

## ANALISIS KASUS PROSES PENGISIAN TANGKI HIDROGEN TERHADAP STRUKTUR TANGKI HIDROGEN TIPE I DENGAN METODE *FLUID STRUCTURE INTERACTION*

\*Muhammad Fatih Naufal<sup>1</sup>, Muchammad<sup>2</sup>, Budi Setiyana<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: fatihnaufal@students.undip.ac.id

### Abstrak

Hidrogen merupakan bahan bakar yang banyak dikembangkan, karena merupakan bahan bakar yang ramah lingkungan dan berpotensi menggantikan bahan bakar fosil. Penyimpanan hidrogen menjadi hal penting utamanya dari aspek keamanan. Tangki penyimpanan hidrogen tipe I umum digunakan. Pada penelitian ini akan menganalisis tangki penyimpanan hidrogen tipe I dengan tekanan 700 bar yang memiliki variasi material yaitu AISI 4340, ASME SA 372, dan stainless steel A 286. Serta memiliki variasi temperature masuk yaitu 293 K, 273 K, dan 253 K. Metode yang digunakan pada penelitian ini adalah *one-way fluid structure interaction* menggunakan ANSYS 2020 R2. Tujuan penelitian ini untuk mengetahui waktu pengisian tangki hidrogen, temperature akhir tangki dan gas hidrogen, von-mises stress yang terjadi akibat proses pengisian, serta safety factor untuk mengetahui keamanan tangki. Didapatkan waktu pengisian tercepat dialami oleh AISI 4340, serta paling lambat pada material ASME SA 372. Temperature akhir tangki paling tinggi dialami oleh AISI 4340 dan paling rendah dialami stainless steel A286. Kemudian temperature akhir hidrogen paling tinggi dialami AISI 4340, serta paling rendah ASME SA 372. Didapatkan *von mises stress* tertinggi dialami oleh AISI 4340, serta dari seluruh variasi material tangki dan temperature masuk tidak ada yang dinyatakan aman karena di bawah ambang batas *safety factor*.

**Kata Kunci:** deformasi; *one-way fsi*; *stress*; tangki hidrogen; temperatur

### Abstract

*Hydrogen is a widely developed fuel, as it is environmentally friendly and has the potential to replace fossil fuels. Hydrogen storage is important mainly from a safety aspect. Type I hydrogen storage tanks are commonly used. This study will analyze a type I hydrogen storage tank with a pressure of 700 bar which has a variety of materials namely AISI 4340, ASME SA 372, and stainless steel A 286. As well as having a variety of inlet temperatures, namely 293 K, 273 K, and 253 K. The method used in this research is one-way fluid structure interaction using ANSYS 2020 R2. The purpose of this study is to determine the filling time of the hydrogen tank, the final temperature of the tank and hydrogen gas, the von-mises stress that occurs due to the filling process, and the safety factor to determine the safety of the tank. It was found that the fastest filling time was experienced by AISI 4340, as well as the slowest in ASME SA 372 material. The highest final tank temperature is experienced by AISI 4340 and the lowest is experienced by A 286 stainless steel. Then the highest final temperature of hydrogen is experienced by AISI 4340, and the lowest is ASME SA 372. The highest von mises stress is experienced by AISI 4340, and from all variations of tank material and inlet temperature none are declared safe because they are below the safety factor threshold.*

**Keywords:** deformation; hydrogen tank; *one-way fsi*; *stress*; temperature

### 1. Pendahuluan

Hidrogen merupakan bahan bakar yang banyak mendapatkan perhatian untuk dikembangkan, karena merupakan bahan bakar yang ramah lingkungan dan berpotensi menggantikan bahan bakar fosil [1]. Hidrogen memiliki densitas energi volumetrik rendah, sehingga membutuhkan penyimpanan tangki dengan ketahanan tekanan atau isolasi termal yang tinggi [2]. Tangki tipe I merupakan salah satu tangki penyimpanan hidrogen yang umum digunakan berbahan *full metal*. Keamanan merupakan faktor penting dalam perancangan tangki hidrogen. Temperature merupakan aspek utama dalam perancangan tangki dimana temperature hidrogen dalam tangki harus berada antara -40 °C (233.15 K) hingga 85 °C (358.15 K) menurut standar J2601. Pada proses pengisian cepat tangki hidrogen temperature masuk menjadi pertimbangan utama, karena peningkatan tekanan hidrogen berpengaruh pada temperatur akhir sehingga perlu dilakukan kontrol agar tidak melebihi ambang batas aman [3]. Pada proses pengisian tangki hidrogen terdapat fenomena perubahan energi dalam sistem. Segala proses pada sistem tertutup, jika terdapat peningkatan maupun penurunan energi dalam sistem sejumlah energi yang dipindahkan melewati *boundary* atas asas kesetimbangan energi [4]. Hal ini perlu diperhatikan karena tekanan hidrogen bisa mencapai tekanan 700 bar. Selain itu dalam fokus aspek keselamatan dan keamanan tangki

hidrogen, kekuatan struktur tangki terhadap tekanan tinggi dan distribusi temperatur menjadi fokus utama dalam perancangan tangki.

Pada analisa desain *pressure vessel* fenomena *total deformation* dan *stress* menjadi hal yang penting untuk dianalisis karena berkaitan dengan kekuatan dan keamanan struktur tangki. *Von-mises stress* mengukur tingkat tegangan keseluruhan pada material dan menentukan apakah material akan luluh di bawah tekanan yang diberikan [5]. Untuk memodelkan kasus tersebut, pada penelitian ini menggunakan metode *one-way fluid structure interaction* (FSI) dengan menghubungkan hasil simulasi menggunakan *computational fluid dynamics* (CFD) sebagai *input* untuk simulasi menggunakan *finite element analysis* (FEA) [2]. CFD digunakan untuk menyelesaikan kasus pengisian tangki hidrogen dapat menyelesaikan persamaan diferensial parsial tertentu yang tidak dapat dipecahkan secara analitis untuk menyelesaikan suatu persamaan aliran fluida. FEA merupakan metode numerik yang digunakan untuk menganalisis masalah terkait struktural dan termal selama proses perancangan dalam hal ini perancangan tangki penyimpanan hidrogen tipe I [6]. Penelitian ini menyajikan pendekatan baru dalam mengevaluasi desain struktur tangki hidrogen tipe I melalui analisa temperatur akhir gas hidrogen dan temperatur tangki menggunakan CFD, dan analisa kekuatan struktur tangki melalui perhitungan *von-mises stress*, *total deformation*, dan *safety factor* menggunakan metode FEA. Analisis keamanan struktur tangki hidrogen ditentukan berdasarkan *safety factor* dimana *safety factor* untuk *pressure vessel* minimal 3.5 untuk memastikan kekuatan tangki hidrogen [7].

## 2. Bahan dan Metode Penelitian

Penelitian ini berfokus untuk menganalisa proses pengisian tangki hidrogen khususnya terkait fenomena perpindahan panas antara gas hidrogen, tangki, dan lingkungan menggunakan metode CFD dengan *software* ANSYS Fluent 2020 R2. Kemudian hasil akhir temperature dan distribusi tekanan dalam tangki digunakan sebagai *input* untuk mendapatkan nilai *von-mises stress*, *total deformation*, dan *safety factor* tangki menggunakan metode FEA dengan *software* ANSYS Static Structural 2020 R2 dengan mekanisme *one-way* FSI.

Baja paduan karbon umum digunakan sebagai material tangki tipe I penyimpanan hidrogen. ASME SA-372 menjadi salah satu material yang umum digunakan untuk *pressure vessel* tekanan tinggi hingga 100 MPa karena *yield strength* dan *ultimate tensile strength* yang relatif tinggi [8]. Adapun sifat-sifat material ASME SA 372 terdapat pada tabel 1 berikut.

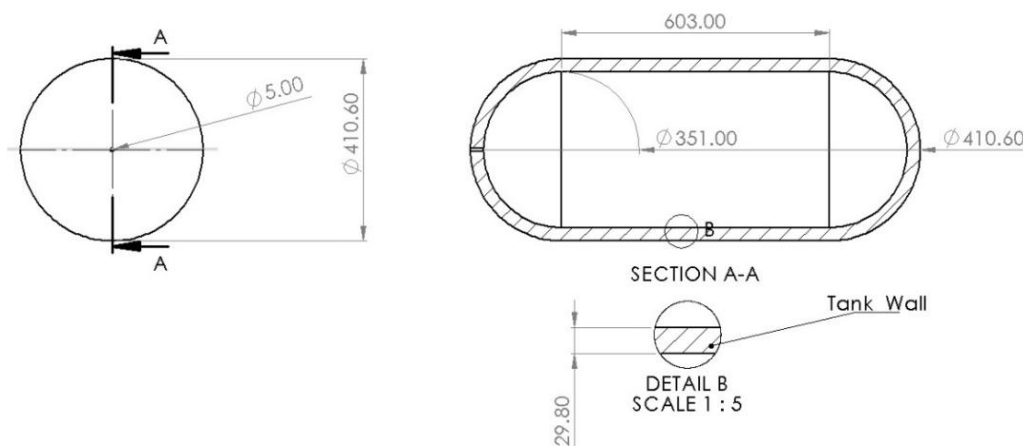
**Tabel 1.** *mechanical properties of ASME SA-372* [9]

Density	Specific Heat	Thermal Conductivity	Yield Strength	Ultimate Tensile Strength	Modulus Young
7750 kg/m <sup>3</sup>	470 J/kg.K	44 W/m.K	620 MPa	925 MPa	202 GPa

Geometri pada penelitian ini ditentukan berdasarkan persamaan 2.1 berikut [10]. Adapun diameter dalam tangki adalah 351 mm dan panjang tangki adalah 603 mm [2].

$$t_{wall} = \max\left(\frac{1.5PR}{\sigma_y}, \frac{2.25PR}{\sigma_u}\right) \quad (2.1)$$

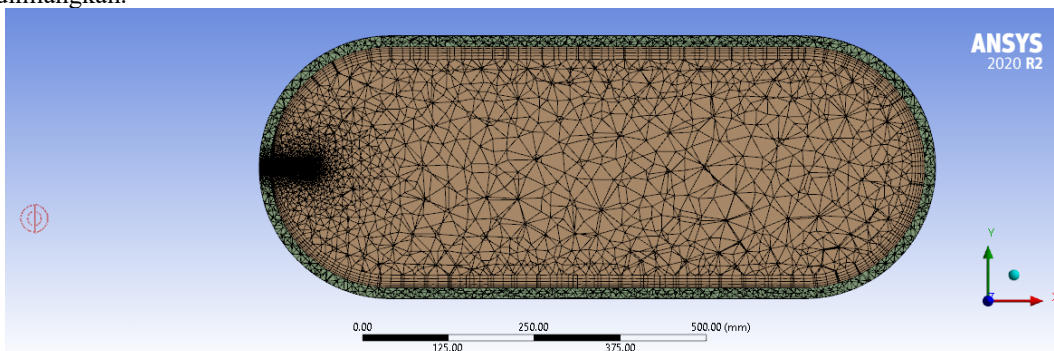
Pada persamaan tersebut  $t_{wall}$  mewakili tebal dinding tangki,  $P$  mewakili tekanan kerja tangki,  $R$  mewakili diameter dalam tangki  $\sigma_y$  mewakili *yield strength material*, dan  $\sigma_u$  mewakili *ultimate tensile strength material* tangki. Adapun geometri tangki terdapat pada gambar 1 berikut.



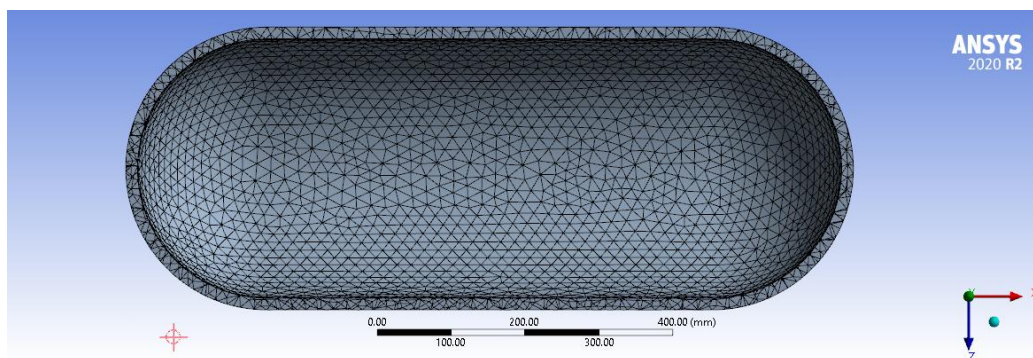
**Gambar 1.** Model geometri tangki hidrogen

Berdasarkan perhitungan dari persamaan 2.1 berdasarkan nilai *yield strength* dan *ultimate tensile strength* material dari tabel 1 didapatkan tebal tangki sebesar 29,8 mm dan diameter luar sebesar 410,6 mm.

Proses *meshing* merupakan bagian penting dalam proses simulasi numerik dengan tujuan membagi model geometri menjadi bagian-bagian yang lebih kecil agar dapat memodelkan fenomena yang terjadi seefisien mungkin. Pada tangki tipe I yang menggunakan material *full metal*. Pada struktur tangki *pressure vessel* dengan material *full metal* umum terjadi fenomena *hydrogen embrittlement* yaitu penurunan kekuatan tangki karena degradasi sifat material dibawah tekanan tinggi [11]. Oleh karena itu hasil *grid* yang baik dari proses *meshing* diperlukan untuk dapat memodelkan fenomena yang ada. Adapun *grid* yang baik memiliki *maximum skewness* <0,85 dan *minimum orthogonal quality* >0,15. Pada penelitian ini terdapat dua proses *meshing* masing-masing untuk simulasi CFD dan simulasi FEA, dimana letak perbedaannya adalah dalam pemodelan FEA mengabaikan geometri hidrogen sehingga saat proses *meshing* geometri hidrogen dihilangkan.



Gambar 2. hasil *meshing* CFD



Gambar 3. hasil *meshing* FEA

Adapun hasil dari proses *meshing* untuk simulasi numerik CFD dan FEA dinyatakan pada tabel 2 berikut.

Tabel 2. *set up* dan hasil proses *meshing*

<i>Element size</i>	20 mm
<i>Maximum of skewness quality</i> CFD	0,84
<i>Maximum of skewness quality</i> FEA	0,63
<i>Minimum of orthoggonal quality</i> CFD	0,15
<i>Minimum of orthoggonal quality</i> FEA	0,37
Jumlah <i>element grid</i> CFD	969592
Jumlah <i>element grid</i> FEA	341859

Pada hasil *meshing* dari tabel 2 sudah menunjukkan kualitas yang baik berdasarkan nilai *minimum orthogonal quality* dan *maximum skewness* dengan metode *tetrahedrons* untuk semua proses *meshing* dan *inflation* pada proses *meshing* CFD.

Dalam simulasi numerik CFD dan FEA melalui metode *one-way* FSI, penetapan kondisi operasi dan kondisi batas menjadi hal yang penting untuk dapat mereplikasi fenomena aktual dan mendapatkan hasil yang akurat. Simulasi CFD dilakukan secara 3d. Adapun kondisi operasi dan kondisi operasi simulasi numerik CFD terdapat pada tabel 3 dan tabel 4 berikut.

**Tabel 3.** Kondisi operasi simulasi CFD

<i>Analysis type</i>	<i>Transient</i>
<i>Solver</i>	<i>Pressure based</i>
Material	ASME SA 372
Temperature Lingkungan	293 K
Tekanan Lingkungan	101325 Pa
<i>Initial Hydrogen Temperature</i>	293 K
<i>Initial Hydrogen Pressure</i>	20 MPa
<i>Turbulence Model</i>	<i>Standard K-Epsilon</i>
Perilaku gas	Redlich-Kwong <i>real gas</i>

Berdasarkan tabel 3 pada simulasi numerik CFD untuk memodelkan proses pengisian tangki hidrogen menggunakan model *real gas* redlich-kwong, serta selama proses pengisian tangki hidrogen gaya gravitasi dapat diabaikan karena laju aliran massa lebih dari 9 g/s [12,13].

**Tabel 4.** Kondisi batas simulasi CFD

<i>Inlet</i>	0,03 kg/s
<i>Convective Coefficient Udara</i>	6 W/m <sup>2</sup> K
<i>Wall</i>	<i>Stationary; no slip wall</i>

Kondisi operasi dan kondisi batas simulasi CFD didapatkan dari penelitian yang dilakukan oleh Jianye Zhang, dkk (2025) [2]. Untuk simulasi FEA dilakukan pula permodelan untuk mengetahui reaksi struktur terhadap proses pengisian tangki hidrogen. Adapun kondisi operasi dan kondisi batas simulasi FEA ditunjukkan pada tabel 5 dan tabel 6 berikut.

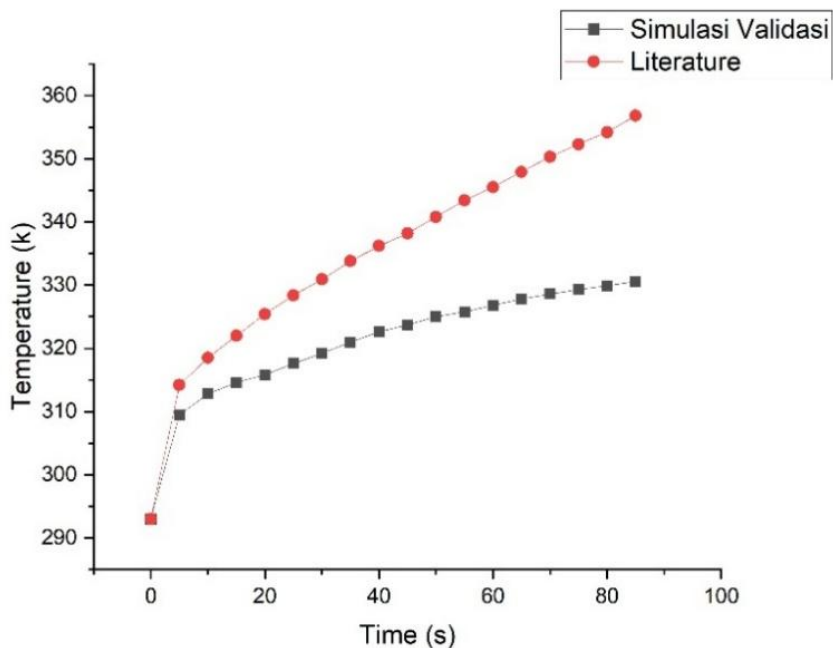
**Tabel 5.** Kondisi operasi simulasi FEA

<i>Analysis type</i>	<i>Static 3D</i>
Material	ASME SA 372
Temperature Lingkungan	293 K
Tekanan Lingkungan	101325 Pa

**Tabel 6.** Kondisi batas simulasi FEA

<i>Standard Earth Gravity</i>	9,81 m/s <sup>2</sup> (z+ direction)
<i>Fixed Support</i>	Sisi <i>inlet</i> , dan bawah tangki

Pada penelitian ini dilakukan validasi berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Jianye Zhang, dkk (2025) untuk memferivikasi keakuratan dari metode yang digunakan untuk kasus pengisian tangki hidrogen [2]. Validasi metode dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dari parameter temperature hidrogen terhadap waktu. Adapun hasil validasi metode ditunjukkan pada gambar 4.



**Gambar 4.** Hasil validasi

Pada gambar 4 hasil simulasi validasi menunjukkan rata-rata temperature akhir hidrogen adalah 330,6 K sedangkan hasil penelitian Jianye Zhang, dkk (2025) menunjukkan temperature akhir hidrogen adalah 356,8 K dengan *margin error* sebesar 7,34 %. Hal ini menunjukkan validasi metode berhasil karena *margin error* dibawah 10 %.

### 3. Hasil dan Pembahasan

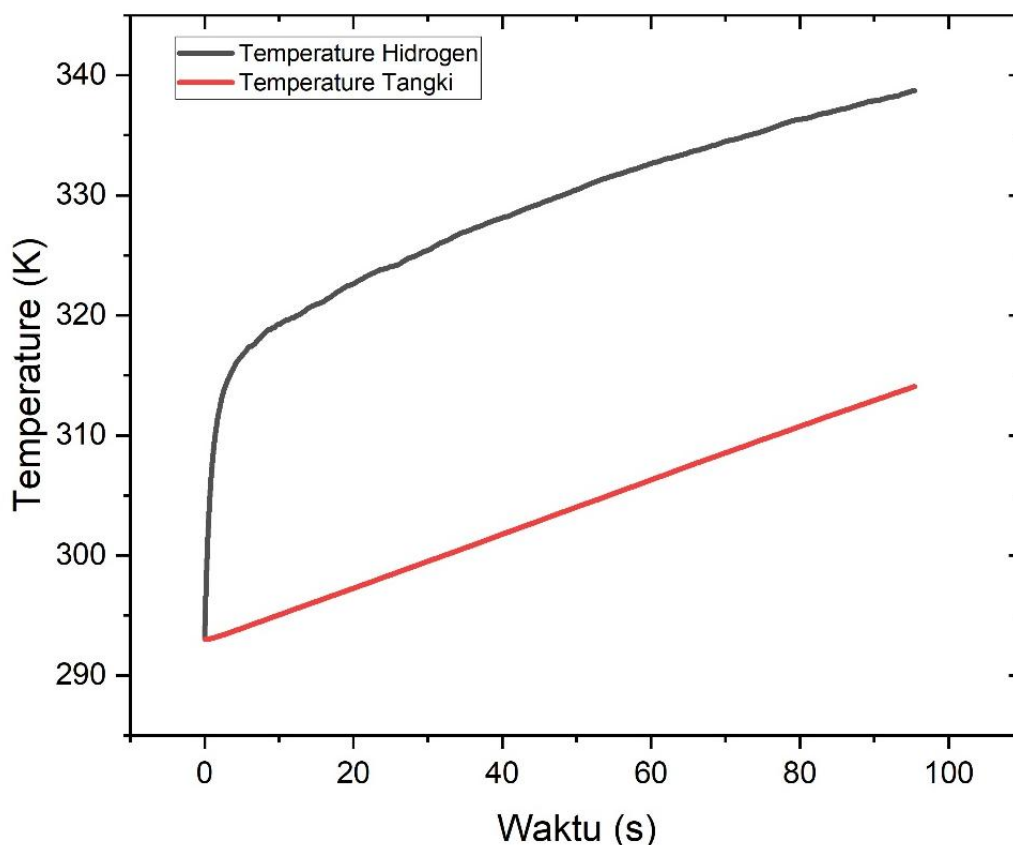
#### 3.1 Hasil Simulasi Pengisian Tangki Hidrogen

Proses pengisian tangki hidrogen dimodelkan dan disimulasikan dengan metode CFD dengan ANSYS Fluent 2020 R2. Metode ini digunakan untuk mengetahui temperature akhir gas hidrogen, temperature akhir tangki hidrogen, dan *contour* selama proses pengisian. Penelitian terdahulu menunjukkan semakin kecil temperature *inlet* maka semakin kecil pula temperature akhir gas hidrogen, sehingga temperature *inlet* sebagai kontrol untuk temperature akhir selama pengisian hidrogen [2,14]. Pada penelitian ini juga akan menentukan hubungan antara material tangki tipe I hidrogen dengan temperature tangki dan temperature akhir hidrogen yang belum dibahas oleh penelitian terdahulu. Adapun hasil akhir dari proses pengisian tangki hidrogen ditunjukkan oleh tabel 7.

**Tabel 7.** Hasil akhir simulasi pengisian tangki hidrogen

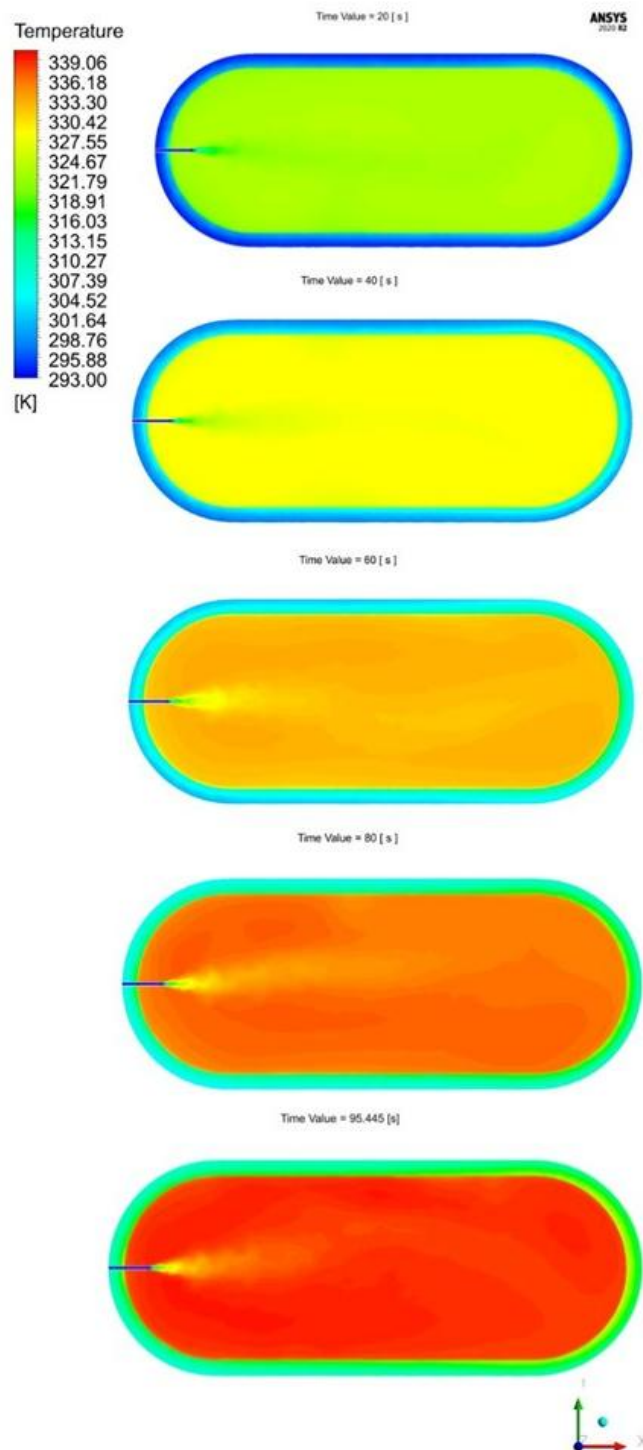
<i>Hydrogen average temperature</i>	<i>Tank temperature</i>	Waktu pengisian
338.72 K	314.07 K	95.445 s

Berdasarkan tabel 3.1 temperature akhir gas hidrogen masih dinyatakan aman karena dibawah 85 °C (358.15 K) sesuai standar J2601. Proses pengisian tangki hidrogen menyebabkan temperature tangki maupun tangki hidrogen meningkat sepanjang waktu pengisian. Fenomena ini ditunjukkan oleh gambar 5 dan gambar 6.



**Gambar 5.** Grafik Temperature Pengisian Tangki Hidrogen

Berdasarkan gambar 5 temperature tangki hidrogen naik secara linier hingga temperature akhir tangki hidrogen sebesar 314,07 K. Sedangkan temperature hidrogen mengalami peningkatan drastis pada 0-0,7 s lalu relatif konstan setelahnya karena terjadi efek kompresi adiabatik dimana panas yang masuk tidak sempat keluar lingkungan pada awal proses pengisian.



**Gambar 6.** *Contur* temperature pengisian tangki hidrogen

Berdasarkan gambar 6 *contuir* warna temperature tangki dan gas hidrogen berubah hijau menuju merah yang menunjukkan peningkatan temperature hidrogen tiap waktunya.

### 3.3 Hasil Simulasi Struktur Tangki Hidrogen

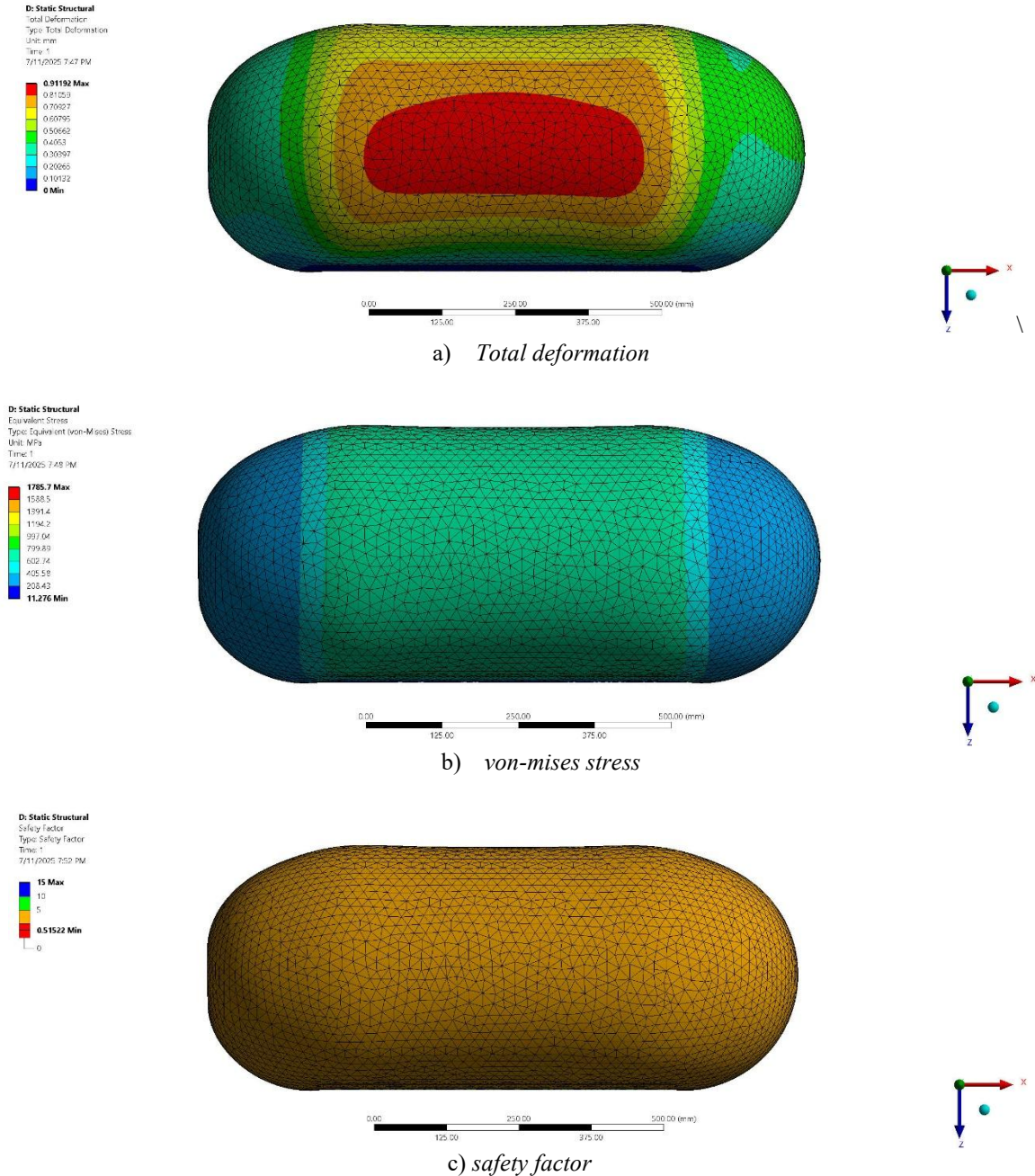
Pada penelitian ini simulasi struktur tangki hidrogen dilakukan menggunakan metode FEA melalui mekanisme *one-way* FSI dengan mendefinisikan temperature akhir tangki dan distribusi tekanan pada tangki hidrogen sebagai input.

Belum ada penelitian terkait pengaruh proses pengisian tangki hidrogen terhadap struktur tangki penyimpanan hidrogen tipe I. Adapun hasil simulasi FEA struktur tangki hidrogen dapat dilihat pada gambar 7 dan tabel 8.

**Tabel 8.** Hasil simulasi struktur tangki

<i>Total deformation</i>	<i>Von-mises stress</i>	<i>Safety factor</i>
0.912 mm	1785.7 MPa	0.515

Berdasarkan tabel 8 didapatkan bahwa tangki hidrogen pada penelitian ini dikatakan tidak aman karena memiliki nilai *safety factor* dibawah 3.5.



**Gambar 7.** Hasil simulasi struktur tangki

Berdasarkan gambar 7 diketahui bahwa *total deformation* pada tangki terjadi pada bagian samping tangki dan *von-mises stress* terbesar pada sekeliling tangki karena besarnya efek dari *hoop stress*.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian pengaruh pengisian tangki hidrogen terhadap struktur tangki hidrogen yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan sebagai berikut.

1. Material tangki hidrogen ASME SA 372 secara temperature akhir dapat dinyatakan aman karena temperature akhir hidrogen berada dibawah batas aman menurut standar J2601 yaitu pada rentang antara  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  (233.15 K) hingga  $85\text{ }^{\circ}\text{C}$  (358.15 K).
2. Struktur tangki hidrogen dengan material ASME SA 372 dan tekanan kerja 700 bar dinyatakan tidak aman untuk penyimpanan tangki hidrogen karena memiliki nilai *safety factor* 0.515 dibawah angka minimal yaitu 3.5.

#### 4. Daftar Pustaka

- [1] Choirul S, Rachmadi S, Bima RPDP. Pemanfaatan energi matahari sebagai sumber energi alternatif pada proses produksi hidrogen pada hidrofyll. Jurnal Bumigora Information Technology (BITe) 2020;2:1–6.
- [2] Zhang J, Jin Y, Zhou M, Zhai K, Li Y. Numerical analysis of temperature rise and drop during hydrogen filling and emptying in a 70 MPa hydrogen storage cylinder. Int J Hydrogen Energy 2025;126:185–99. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2025.04.115>.
- [3] Xiao J, Wang X, Bénard P, Chahine R. Determining hydrogen pre-cooling temperature from refueling parameters. Int J Hydrogen Energy 2016;41:16316–21. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.06.084>.
- [4] Moran MJ, Shapiro HN, Boettner DD, Bailey MB. Fundamentals of Engineering Thermodynamics. eighth. New York: John Wiley & Sons.; 2014.
- [5] Kurowski PM. Finite element analysis for design engineers. SAE International; 2022.
- [6] Zulkeflee AF, Yunos SNMM. Design and Analysis of Hydrogen Storage Tank for Small Aircraft. Journal of Advances in Fluid, Heat, and Materials Engineering 2024;3:33–41.
- [7] Ugochukwu CU, Odunfa OOOKM. Finite Element Analysis of Displacement and Von-Mises Stress in Cylindrical Liquefied Petroleum Gas Pressure Tank. Covenant Journal of Engineering Technology (Special Edition) 2018.
- [8] Yin R, Fu R, Gu N, Liu Y. A study of hydrogen embrittlement of SA-372 J class high pressure hydrogen storage seamless cylinder ( $\geq 100$  MPA). Materials 2022;15:7714.
- [9] ASME. 2010 ASME Boiler and Pressure Vessel Code A N I N T E R N A T I O N A L C O D E II Part D Properties (Metric). 2010.
- [10] Klymyshyn NA, Brooks K, Barrett N. Methods for estimating hydrogen fuel tank characteristics. J Press Vessel Technol 2024;146.
- [11] Lee JA. Hydrogen Embrittlement. 2016.
- [12] Li Q, Zhou J, Chang Q, Xing W. Effects of geometry and inconstant mass flow rate on temperatures within a pressurized hydrogen cylinder during refueling. Int J Hydrogen Energy 2012;37:6043–52. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.12.020>.
- [13] Zhao L, Liu Y, Yang J, Zhao Y, Zheng J, Bie H, et al. Numerical simulation of temperature rise within hydrogen vehicle cylinder during refueling. Int J Hydrogen Energy 2010;35:8092–100. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2010.01.027>.
- [14] Kuroki T, Kreutzer C, Leighton D, Martin J, Mohr J, Peters M, et al. Temperature Rise on Liner Surfaces of Fuel Cell Electric Vehicle Tanks during Fueling Process. Energy Technology 2023;11:2300239. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ente.202300239>.