of a movable hydrogen tank frame, which is part of the H₂ plant's green hub system. The main focus of the study is to ensure that the frame is capable of withstanding the load generated by the hydrogen tank, both in stationary and moving conditions. The method used is Finite Element Analysis (FEA) with the help of ANSYS software to check the stress distribution, deformation, and safety factors of the frame. The material specifications and frame dimensions were obtained from the design results and applicable technical standards. The simulation results show that the highest stress that occurs is still below the endurance limit of the material used, so this structure is considered safe. The safety factor obtained is also in accordance with vehicle structure design standards. Thus, it can be concluded that the designed hydrogen tank frame has sufficient endurance to be used in the H₂ plant's green hub system with a high level of reliability.

Keywords: anhang; *hydrogen tank*; frame analysis; ansys; safety factor

1. Pendahuluan

Dalam industri transportasi modern, pengembangan rangka anhang untuk penyimpanan dan pengangkutan hidrogen menghadapi tantangan unik yang menuntut keseimbangan antara kekuatan struktural, efisiensi bobot, dan keamanan maksimum. Rangka ini harus dirancang untuk menahan beban statis dari tangki dan hidrogen, serta beban dinamis selama perjalanan[1]. Untuk mencapai desain yang optimal, yang mampu mendistribusikan beban secara merata dan mencegah konsentrasi tegangan, diperlukan pendekatan rekayasa yang presisi. Di sinilah Analisis Elemen Hingga (FEA) berperan krusial. FEA adalah metode simulasi numerik yang memecah struktur kompleks menjadi elemen-elemen kecil untuk menganalisis perilaku mekanisnya secara mendalam, termasuk tegangan, regangan, dan deformasi [2]. Penggunaan FEA, dibantu oleh perangkat lunak seperti ANSYS, memungkinkan para insinyur untuk melakukan analisis beban statis dan mengevaluasi kinerja desain secara virtual sebelum pembuatan prototipe fisik. Pendekatan ini secara signifikan mengurangi biaya, waktu, dan risiko. Studi menunjukkan bahwa FEA efektif untuk mengoptimalkan desain rangka kendaraan hidrogen, bahkan memungkinkan pengurangan bobot tanpa mengorbankan kekuatan[3]. Hasil tersebut menegaskan bahwa simulasi numerik berbasis FEA tidak hanya mempercepat proses desain, tetapi juga meningkatkan efisiensi material serta faktor keselamatan dalam pengembangan rangka kendaraan. Lebih lanjut, FEA menjadi alat yang sangat penting untuk memastikan desain rangka memenuhi standar keselamatan internasional, seperti ISO/TR 15916:2015, dengan cara memodelkan berbagai skenario pembebanan. Dengan demikian, FEA tidak hanya mempercepat proses desain, tetapi juga memastikan bahwa sistem rekayasa yang dihasilkan efisien, aman, dan dapat diandalkan. Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk merancang dan menganalisis desain rangka anhang untuk tangki hidrogen yang optimal dan aman.

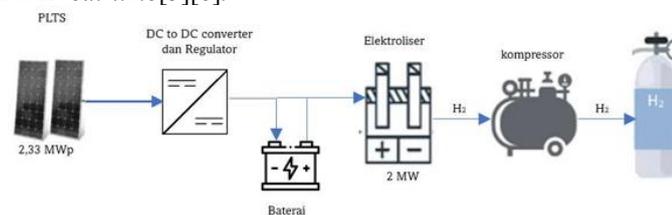
2. Dasar Teori

2.1 Green Hub H2 Plant

Semakin terbatasnya pasokan energi fosil dan efek negatifnya mendorong penggunaan sumber energi lain yang lebih ramah lingkungan dan berkelanjutan. Teknologi yang dapat diterapkan untuk proses produksi energi yang berkelanjutan, seperti energi surya, angin, dan arus laut, telah dan terus dikembangkan. Salah satu tantangan utama untuk mengurangi emisi CO₂ dan memenuhi pedoman transisi energi adalah dekarbonisasi pembangkit listrik tenaga gas alam (NG). Ini dapat dilakukan dengan mengubah pembangkit untuk mengganti 25% NG dengan hidrogen berkelanjutan, meningkatkan efisiensi energi[4].

2.2 Rangkaian Sistem Integrasi Produksi Hidrogen

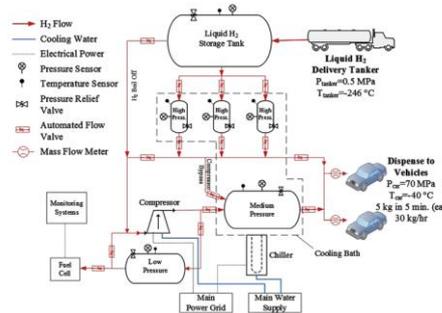
Integrasi pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dengan sistem elektroliser menawarkan solusi produksi hidrogen yang berkelanjutan yang memanfaatkan sifat intermiten energi matahari untuk menghasilkan hidrogen saat terjadi surplus pembangkitan listrik. Metode ini memungkinkan pemanfaatan langsung energi surya selama proses elektrolisis, yang mendukung tercapainya produksi hidrogen yang bersifat netral karbon. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1, pemodelan MATLAB Simulink dapat digunakan untuk menganalisis produksi hidrogen hijau pada jaringan mikro. Pemodelan ini mencakup komponen seperti mesin berbahan bakar hidrogen, PLTS, dan turbin angin. Pengembangan juga mencakup sistem manajemen energi berbasis multi-agen dan kecerdasan buatan, sehingga pengelolaan energi dapat dilakukan secara terdistribusi dan *real-time*[5][6].



Gambar 1. Skema Model Sistem Hidrogen Hijau[5]

2.3 Hydrogen Refuelling Station

Stasiun pengisian hidrogen (HRS) berfungsi sebagai bagian penting dari sistem kendaraan listrik berbahan bakar hidrogen karena fungsi utamanya adalah menyediakan hidrogen bertekanan tinggi secara aman dan efisien untuk kendaraan pribadi dan perusahaan. Kebutuhan akan stasiun pengisian yang fleksibel, murah, dan mudah digunakan meningkat seiring dengan peningkatan minat global terhadap kendaraan berbahan bakar hidrogen. Untuk mempercepat penggunaan mobil hidrogen, solusi portabel seperti stasiun pengisian hidrogen modular mulai dikembangkan. Hal ini disebabkan oleh fakta bahwa pembangunan stasiun pengisian hidrogen konvensional biasanya membutuhkan waktu yang lama dan biaya awal yang tinggi[7][8]. Distribusi hidrogen ini ditunjukkan oleh diagram pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Hydrogen Fuel Stations System Diagram

Dalam sistem ini, digunakan *moveable tank* yang merupakan bagian penting dalam strategi distribusi hidrogen yang cepat dan terdesentralisasi. Tangki ini dirancang untuk disimpan, dikirim, dan digunakan dalam berbagai jenis pengaturan tanpa perlu instalasi tetap, sehingga cocok digunakan sebagai penyimpan utama di stasiun pengisian hidrogen portabel.

2.4 Rangka Anhang Moveable Tank

Anhang atau *trailer* adalah jenis kendaraan yang tidak memiliki mesin dan dirancang untuk ditarik oleh kendaraan bermotor. Fungsi utamanya adalah membantu dalam mengangkut muatan tertentu, seperti perahu kecil atau skuter air. Trailer ini memiliki kapasitas muatan maksimal sebesar 750 kg. Anhang dilengkapi dengan perangkat seperti penggulung, roda penyangga, dan sistem pengatur ketinggian[9].

Sebagai stabilitas, rangka anhang harus dirancang dengan daya tahan dan kekuatan struktural yang cukup agar mampu menahan beban dinamis selama proses pengangkutan, pemuatan, hingga pembongkaran. Salah satu jenis rangka yang sesuai dengan kebutuhan anhang adalah rangka jenis *ladder* seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Sesuai dengan namanya, rangka ini menyerupai bentuk tangga yang memiliki dua rel longitudinal yang dihubungkan oleh beberapa penyangga lateral dan silang yang sangat baik dalam menopang beban berat. Berat anhang dan muatan didistribusikan secara merata di sepanjang rel longitudinal, yang kemudian disalurkan ke roda. Ini meminimalkan konsentrasi tegangan dan mengurangi risiko kegagalan struktural, terutama saat menahan beban statis yang besar[10][11].



Gambar 3. *Ladder Frame Chassis*[10]

2.5 Finite Element Methode

Finite Element Methode (FEM) adalah teknik numerik yang digunakan untuk memprediksi bagaimana objek atau sistem bereaksi terhadap berbagai pengaruh fisik seperti gaya, panas, atau getaran[12]. Dalam prosesnya, FEM dibagi menjadi tiga tahapan utama. Tahap pertama merupakan *pre-processing*, berupa pengimporan model geometri yang dibuat untuk kemudian dipecah menjadi elemen-elemen kecil yang disebut dengan proses *meshing*. Dengan cara ini, FEM bisa menghitung besaran-besaran fisik seperti tegangan, regangan, dan bentuk perubahan pada setiap bagian, dan kemudian menggabungkannya untuk memperkirakan bagaimana seluruh struktur berperilaku. Kualitas dan ukuran *mesh* sangat krusial, *mesh* yang lebih halus memberikan akurasi yang lebih tinggi tetapi membutuhkan daya komputasi yang lebih besar[13]. Kemudian tahapan dilanjutkan dengan *solution*, dimana *software* menggunakan model matematika untuk menghitung respons setiap elemen terhadap beban dan kondisi yang telah ditentukan. Perhitungan ini menghasilkan matriks persamaan yang sangat besar, di mana setiap matriks merepresentasikan perilaku fisik dari setiap elemen. Tahapan terakhir adalah *post-processing*, dimana hasil akan divisualisasikan. Dalam tahapan ini, dapat dilihat von mises stress dalam bentuk plot warna atau grafik yang mewakili kerentanan bagian terhadap kombinasi tegangan tekan dan geser karena pengaruh beban eksternal. Area dengan tegangan yang tinggi menjadi petunjuk penting dalam mengevaluasi daya tahan material, karena di sana terjadi kemungkinan deformasi plastis yang besar. Oleh karena itu, menghitung von Mises stress sangat penting dalam analisis desain struktur agar memastikan komponen teknik tetap aman dan bisa diandalkan dalam menghadapi beban kerja yang diberikan[14].

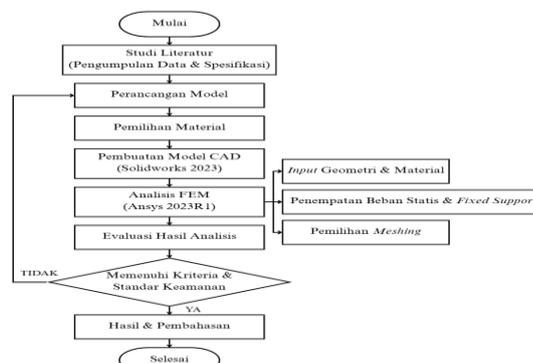
2.6 Faktor Keamanan

Faktor keamanan adalah faktor yang digunakan untuk mengevaluasi keamanan dari suatu bagian mesin[15]

- $\eta = 1,25$ hingga $2,0$ untuk perancangan struktur yang menerima beban statis dengan tingkat kepercayaan yang tinggi untuk semua data perancangan.
 - $\eta = 2,0$ hingga $2,5$ untuk perancangan elemen-elemen mesin yang menerima pembebanan dinamis dengan tingkat kepercayaan rata-rata untuk semua data perancangan.
 - $\eta = 2,5$ hingga $4,0$ untuk perancangan struktur statis atau elemen-elemen mesin yang menerima pembebanan dinamis dengan ketidakpastian mengenai beban, sifat-sifat bahan, analisis tegangan, atau lingkungan.
- $\eta = 4,0$ atau lebih untuk perancangan struktur statis atau elemen-elemen mesin yang menerima pembebanan dinamis dengan ketidakpastian mengenai beberapa kombinasi bahan, sifat-sifat bahan, analisis tegangan, atau lingkungan.

3. Metode Penelitian

Pada penelitian ini, tahapan analisis kekuatan rangka anhang moveable hydrogen tank ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 4.



Gambar 4. Diagram Alir Penelitian

3.1 Perancangan Model

Perancangan model dilakukan dengan pendekatan analitis dan sistematis untuk menyusun rancangan awal sebagai konsep dasar dalam menentukan geometri dan struktur anhang yang sesuai. Tegangan *von-mises stress* dihitung untuk memastikan tegangan masih berada dibawah batas luluh material. Pembebanan yang digunakan adalah pembebanan statis, dikarenakan arah tekanan konstan dan gaya yang terjadi adalah gaya normal. Rumus tegangan *von-mises* yang digunakan ditunjukkan pada persamaan 3.1.

$$\sigma_v = \frac{F}{A} \quad (3.1)$$

Dimana:

σ_v = Tegangan ekuivalen *von-mises* (MPa) A = Luas penampang (mm² atau m²)

F = gaya yang bekerja tegak lurus terhadap penampang (N)

Hasil perhitungan tegangan *von-mises* dapat digunakan untuk menentukan *Factor of Safety* atau rasio antara kekuatan material (beban yang menyebabkan kegagalan) terhadap tegangan/beban yang dialami pada rangka menggunakan rumus umum persamaan 3.2.

$$n = \frac{\sigma_y}{\sigma_v} \quad (3.2)$$

Dimana:

n = Faktor keamanan (Factor of Safety)

σ_y = *yield strength* material (MPa) σ_v = Tegangan ekuivalen hasil perhitungan (MPa)

Sedangkan pada bagian suspensi, perhitungan yang dapat digunakan untuk mencari gaya total ditunjukkan oleh persamaan 3.3.

$$F_{total} = F_{per\ daun} + F_{hidrolik} = k(Z_b - Z_a) + c(\dot{Z}_b - \dot{Z}_a) \quad (3.3)$$

Dimana:

F_{total} = Gaya total suspensi (N) $Z_b - Z_a$ = Defleksi vertikal akibat beban (m)

k = Kekuatan leaf spring (N/m) $\dot{Z}_b - \dot{Z}_a$ = Kecepatan relatif vertikal (m/s)

c = Koefisien redam shock absorber (Ns/m)

Dengan asumsi seluruh daun aktif memiliki dimensi yang seragam serta beban terdistribusi merata, maka besarnya defleksi dapat dihitung menggunakan persamaan 3.4.

$$\delta = \frac{3FL^3}{8Enbt^3} \quad (3.4)$$

Dimana:

δ = Defleksi Vertikal Ujung Pegas (mm) b = Lebar tiap daun pegas (mm)

W = Beban total yang bekerja pada pegas (N) t = Tebal tiap daun pegas (mm)

E = Modulus elastisitas material pegas (N/mm²) n = Jumlah lembar daun yang efektif menahan beban

L = Setengah panjang pegas, yaitu jarak dari pusat ke tumpuan (mm)

Sebagai tahap verifikasi, hasil perhitungan defleksi menggunakan metode analitik dibandingkan dengan hasil simulasi berbasis metode elemen hingga (FEA). Perbandingan ini dinyatakan dalam bentuk persentase error yang dihasilkan melalui persamaan 3.5.

$$\%Error = \frac{[\delta_{Teori} - \delta_{FEA}]}{\delta_{FEA}} \times 100\% \quad (3.5)$$

Dimana δ_{Teori} merupakan defleksi hasil perhitungan analitik hasil persamaan dan δ_{FEA} = Nilai deformasi maksimum yang diperoleh dari simulasi Ansys

3.2 Pemilihan Material

Pada rancangan anhang *moveable tank*, *mild carbon steel* sebagai material utama didasarkan pada kombinasi sifat mekanis dan kemudahan proses produksinya. Material ini memiliki kekuatan yang memadai untuk menopang beban struktural, sekaligus mempertahankan kelenturan yang cukup untuk mengurangi risiko kegagalan. Tabel 1 menunjukkan komposisi kimia dari *mild carbon steel*.

Tabel 1. Komposisi Kimia *Mild Carbon Steel*

<i>Element</i>	<i>Content</i>
Carbon, C	0,14 – 0,20 %
Iron, Fe	98,81 – 99,26 %
Magnese, Mn	0,60 – 0,90 %
Phosphorous, P	≤ 0,040 %
Sulfur, S	≤ 0,050 %

Selain itu, diketahui juga *physical properties* dan *mechanical properties* dari material *mild carbon steel* yang ditunjukkan oleh Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. *Physical Properties Mild Carbon Steel*

<i>Physical Properties</i>	<i>Metric</i>	<i>Imperial</i>
Hardness, Brinell	7,87 g/cc	0,284 lb/in

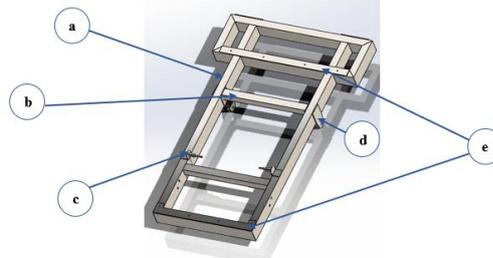
Tabel 3. *Mechanical Properties Mild Carbon Steel*

<i>Mechanical Properties</i>	<i>Metric</i>	<i>Imperial</i>
Hardness, Brinell	126	126
Hardness, Rockwell B (Converted from Brinell hardness)	71	71
Hardness, Vickers (Converted from Brinell hardness)	131	131
Tensile Strength, Ultimate	440 Mpa	63800 psi
Tensile Strength, Yield	370 Mpa	43700
Elongation at Break (In 50 mm)	15,0 %	15,0 %
Modulus of Elasticity (Typical for steel)	205 GPa	29700 ksi
Shear Moodulus (Typical for steel)	80,0 GPa	11600 ksi

3.3 Pembuatan Model 3D

3.3.1 Rangka

Sebelum dilakukan simulasi, dilakukan pembuatan model 3D rangka anhang dengan *Software SolidWorks 2023* seperti ditunjukkan oleh Gambar 5. Rangka anhang memiliki basis struktur *mild carbon steel* berbentuk hollow yang memiliki 2 profil berbeda pada bagian *Main Frame* dan bagian *crossmember* yang dijelaskan pada Tabel 4.



Keterangan : (a) *Main frame*; (b) *Crossmember*; (c) *Shock absorber bracket*; (d) *Front leaf spring bracket*; (e) *Tank support bracket*

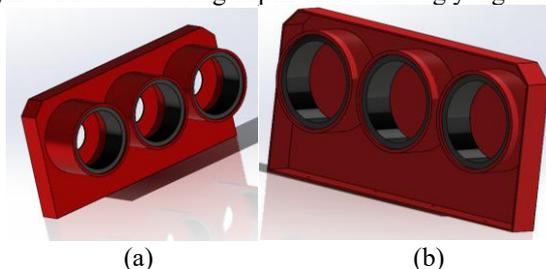
Gambar 5. Desain 3D Rangka Anhang *Moveable Tank*

Tabel 4. Profil *Hollow*

Parts	Profil Hollow (mm)	Tebal (mm)
<i>Main Frame</i>	100 x 50	5
<i>Crossmember</i>	50 x 50	5

3.3.2 Dudukan Tabung

Dudukan tabung hidrogen dibuat untuk menopang tabung hidrogen agar tetap kokoh pada rangka utama pada saat proses transportasi. Dudukan tabung ini terbuat dari plat dan juga silinder baja yang dilapisi karet menyesuaikan diameter tabung, serta dilengkapi lubang baut pengikat agar posisi tabung tidak bergeser selama penggunaan. Desain 3D dudukan tabung dibagi menjadi dua jenis, yaitu dudukan tabung depan dan belakang yang ditunjukkan oleh Gambar 6.

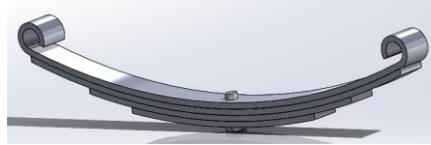


Gambar 6. Desain 3D Dudukan Tabung (a) Depan; (b) Belakang

3.3.3 Pegas Daun

Peran pegas daun dalam anhang *moveable tank* adalah membantu suspensi utama bekerja dalam menahan beban keseluruhan dari anhang, pegas daun terbuat dari baja yang berbentuk pipih serta dilengkapi bagian penahan *bracket* pada

kedua ujungnya. Pada penggunaan ini, pegas daun dibuat memiliki 4 tingkatan dengan panjang yang berbeda, dan panjang yang disesuaikan dengan *bracket* yang terpasang di rangka. Hasil desain 3D pegas daun ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Desain 3D Pegas Daun

3.4 Simulasi Beban Statis

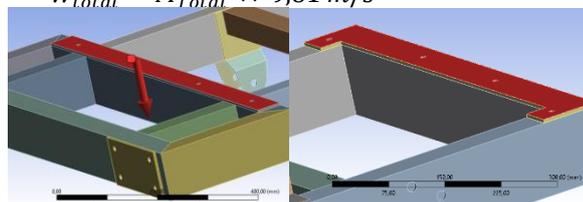
Simulasi beban statis dari model CAD yang sudah dibuat pada *software* Solidworks 2023 dilakukan pada *Software* Ansys dengan menggunakan fitur *Static Structural*. Hasil analisis pada fitur tersebut dapat digunakan untuk mendapatkan hasil dari perhitungan tegangan *Von-mises*, deformasi, dan *safety factor* pada rangka anhang.

3.4.1 Rangka

Analisis pembebanan statis difokuskan pada gaya vertikal yang terdistribusi secara merata di sepanjang struktur rangka kendaraan. Perhitungan dan penempatan beban total yang ditumpu pada rangka adalah sebagai berikut.

$$M_{total} = M_{Tabung} + M_{dudukan tabung} \quad (3.6)$$

$$W_{total} = M_{total} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \quad (3.7)$$



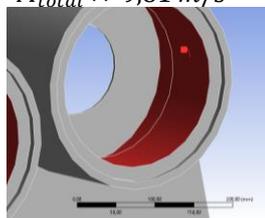
Gambar 8. Pembebanan Eksternal pada Rangka

3.4.2 Dudukan Tabung

Analisis pembebanan statis difokuskan pada gaya vertikal pada area yang memiliki kontak langsung dengan tabung hidrogen. Perhitungan dan penempatan beban total yang ditumpu pada dudukan tabung adalah sebagai berikut.

$$M_{total} = \frac{M_{tabung}}{2} \quad (3.8)$$

$$W_{total} = M_{total} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \quad (3.9)$$



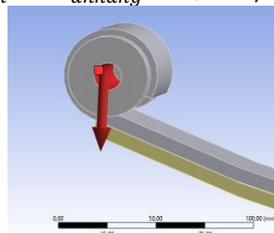
Gambar 9. Pembebanan Eksternal pada Dudukan Tabung

3.4.3 Pegas Daun

Analisis pembebanan statis difokuskan pada gaya vertikal pada *mounting point* yang terhubung ke *bracket* pegas. Perhitungan dan penempatan beban total yang ditumpu pada pegas daun adalah sebagai berikut.

$$M_{anhang} = 317,06 \text{ kg} \quad (3.10)$$

$$W_{total} = M_{anhang} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \quad (3.11)$$



Gambar 10. Pembebanan Eksternal pada Pegas Daun

3.5 Meshing

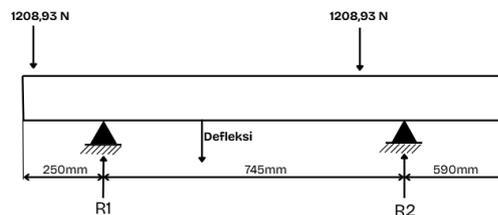
Penentuan ukuran *mesh* yang optimal dilakukan dengan menggunakan *grid independence test* yang berfungsi untuk memperoleh hasil simulasi yang akurat dan stabil tanpa dipengaruhi oleh variasi ukuran *mesh*.

4. Hasil dan Analisis

4.1 Hasil Perhitungan Beban dan Gaya

4.1.1 Rangka

Berdasarkan persamaan 3.6 dan 3.7 didapatkan beban total dan gaya yang menumpu pada rangka seperti pada Gambar 11 berikut.



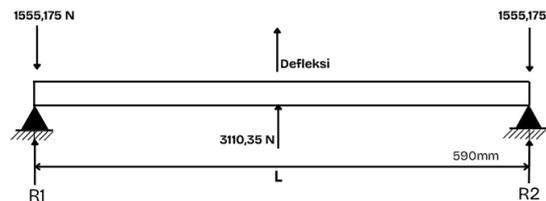
Gambar 11. Diagram Benda Bebas pada Rangka

4.1.2 Dudukan Tabung

Berdasarkan persamaan 3.8 dan 3.9 didapatkan beban total dan gaya yang menumpu pada dudukan tabung sebesar 74,6 kg, dan gaya yang dihasilkan adalah sebesar 731,92 N dengan arah menuju ke titik tumpu.

4.1.3 Pegas Daun

Berdasarkan persamaan 3.10 dan 3.11 didapatkan beban total dan gaya yang menumpu pada rangka seperti pada Gambar 12 berikut.



Gambar 12. Diagram Benda Bebas Pegas Daun

Adapun hasil perhitungan gaya total yang mampu ditahan oleh sistem suspensi pada persamaan 3.3 dinyatakan aman karena gaya total redaman yang mampu ditahan oleh kombinasi pegas daun dan *shock absorber* mencapai 12.480 N. Sedangkan perhitungan defleksi berdasarkan persamaan 3.4 menunjukkan hasil sebesar 2,68 mm, dimana hasil persamaan tersebut adalah nilai defleksi maksimum pada keseluruhan badan per daun.

4.2 Meshing

4.2.1 Rangka

Hasil *grid independence test* yang didapatkan dari hasil *meshing* rangka ditunjukkan oleh Tabel 5. *Meshing* yang digunakan adalah *meshing* dengan ukuran elemen 7mm dengan jumlah elemen sebanyak 93220.

Tabel 5. *Grid Independence Test* pada Rangka

Elements	Deformation (mm)
57573	0,0907
70091	0,0896
80941	0,0893
93220	0,0896
122255	0,0896
167963	0,0896

4.2.2 Dudukan Tabung

Hasil *grid independence test* yang didapatkan dari hasil *meshing* dudukan tabung ditunjukkan oleh Tabel 6 dan 7. *Meshing* yang digunakan pada dudukan tabung depan adalah *meshing* dengan ukuran elemen 7mm dengan jumlah elemen sebanyak 99871. Sedangkan *meshing* yang digunakan pada dudukan tabung belakang adalah *meshing* dengan ukuran elemen 7mm dengan jumlah elemen sebanyak 73846.

Tabel 6. *Grid Independence Test* pada Dudukan Tabung Depan

Elements	Deformation (mm)
46918	1,19

59845	1,21
77943	1,23
99871	1,24
106244	1,24
147866	1,24

Tabel 7. *Grid Independence Test* pada Dudukan Tabung Belakang

<i>Elements</i>	<i>Deformation (mm)</i>
35136	0,548
44373	0,558
56735	0,572
73846	0,579
104761	0,589
147506	0,59
234026	0,597

4.2.3 Pegas Daun

Hasil *grid independence test* yang didapatkan dari hasil *meshing* dudukan tabung ditunjukkan oleh Tabel 8. Meshing yang digunakan adalah meshing dengan ukuran elemen 7mm dengan jumlah elemen sebanyak 34058

Tabel 8. *Grid Independence Test* pada Dudukan Tabung Belakang

<i>Elements</i>	<i>Deformation (mm)</i>
5415	2,13
7249	2,12
8788	2,12
13860	3,11
20606	2,13
33339	2,12
52355	2,11

4.3 Hasil Simulasi Beban pada Benda Kerja

4.3.1 Total Deformation

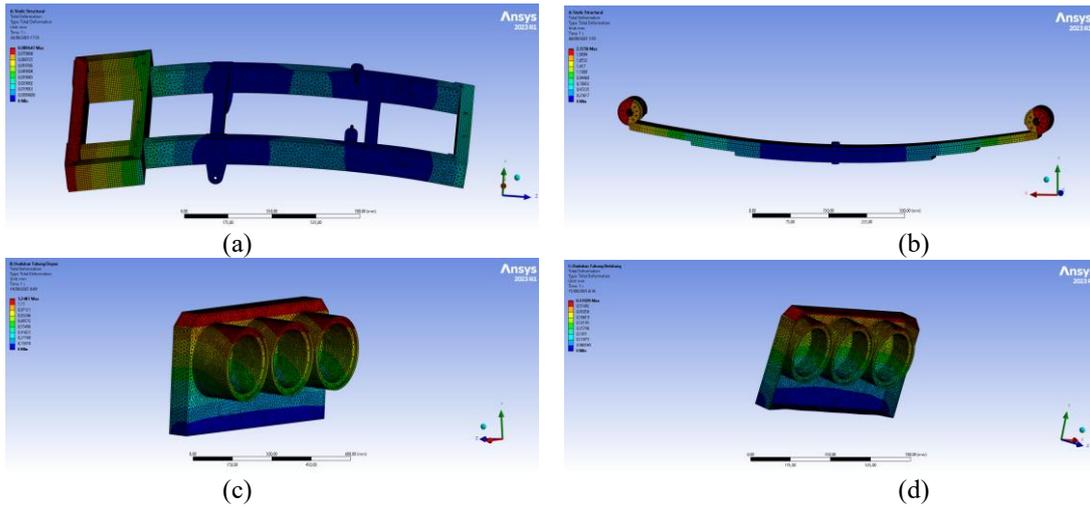
Nilai deformasi akan semakin besar terjadi pada daerah yang mendapat pembebanan yang besar dan lokasinya jauh dari titik tumpuan. Pada bagian rangka, terdapat nilai deformasi maksimal sebesar 0,0896 mm di bagian depan rangka. Kemudian pada bagian dudukan tabung, nilai deformasi maksimal sebesar 1,24 mm di bagian atas dudukan tabung depan dan nilai deformasi maksimal sebesar 0,579 mm di bagian atas tabung belakang. Sedangkan pada bagian pegas daun, nilai deformasi maksimal terletak pada tiap ujung pegas sebesar 2,12 mm. Nilai deformasi total pada tiap bagian ditunjukkan oleh Gambar 13.

4.3.2 Equivalent Stress (Von-Mises)

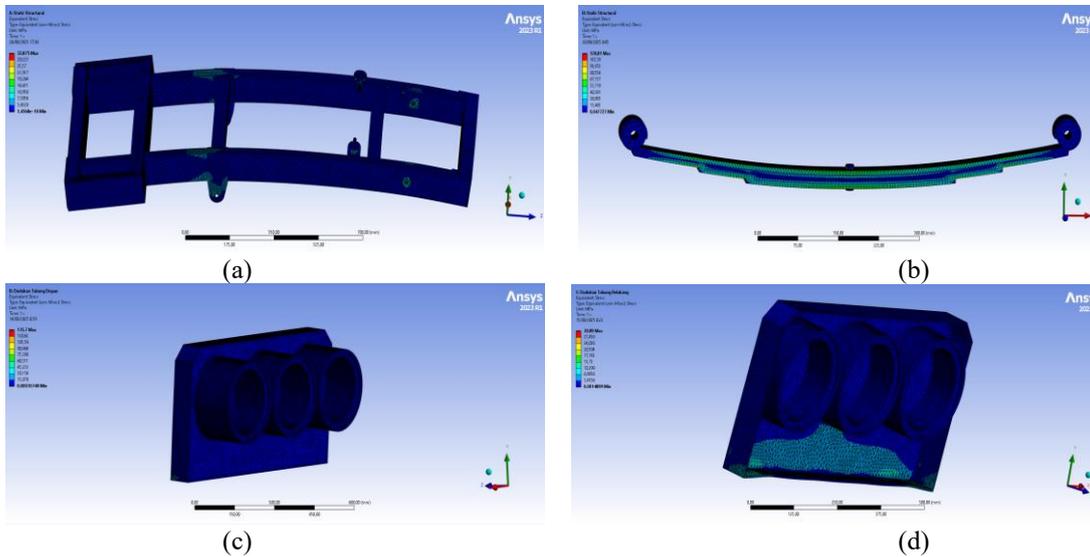
Pada bagian rangka, tegangan *von-mises* maksimum yang didapatkan adalah sebesar 32,879 MPa, sedangkan tegangan *yield*-nya 294,74 MPa. Pada bagian dudukan tabung depan dan belakang, masing-masing menghasilkan tegangan *von-mises* maksimum yang didapatkan adalah sebesar 135,7 MPa dan 30,89 MPa, sedangkan tegangan *yield*-nya sebesar 294,74 MPa dan 294,74 MPa. Kemudian pada bagian pegas daun, tegangan *von-mises* maksimum yang didapatkan adalah sebesar 120,81 MPa, sedangkan tegangan *yield*-nya 275 MPa. Hasil simulasi pada model 3D untuk pengukuran ini ditunjukkan pada Gambar 14.

4.3.3 Faktor Keamanan (Safety Factor)

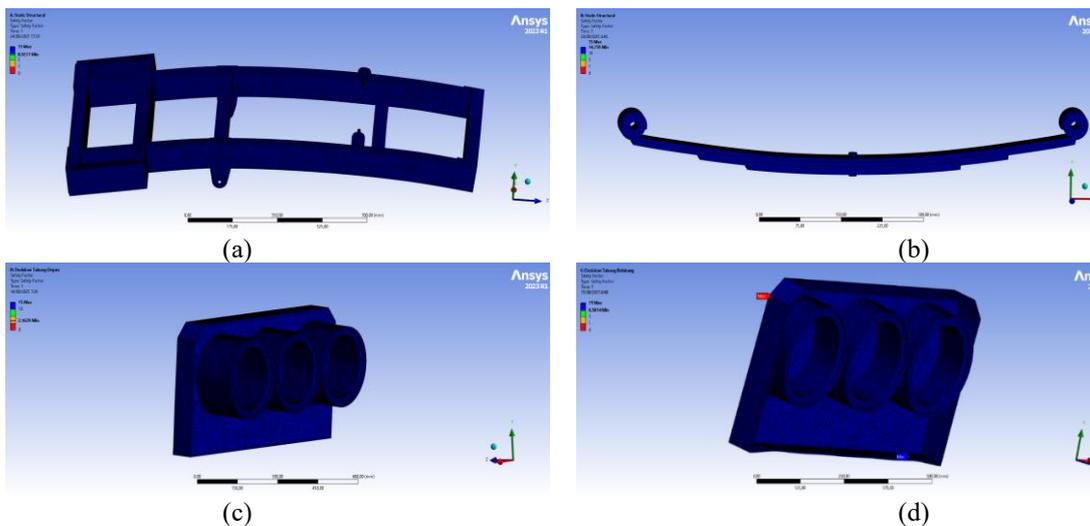
Pada bagian rangka, hasil faktor keamanan terendah yang didapatkan pada simulasi ini adalah 9,08. kemudian pada bagian dudukan tabung depan dan belakang, masing-masing menunjukkan hasil terendahnya yaitu 2,16 dan 2,27. Sedangkan pada bagian pegas daun, didapkn nilai terendah 2,27. Setiap bagian pengujian menghasilkan nilai maksimal sebesar 15. Hasil simulasi pada model 3D untuk pengukuran ini ditunjukkan pada Gambar 15.



Gambar 13. *Total Deformation* yang Terjadi pada (a) Rangka; (b) Pegas Daun; (c) Dudukan Tabung Depan; (d) Dudukan Tabung Belakang



Gambar 14. *Von-Mises* yang Terjadi pada (a) Rangka; (b) Pegas Daun; (c) Dudukan Tabung Depan; (d) Dudukan Tabung Belakang



Gambar 15. *Safety Factor* yang Dimiliki bagian (a) Rangka; (b) Pegas Daun; (c) Dudukan Tabung Depan; (d) Dudukan Tabung Belakang

4.3.4 Verifikasi Defleksi Hasil Simulasi Pegas Daun

Berdasarkan persamaan 3.5, didapatkan hasil persentase kesalahan sebesar 26,4% dengan $\delta Teori$ sebesar 2,68mm dan δFEA sebesar 2,12mm. Selisih ini disebabkan oleh adanya perbedaan asumsi antara model analitik dan simulasi. Perhitungan analitik didasarkan pada asumsi ideal, yaitu material homogen linier, tumpuan sempurna, dan distribusi beban merata tanpa memperhitungkan pengaruh kontak antar daun maupun kondisi geometri yang kompleks. Sebaliknya, simulasi FEA mampu memodelkan kondisi yang lebih mendekati keadaan nyata, termasuk pengaruh boundary condition dan sifat geometrik tiga dimensi.

5. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis, desain rangka anhang untuk tangki hidrogen menggunakan baja karbon rendah dengan profil *hollow* dinilai aman dan efisien. Simulasi menunjukkan bahwa tegangan maksimum yang terjadi hanya 132,45 MPa, jauh di bawah *yield strength* material sebesar 275 MPa, menghasilkan faktor keamanan 2,07 yang memenuhi kriteria. Analisis juga menemukan deformasi maksimum sebesar 2,12 mm saat dibebani secara statis, yang konsisten dengan perhitungan teoritis dan berada dalam batas aman. Meskipun desain ini kuat, implementasi di lapangan menghadapi tantangan dari beban dinamis dan kelelahan material. Oleh karena itu, diperlukan strategi tambahan seperti penggunaan suspensi ganda dan inspeksi berkala untuk memastikan keandalan dan keamanan sistem di dunia nyata.

6. Daftar Pustaka

- [1] W. Liu, H. Zuo, J. Wang, Q. Xue, B. Ren, and F. Yang, "The production and application of hydrogen in steel industry," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 46, no. 17, pp. 10548–10569, Mar. 2021, doi: 10.1016/j.ijhydene.2020.12.123.
- [2] S. Senthil Kumar, C. Bibin, and M. Ramachandran, "Design and Analysis of Hydrogen Storage Tank with Different Materials by Ansys," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 810, no. 1, p. 012016, Mar. 2020, doi: 10.1088/1757-899X/810/1/012016.
- [3] R. Yang, W. Zhang, S. Li, M. Xu, W. Huang, and Z. Qin, "Finite Element Analysis and Optimization of Hydrogen Fuel Cell City Bus Body Frame Structure," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 19, p. 10964, Oct. 2023, doi: 10.3390/app131910964.
- [4] J. S. Santhappan, S. Bora, A. S. Gopinath, L. R. Kalabarige, and T. Mathimani, "Optimization and deep learning methods for the techno-economic analysis of hydrogen generation from solar, wind, and municipal biowaste to partially replace natural gas in a 10 MW gas power plant in Oman," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 152, p. 150224, Jul. 2025, doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.150224.
- [5] M. Resha, J. Hendrarsakti, B. J. T. B. Kapal, T. P. N. S. F., J. Kimia, and E. Java, "Desain Sistem Hidrogen Hijau Dengan Sumber Listrik dari Pembangkit Listrik Tenaga Surya di Lombok," vol. 26, no. 4, 2024.
- [6] A. Aslam, N. Ahmed, S. A. Qureshi, M. Assadi, and N. Ahmed, "Advances in Solar PV Systems; A Comprehensive Review of PV Performance, Influencing Factors, and Mitigation Techniques," *Energies*, vol. 15, no. 20, p. 7595, Oct. 2022, doi: 10.3390/en15207595.
- [7] I. A. Richardson *et al.*, "Low-cost, transportable hydrogen fueling station for early market adoption of fuel cell electric vehicles," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 25, pp. 8122–8127, Jul. 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.04.066.
- [8] A. Baroutaji, T. Wilberforce, M. Ramadan, and A. G. Olabi, "Comprehensive investigation on hydrogen and fuel cell technology in the aviation and aerospace sectors," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 106, pp. 31–40, May 2019, doi: 10.1016/j.rser.2019.02.022.
- [9] S. MEDVECKÁ-BEŇOVÁ, "STRENGTH ANALYSIS OF THE FRAME OF A TRAILER," *Sci. J. Silesian Univ. Technol. Ser. Transp.*, vol. 96, pp. 105–113, Sep. 2017, doi: 10.20858/sjsutst.2017.96.10.
- [10] I. A. Majid, F. B. Laksono, H. Suryanto, and A. R. Prabowo, "Structural Assessment of Ladder Frame Chassis using FE Analysis: A Designed Construction referring to Ford AC Cobra," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 33, pp. 35–42, 2021, doi: 10.1016/j.prostr.2021.10.006.
- [11] A. Agarwal and L. Mthembu, "FE design analysis and optimization of heavy-duty truck chassis using sparse grid initialization technique," *Mater. Today Proc.*, vol. 60, pp. 2084–2092, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2022.01.471.
- [12] I. D. Erhunmwun and U. B. Ikponmwo, "Review on finite element method," *J. Appl. Sci. Environ. Manag.*, vol. 21, no. 5, p. 999, Nov. 2017, doi: 10.4314/jasem.v21i5.30.
- [13] H. Patil and P. V. Jeyakarthikeyan, "Mesh convergence study and estimation of discretization error of hub in clutch disc with integration of ANSYS," *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 402, p. 012065, Oct. 2018, doi: 10.1088/1757-899X/402/1/012065.
- [14] S. Suryady and A. D. Sapto, "Analisis Pembebanan Statis terhadap Rangka Mesin Alat Pengaduk untuk Adonan Donat menggunakan Software FEA," *J. Tek. Mesin*, vol. 13, no. 1, p. 22, 2024.
- [15] A. D. Mustaqiem and Nurato, *Analisis Perbandingan Faktor Keamanan Rangka Scooter Menggunakan Perangkat Lunak Solidwork*. 2015.