

**ANALISIS SIMULASI KAPASITAS *HYDROGEN STORAGE*
TANK DALAM PROSES PENGISIAN *HYDROGEN* PADA
MOBIL JTM**

Skripsi



Disusun Oleh:

Gega Azzrafitrullah Esfafate

3331200056

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON-BANTEN
2024**

**ANALISIS SIMULASI KAPASITAS *HYDROGEN STORAGE*
TANK DALAM PROSES PENGISIAN *HYDROGEN* PADA
MOBIL JTM**

Skripsi

**Diajukan untuk Melengkapi Syarat dalam Menyelesaikan Strata - 1 (S1)
pada Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa**



Disusun Oleh:

**Gega Azzrafitrullah Esfate
3331200056**

**JURUSAN TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS SULTAN AGENG TIRTAYASA
CILEGON-BANTEN
2024**

TUGAS AKHIR


Analisis Simulasi Kapasitas Hydrogen Storage Tank Dalam Proses Pengisian Hydrogen Pada Mobil JTM

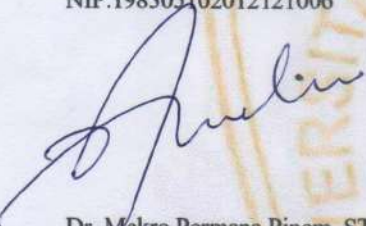
Dipersiapkan dan disusun Oleh :

Gega Azzrafitrullah Esfafate
3331200056


telah dipertahankan di depan Dewan Penguji
pada tanggal, 28 Juni 2024


Pembimbing Utama


Ir. Dhimas Satria, S.T., M.Eng
NIP.198305102012121006

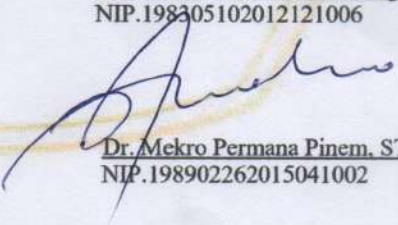

Dr. Mekro Permana Pinem, ST., MT.
NIP.198902262015041002

Anggota Dewan Penguji


Ir. Dedy Triawan Suprayogi, ST., M. Eng., Ph. D.
NIP.198206212022031001



Dr. Dwinanto, ST., MT.
NIP. 198301122008121001


Ir. Dhimas Satria, S.T., M.Eng
NIP.198305102012121006


Dr. Mekro Permana Pinem, ST., MT.
NIP.198902262015041002

**Tugas Akhir ini sudah diterima sebagai salah satu persyaratan
untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik**

Tanggal, 30 Juli 2024
Ketua Jurusan Teknik Mesin UNTIRTA


Ir. Dhimas Satria, S.T., M.Eng
NIP. 198305102012121006

HALAMAN PERSETUJUAN

Skripsi

ANALISIS SIMULASI KAPASITAS *HYDROGEN STORAGE TANK* DALAM PROSES PENGISIAN *HYDROGEN* PADA MOBIL JTM

Yang dipersiapkan dan disusun oleh:

Gega Azzrafitrullah Esfate

3331200056

Telah disetujui oleh dosen pembimbing skripsi

Pada tanggal¹⁵ Agustus 2024

Dosen Pembimbing 1,

Ir. Dhimas Satria, S.T., M. Eng

NIP. 198305102012121006

Dosen Pembimbing 2,

Dr. Mekro Permana Pinem, S.T., M.T.

NIP. 198902262015041002

Skripsi ini telah diterima sebagai salah satu persyaratan

Untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik

Tanggal 15 Agustus 2024

Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultan Ageng Tirtayasa



Ir. Dhimas Satria, S.T., M. Eng

NIP. 198305102012121006

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : Gega Azzrafitrullah Esfafate

NPM : 3331200056

Judul : Analisis Simulasi kapasitas *Hydrogen Storage Tank* Dalam Proses
Pengisian *Hydrogen* pada Mobil JTM

Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin Universitas Sultang Ageng Tirtayasa,

MENYATAKAN

Bahwa skripsi ini hasil karya sendiri dan tidak ada duplikat dengan karya orang lain, kecuali untuk yang telah disebutkan sumbernya.

Cilegon, 15 Agustus 2024



Gega Azzrafitrullah Esfafate

NPM. 3331200056

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT, atas rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan laporan tugas akhir ini dengan lancar. Laporan tugas akhir ini berjudul "ANALISIS SIMULASI KAPASITAS HYDROGEN STORAGE TANK DALAM PROSES PENGISIAN HYDROGEN PADA MOBIL JTM", dan disusun sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi di Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.

Penulisan laporan tugas akhir ini tidak lepas dari bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis ingin menyampaikan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Siti Fatmawati, terima kasih atas doa, kasih sayang, dan motivasi yang tiada henti.
2. Mas Gege Adnannuzal Esfafate, terima kasih atas pandangan-pandangannya dalam berbagai hal selama proses penyusunan laporan tugas akhir.
3. Bapak Ir. Dhimas Satria, S.T., M.Eng., selaku ketua Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa sekaligus Dosen Pembimbing I. terima kasih atas arahan dan bimbingannya selama proses penulisan laporan tugas akhir.
4. Bapak Dr. Mekro Permana Pinem, S.T., M.T., selaku Pembimbing II. Terima kasih atas dedikasi dalam membimbing serta arahan kepada tim proyek mobil listrik JTM.
5. Ibu Miftahul Jannah S.T., M.T., selaku Dosen koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
6. Seluruh Dosen dan Staff Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Sultan Ageng Tirtayasa yang telah memberikan bekal dengan bentuk ilmu dan bimbingan selama masa perkuliahan dari awal hingga akhir.
7. Kawan-kawan Tim Proyek JTM EV yang selalu memberikan semangat, menampung keluh dan kesah, serta dapat diajak bekerja sama selama proses pembangunan mobil JTM.
8. Kawan-kawan Teknik Mesin angkatan 2020 yang sudah memberikan semangat, masukan, serta dorongan selama perkuliahan.

9. Berbagai pihak lain yang tidak bisa saya sebutkan satu-persatu yang sudah menopang selama proses pembuatan laporan tugas akhir ini

Penulis menyadari bahwa laporan tugas akhir ini masih jauh dari sempurna. Oleh karena itu, penulis menerima kritik dan saran yang membangun demi perbaikan laporan tugas akhir ini di masa depan. Akhir kata, penulis berharap laporan tugas akhir ini dapat memberikan manfaat bagi penulis khususnya dan bagi pembaca pada umumnya.

Cilegon, Juni 2024

Penulis

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kapasitas tangki penyimpanan hidrogen dalam proses pengisian hidrogen pada mobil JTM melalui simulasi *Computational Fluid Dynamics* (CFD). Tujuan utama penelitian ini adalah untuk mengetahui tekanan yang dapat disimpan dalam tangki, suhu maksimum selama proses pengisian, densitas maksimum yang dapat disimpan dalam tangki, serta tipe tangki terbaik berdasarkan hasil simulasi CFD. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tangki tipe 2 memiliki tekanan maksimum yang lebih tinggi dibandingkan tipe 1 dan 3, namun suhu maksimum pada tipe 1 lebih rendah dibandingkan dengan tipe 2 dan 3. Densitas maksimum dalam tangki tipe 2 lebih kecil dibandingkan dengan tipe 1, namun lebih besar dibandingkan tipe 3. Berdasarkan analisis ini, tangki tipe 1 disimpulkan sebagai yang terbaik untuk dipasang pada mobil JTM, karena meskipun tekanannya tidak sebesar tipe 2, namun dari segi suhu dan densitas, tipe 1 lebih unggul dibandingkan tipe 2 dan 3. Kesimpulan dari penelitian ini adalah Ketiga tipe tangki memenuhi standar ISO 11439:2013 dengan tekanan maksimum yang berbeda-beda. Tipe 1 (367,7 bar), tipe 2 (407,6 bar), dan tipe 3 (339,01 bar). Suhu maksimum setelah proses pengisian adalah: tipe 1 (19,8°C), tipe 2 (31,7°C), dan tipe 3 (24°C), yang semuanya berada dalam rentang aman sesuai standar ISO 11439:2013. Densitas maksimum yang dapat disimpan tipe 1 (23,9 kg/m³), tipe 2 (25,58 kg/m³), dan tipe 3 (22,09 kg/m³). Tangki tipe 1 adalah tangki yang terbaik untuk mobil JTM dengan tekanan maksimum 367,7 bar, suhu hidrogen 19,8°C, dan densitas 23,9 kg/m³.

Kata Kunci: *Computational Fluid Dynamics*, tangki penyimpanan hidrogen, tipe tangki

ABSTRACT

This study aims to analyze the capacity of hydrogen storage tanks during the hydrogen refueling process in JTM cars using Computational Fluid Dynamics (CFD) simulation. The primary objectives of this research are to determine the pressure that can be stored in the tank, the maximum temperature during the refueling process, the maximum density that can be stored in the tank, and the best tank type based on the CFD simulation results. The simulation results show that the type 2 tank has a higher maximum pressure compared to types 1 and 3, but the maximum temperature in type 1 is lower than in types 2 and 3. The maximum density in the type 2 tank is lower than in type 1 but higher than in type 3. Based on this analysis, type 1 tank is concluded to be the best choice for JTM cars, as its temperature and density are superior to those of types 2 and 3, even though its pressure is not as high as type 2. The conclusions of this study are that all three tank types meet the ISO 11439:2013 standard with different maximum pressures: type 1 (367.7 bar), type 2 (407.6 bar), and type 3 (339.01 bar). The maximum temperature after the refueling process is: type 1 (19.8°C), type 2 (31.7°C), and type 3 (24°C), all within the safe range according to ISO 11439:2013 standards. The maximum density that can be stored is: type 1 (23.9 kg/m³), type 2 (25.58 kg/m³), and type 3 (22.09 kg/m³). Type 1 tank is the best choice for JTM cars with a maximum pressure of 367.7 bar, hydrogen temperature of 19.8°C, and a density of 23.9 kg/m³.

Keywords: Computational Fluid Dynamics, Hydrogen Storage Tank, Tank Type

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	iv
KATA PENGANTAR	vi
ABSTRAK	vii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 <i>State of Art</i>	4
2.2 Hidrogen.....	6
2.3 <i>Hydrogen Storage Tank</i>	7
2.4 Klasifikasi Storage Tank	8
2.5 <i>Design and Manufacturing</i>	10
2.4 Standar untuk <i>Hydrogen Tank</i>	12
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	
3.1 Tempat dan Waktu Pelaksanaan	16
3.2 Alat yang Digunakan.....	16
3.3 Diagram Alir Penelitian	16
3.4 Metode Pengambilan Data	20
3.5 Metode Analisis Data	20
3.6 Jadwal Penelitian.....	21

BAB IV ANALISIS DATA

4.1	Referensi Dimensi Tangki Hidrogen	22
4.2	Proses Perancangan Tangki Hidrogen	22
4.3	Parameter yang digunakan dalam CFD.....	27
4.4	Hasil simulasi Hydrogen Tank Tipe 1.....	30
4.5	Hasil simulasi Hydrogen Tank Tipe 2.....	37
4.6	Hasil simulasi Hydrogen Tank Tipe 3.....	44
4.7	Perbandingan 3 Tipe Tank	50

BAB V KESIMPULAN

5.1	Kesimpulan.....	59
5.2	Saran.....	60

DAFTAR PUSTAKA

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 <i>Tank Meshing</i>	4
Gambar 2.2 <i>Storage Tank Design</i>	5
Gambar 2.3 <i>HRS Schematics</i>	6
Gambar 2.4 Representasi skematik dari 4 <i>type storage tank</i>	8
Gambar 2.5 Parameter utama yang dipertimbangkan untuk desain <i>storage tank</i>	10
Gambar 2.6 Prinsip dari Pembuatan tangki logam	11
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	16
Gambar 4.1 Tangki Oksigen.....	22
Gambar 4.2 Proses desain bagian atas.....	23
Gambar 4.3 Proses desain bagian tengah	23
Gambar 4.4 Proses desain bagian bawah.....	23
Gambar 4.5 <i>General Dimension tank type 1</i>	24
Gambar 4.6 <i>General Dimension tank type 1</i>	24
Gambar 4.7 Proses pembuatan silinder Wrapping	25
Gambar 4.8 <i>General dimension Wrapping type 2</i>	25
Gambar 4.9 Tangki tipe 2	25
Gambar 4.10 Proses desain bagian atas.....	26
Gambar 4.11 Proses desain bagian tengah	26
Gambar 4.12 Proses desain bagian bawah	26
Gambar 4.13 <i>general dimension Wrapping type 3</i>	27
Gambar 4.14 Tangki tipe 3	27
Gambar 4.15 Simplifikasi Gambar	28
Gambar 4.17 <i>Boundary Condition</i>	29
Gambar 4.18 Grafik <i>Max Pressure tank Type 1</i>	33
Gambar 4.19 Grafik <i>Max Temperature tank Type 1</i>	35
Gambar 4.20 Grafik <i>Max Density tank Type 1</i>	36
Gambar 4.21 Grafik <i>Max Pressure tank Type 2</i>	40
Gambar 4.22 Grafik <i>Max Temperature tank Type 2</i>	41
Gambar 4.23 Grafik <i>Max Density tank Type 2</i>	43

Gambar 4.24 Grafik <i>Max Pressure tank Type 3</i>	46
Gambar 4.25 Grafik <i>Max Temperature tank Type 3</i>	48
Gambar 4.26 Grafik <i>Max Density tank Type 3</i>	50
Gambar 4.27 Grafik <i>Maximum Pressure Hydrogen Tank</i>	51
Gambar 4.28 <i>Contour Maximum Pressure</i>	52
Gambar 4.29 Grafik <i>Maximum Pressure Hydrogen Tank</i>	53
Gambar 4.30 <i>Contour Maximum Temperature</i>	54
Gambar 4.31 Grafik <i>Maximum Pressure Hydrogen Tank</i>	55
Gambar 4.32 <i>Contour Maximum Density</i>	56

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 2.1 Klasifikasi <i>Storage Tank</i> (Barthélémy, 2012).....	9
Tabel 2.2 <i>General Design and safety standards</i> (Yang et al, 2022).	12
Tabel 2.3 <i>Standards for hydrogen receptacles of fuel cell vehicles</i> (Yang et al, 2022).	14
Tabel 2.4 standar yang digunakan.....	15
Tabel 3.1 <i>Ganttchart</i> penelitian.....	21
Tabel 4.1 <i>Main Dimension</i>	22
Tabel 4.2 <i>Meshing Parameter</i>	28
Tabel 4.3 <i>Simulation Parameter</i>	30
Tabel 4.4 Hasil Simulasi <i>Tank Type 1</i>	31
Tabel 4.5 <i>Max Pressure Tank Type 1</i>	31
Tabel 4.6 <i>Max Temperature Tank Type 1</i>	33
Tabel 4.7 <i>Max Density Tank Type 1</i>	36
Tabel 4.8 Hasil Simulasi <i>Tank Type 1</i>	37
Tabel 4.9 <i>Max Pressure Tank Type 2</i>	38
Tabel 4.10 <i>Max Temperature Tank Type 2</i>	40
Tabel 4.11 <i>Max Density Tank Type 2</i>	42
Tabel 4.12 Hasil Simulasi <i>Tank Type 3</i>	44
Tabel 4.13 <i>Max Pressure Tank Type 3</i>	45
Tabel 4.14 <i>Max Temperature Tank Type 3</i>	47
Tabel 4.15 <i>Max Density Tank Type 3</i>	49

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam era saat ini, di mana perubahan iklim dan polusi udara menjadi perhatian utama, penggunaan bahan bakar fosil telah menjadi sumber permasalahan yang mendesak. Bahan bakar fosil, seperti batu bara, minyak bumi, dan gas alam, telah menjadi pendorong utama ekonomi global selama beberapa abad terakhir. Namun, penggunaannya juga berkontribusi secara signifikan terhadap emisi gas rumah kaca dan polusi udara yang merusak lingkungan dan kesehatan manusia. Penyumbatan jalan raya, kabut asap yang tebal di kota-kota besar, dan krisis iklim yang semakin memburuk adalah beberapa contoh nyata dari dampak negatif yang ditimbulkan oleh ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Oleh karena itu, munculnya alternatif yang bersih dan berkelanjutan dalam upaya mengatasi tantangan lingkungan global yang semakin kompleks ini. Salah satu bentuk energi terbarukan yang dapat menggantikan bahan bakar fosil adalah hidrogen, sebuah bahan bakar yang bersih, berlimpah, dan dapat dihasilkan dari sumber energi terbarukan. Dalam konteks ini, salah satu pengembangan teknologi *Genset* menjadi kunci dalam memfasilitasi penggunaan hidrogen sebagai bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan dan berkelanjutan.

Untuk menyuplai *hydrogen* kedalam *Genset*, diperlukan suatu tangki untuk menyimpan hidrogen. Tangki ini harus memenuhi standar keamanan yang ketat serta memiliki kepadatan energi yang tinggi untuk menyimpan jumlah hidrogen yang cukup. Tangki penyimpanan hidrogen memainkan peran sentral dalam memfasilitasi penggunaan gas hidrogen dalam berbagai aplikasi, mulai dari kendaraan bertenaga hidrogen hingga penyimpanan energi terbarukan. Dalam menghadapi tantangan transisi energi dari bahan bakar fosil ke sumber energi yang lebih bersih, tangki penyimpanan hidrogen menjadi fokus utama dalam pengembangan infrastruktur hidrogen. Salah satu tantangan utama dalam penyimpanan hidrogen adalah kepadatan energinya

yang rendah dalam bentuk gas, memerlukan sistem penyimpanan yang efisien dan ringan untuk memungkinkan penyimpanan dalam jumlah yang cukup besar untuk aplikasi praktis. Berbagai jenis tangki penyimpanan telah dikembangkan, termasuk tangki logam, tangki serat karbon, dan tangki cair, masing-masing dengan kelebihan dan kekurangan mereka sendiri. Pengembangan terbaru dalam teknologi tangki penyimpanan hidrogen mencakup inovasi dalam material dan proses produksi untuk meningkatkan kekuatan, keamanan, dan efisiensi biaya. Implikasi ekonomi dan lingkungan dari pengembangan teknologi tangki penyimpanan hidrogen sangat signifikan, dengan potensi untuk mengurangi emisi gas rumah kaca dan menciptakan lapangan kerja baru dalam sektor energi terbarukan. Oleh karena itu, pengembangan terus menerus dalam teknologi tangki penyimpanan akan memainkan peran kunci dalam mempercepat adopsi hidrogen sebagai bahan bakar alternatif yang penting dalam panduan menuju masa depan yang lebih bersih dan berkelanjutan.

Dengan demikian, pengembangan teknologi tangki penyimpanan hidrogen menjadi penting dalam memfasilitasi penggunaan kendaraan bertenaga hidrogen secara luas. Inovasi terus-menerus dalam desain dan material tangki akan membantu meningkatkan keamanan, kepadatan energi, dan efisiensi biaya dari infrastruktur hidrogen. Dengan dukungan yang tepat, tangki penyimpanan hidrogen memiliki potensi untuk menjadi elemen kunci dalam mewujudkan masa depan transportasi yang bersih, berkelanjutan, dan ramah lingkungan.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang sudah dijelaskan pada subbab sebelumnya, diperoleh suatu rumusan masalah. Yaitu:

1. Berapa besar tekanan yang dapat disimpan dalam tangki?
2. Berapa besar temperatur maksimum dalam proses pengisian tangki?
3. Berapa besar densitas maksimum yang dapat disimpan dalam tangki?
4. Tangki tipe mana yang terbaik berdasarkan simulasi CFD?

1.3 Batasan Masalah

penelitian Analisis Kapasitas *Hydrogen Storage Tank* Menggunakan Simulasi *Solidworks* dalam proses Pengisian *Hydrogen* pada Mobil JTM ini perlu batasan masalah supaya pembahasan dan pengkajian terfokus dan tidak meluas. Berikut penjabarannya.

1. Simulasi yang akan dilakukan menggunakan *Software Solidworks*.
2. Standar tipe *Hydrogen Tank* yang digunakan yaitu tipe 1,2, dan 3.
3. Material pada silinder menggunakan Aluminium dengan karakteristik material berdasarkan *Ansys Fluent*.
4. Material yang digunakan untuk *Wrapping* yaitu *carbon fiber* dengan karakteristik material berdasarkan *Ansys Fluent*.
5. Ketebalan *Wrapping* sebesar 0,05 mm.
6. *Heat Transfer* yang terjadi diabaikan.

1.4 Tujuan Penelitian

Berikut tujuan dari dilaksanakannya penelitian ini.

1. Mengetahui tekanan yang dapat disimpan dalam tangki.
2. Mengetahui suhu maksimum selama proses pengisian tangki
3. Mengetahui densitas maksimum yang dapat disimpan dalam tangki.
4. Mengetahui tipe tangki terbaik berdasarkan hasil simulasi CFD

1.5 Manfaat Penelitian

Berikut merupakan manfaat dari dilaksanakannya penelitian ini.

1. Hasil penelitian ini dapat memberikan wawasan yang berharga bagi perancang dan insinyur dalam menentukan ukuran *Hydrogen Storage Tank* dalam aplikasi kendaraan hidrogen, yang akan membantu dalam menghemat biaya pembuatan, mengurangi tempat penggunaan, dan mendukung upaya keberlanjutan dalam industri otomotif.
2. Memberikan wawasan serta sumber referensi bagi peneliti yang ingin meneliti *Hydrogen Storage Tank*.

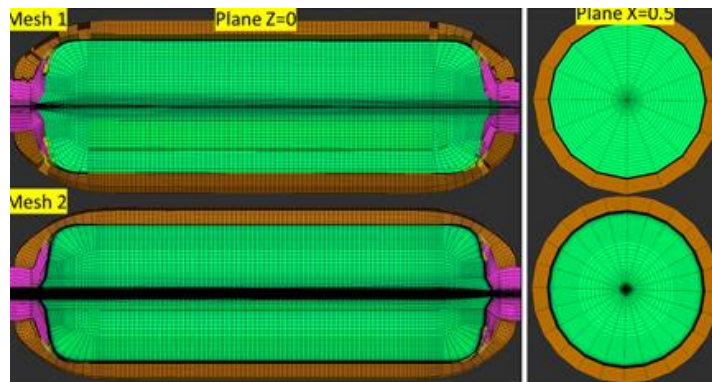
BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *State of Art*

Dalam penulisan penelitian ini, penulis memiliki beberapa referensi yang membantu penulis dalam mengkaji Analisa dalam penelitiannya. *State of Art* ini merupakan pembahasan singkat mengenai penelitian sebelum-sebelumnya dan juga memberikan pembeda dari karya penulis dengan penelitian sebelumnya. Berikut ialah penelitian-penelitian mengenai *Hydrogen Storage Tank*.

1. Penelitian berjudul *CFD Simulation of Hydrogen Tank Fuelling: Sensitivity to Turbulence and Grid Resolution* yang ditulis oleh Huanguang Xie Dkk tahun 2023.



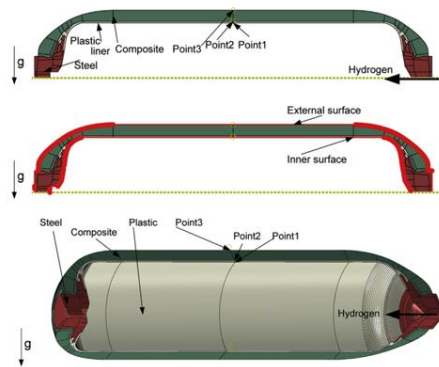
Gambar 2.1 *Tank Meshing*

(Sumber: Xie *et al*, 2023)

Dalam penelitian ini, membahas mengenai simulasi pengisian tangki hydrogen menggunakan metode CFD Studi ini meneliti dampak pemilihan model turbulensi terhadap simulasi CFD pengisian bahan bakar hydrogen gas pada tingkat tekanan tinggi dalam tangki hydrogen tipe IV berukuran 29 L. Dengan menggunakan lima model turbulensi yang berbeda, penelitian ini menghadirkan perbandingan langsung atas kinerja model-model tersebut dalam simulasi CFD 3D dari proses pengisian yang sama. Menandai langkah inovatif, simulasi ini melibatkan model LES 3D dan

model RANS-LES hibrida (SAS dan DES), serta model RANS (modified k-model dan RSM), untuk pertama kalinya. Melalui analisis yang mendalam, paper ini memeriksa hasil simulasi termasuk tekanan hidrogen, suhu, fluks panas, dan kecepatan aliran dalam tangki, membawa kontribusi penting dalam konteks keselamatan hidrogen yang sebelumnya belum tersentuh.

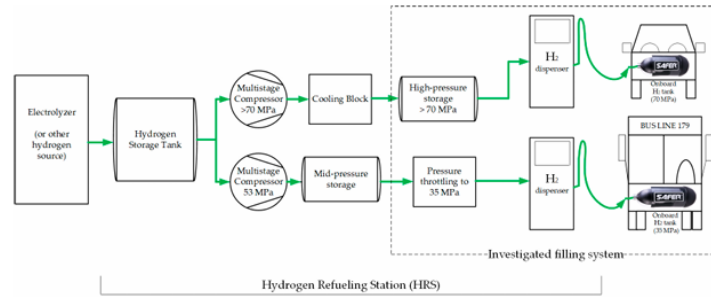
2. Penelitian berjudul *Thermal Simulation of a Hydrogen Storage Tank during Fast Filling* yang ditulis oleh Igor Simonovski Dkk tahun 2015.



Gambar 2.2 Storage Tank Design
(Sumber: Simonovski *et al*, 2015)

Penelitian ini menyajikan informasi teknis mengenai penyimpanan hidrogen dalam kondisi tekanan tinggi serta sifat-sifat termal yang terjadi selama proses pengisian ulang. Pembahasan mencakup pengaruh konduktivitas termal dan kapasitas panas spesifik terhadap fluktuasi suhu saat tahap pengisian. Tak hanya itu, penelitian juga merujuk pada standar industri dan peraturan terkait kendaraan hidrogen dan teknologi sel bahan bakar.

3. Penelitian berjudul *Effects of Hydrogen, Methane, and Their Blends on Rapid-Filling Process of High-Pressure Composite Tank* yang ditulis oleh Adam Saferna Dkk pada tahun 2024.



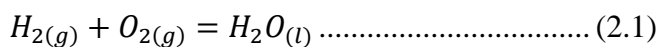
Gambar 2.3 HRS Schematics
(Sumber: Simonovski *et al*, 2015)

Penelitian ini membahas mengenai pengaruh dari hidrogen, metana dan campuran masing-masing pada proses *Rapid-Filling* di tangki tekanan komposit. Metode yang digunakan yaitu simulasi numerik. Dalam analisis yang dilakukan pada proses pengisian cepat tangki tipe IV komposit, beberapa parameter dievaluasi: waktu pengisian, peningkatan tekanan silinder, perubahan suhu silinder, laju aliran massa, peningkatan massa silinder, koefisien Joule-Thomson, dan generasi entropi. Temuan menunjukkan bahwa, untuk setiap kapasitas silinder yang dipertimbangkan, waktu pengisian terpendek untuk mencapai tekanan maksimum (35 MPa dan 70 MPa) terjadi ketika menggunakan hidrogen murni, dan durasi ini memanjang ketika proporsi hidrogen menurun dalam campuran dengan metana. Massa yang dihasilkan dalam silinder setelah pengisian hingga tekanan akhir terendah untuk hidrogen murni dan tertinggi untuk metana murni, yang berkorelasi langsung dengan komposisi sampel gas yang dianalisis. Lebih penting dalam konteks ini adalah potensi untuk mencapai konten energi maksimum dalam tangki setelah pengisian.

2.2 Hidrogen

Hidrogen, yang berasal dari bahasa Latin (*hydrogenium*) dan bahasa Yunani (*hydro*) yang berarti "air" dan "membentuk", merupakan unsur kimia pada tabel periodik dengan simbol H dan nomor atom 1. Pada kondisi standar,

hidrogen tidak memiliki warna, aroma, dan bersifat non-logam dengan valensi tunggal. Hidrogen adalah gas diatomik yang sangat mudah terbakar.



Hidrogen merupakan unsur teringan di dunia, hidrogen juga merupakan unsur paling melimpah, membentuk sekitar 75% dari total massa unsur di alam semesta. Produksi hidrogen dapat dilakukan dari air melalui elektrolisis, namun secara komersial lebih mahal daripada produksi dari gas alam. Gas hidrogen sangat mudah terbakar, bahkan pada konsentrasi serendah 4% H₂ di udara bebas. Entalpi pembakaran hidrogen adalah -286 kJ/mol (Ma'ruf & Widiharsa, 2016).

Hidrogen adalah unsur yang paling melimpah di alam, tetapi hanya ada sedikit yang tersisa di Bumi. Dari analisis spektrum sinar yang dipancarkan oleh bintang, disimpulkan bahwa bintang terdiri dari hidrogen. Hidrogen sangat reaktif, sehingga di Bumi terdapat senyawa air yang mengandung 11,1% hidrogen, serta hidrokarbon seperti gas alam sebesar 25%, minyak bumi sebesar 14%, dan karbohidrat seperti 6% (Putra, 2010).

2.3 *Hydrogen Storage Tank*

dibandingkan dengan penyimpanan gas lainnya, tangki hidrogen memerlukan perhatian khusus dalam pemilihan baja untuk tangki tipe I, II, dan III, serta pilihan polimer untuk tangki tipe IV. Uji material umumnya diminta untuk membuktikan bahwa pengerasan rendah: uji tarik, uji cakram, uji mekanisme retak. Pengukuran permeasi lengkap diperlukan pada satu tangki untuk membuktikan bahwa permeasi berada di bawah tingkat yang ditentukan (misalnya 1 cm³/l/jam). Pengukuran pada sampel saja juga bisa cukup untuk menilai tingkat permease (Barthélémy, 2012).

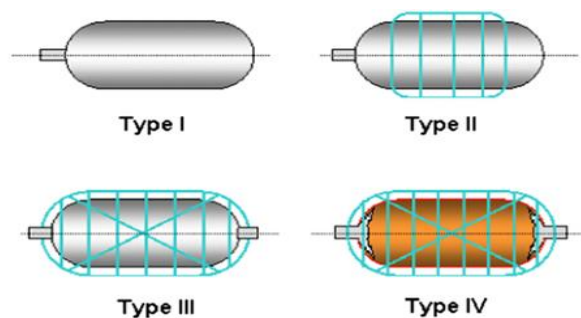
Dibandingkan dengan gas industri, energi hidrogen telah membawa batasan baru untuk wadah tekanan, terutama di sektor transportasi. Sebelum memasuki detail wadah tekanan yang didedikasikan untuk energi hidrogen, penting untuk mengingat aplikasi utama energi hidrogen. Mereka tercantum

di bawah ini dan tergantung pada perkembangan sel bahan bakar (Barthélémy, 2012):

1. Bahan bakar untuk transportasi
bus, mobil, skuter, kendaraan rekreasi lainnya. Kendaraan-kendaraan ini dapat ditenagai oleh sel bahan bakar atau oleh mesin pembakaran internal yang diisi dengan H₂.
2. Aplikasi stasioner
pasokan daya cadangan atau generator daya untuk rumah tangga. Untuk aplikasi ini, biaya hidrogen yang disediakan adalah parameter utama. Umur siklus tekanan juga menjadi masalah.
3. Aplikasi portable
pasokan daya cadangan portabel, generator daya portabel, elektronik (komputer, ponsel, dll.).

2.4 Klasifikasi Storage Tank

Berikut ini merupakan 4 *type* dari *storage tank* yang sudah terklasifikasi.



Gambar 2.4 Representasi skematik dari 4 *type storage tank*

(Sumber: Barthélémy, 2012)

1. *Type I*
Tipe ini, terbuat dari bahan yang bermaterial logam. Menurut Barthélémy, tekanan maksimum yang dapat diterima sebesar 300 bar. Type 1 memiliki harga pembuatan cukup murah. Tipe ini memiliki bobot yang berat.
2. *Type II*
Tipe ini, terbuat dari bahan yang bermaterial logam tebal dan di-*wrapping* dengan material komposit serat-resin berbentuk silinder. Menurut

Barthélémy, tidak ada limit tekanan maksimum pada tangki ini. Type II memiliki harga pembuatan yang sedikit mahal. Type ini memiliki bobot yang cukup ringan.

3. *Type III*

Type ini, terbuat dari bahan yang bermaterial logam dan di-*wrapping* dengan material komposit serat-resin secara menyeluruh. Menurut Barthélémy, tekanan maksimum yang dapat dicapai oleh tangki ini sebesar 700 bar. Type III memiliki harga pembuatan yang sangat mahal. Bobot yang diperoleh dari *Type* ini memang sangat ringan.

4. *Type IV*

Type ini, terbuat dari bahan yang bermaterial polimer dan di-*wrapping* dengan material komposit serat-resin secara menyeluruh. Port dari tangki ini terbuat dari logam dan terintegrasi dalam strukturnya.. Menurut Barthélémy, tekanan maksimum yang dapat dicapai oleh tangki ini sebesar 700 bar. Type III memiliki harga pembuatan yang sangat mahal. *Type IV* memiliki bobot yang sangat ringan.

Untuk mempermudah pengklasifikasian, dibuatlah tabel yang mencakup fitur utama dari tangki penyimpanan bertekanan.

Tabel 2.1 Klasifikasi *Storage Tank* (Barthélémy, 2012).

Type	Classification			
	Technology Mature	Pressure Limit	Cost Performance	Weight Performance
Type I	++	300 Bar	++	-
Type II	+	Not limited	+	0
Type III	N/A	P<350 Bar P>700 Bar	-	+
Type IV	N/A	P<350 Bar P>700 Bar	-	+

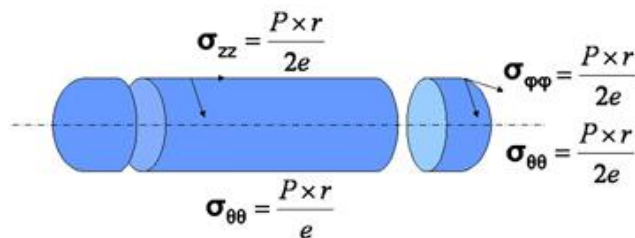
Karena perbedaan rentang operasional dari ketiga teknologi penyimpanan, berbagai kebutuhan berlaku untuk tangki penyimpanan padat. Biasanya, tangki-tangki ini dibagi menjadi empat kategori. Tangki tipe I terbuat hanya

dari baja dan dapat menahan tekanan hingga 200 bar. Tangki tipe II terdiri dari baja yang dilapisi dengan plastik yang diperkuat serat karbon untuk mengurangi berat total tangki. Tangki tipe III terbuat dari liner baja atau aluminium di dalam silinder plastik yang diperkuat serat karbon atau kaca, memungkinkan tekanan yang lebih tinggi. Terakhir, tangki tipe IV berbeda dari tangki tipe III oleh liner, yang terbuat dari polimer, menghasilkan tangki yang lebih ringan yang dapat menahan tekanan hingga 700 bar (Stops *et al*, 2024)

2.5 Design and Manufacturing

Untuk semua *Storage Tank*, desain harus memperhitungkan tekanan layanan dan uji, serta tegangan eksternal yang khusus untuk penggunaan (seperti benturan, media agresif, getaran, suhu, berat konektor, dll.), umur sebenarnya (penggunaan berulang) dan koefisien keamanan yang ditentukan untuk kondisi statis dan dinamis. Mode kegagalan seperti deformasi plastik, pembengkokan, perlahan, kelelahan, dll. untuk logam, delaminasi, pecah serat, retak, penuaan, dll. untuk komposit juga diperhitungkan dalam desain. Semua parameter ini menentukan desain mekanis dan pemilihan bahan. Bahan juga harus kompatibel dengan gas saat bersentuhan. Penting untuk dicatat bahwa wadah logam dan wadah komposit sangat berbeda (Barthélémy, 2012):

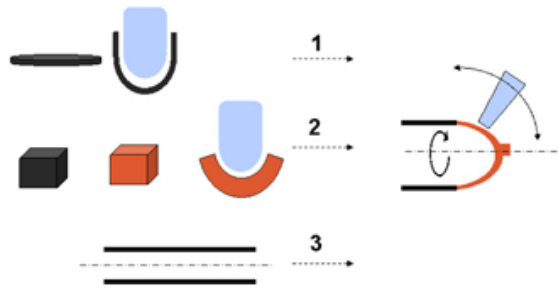
1. Logam bersifat isotropik, sedangkan komposit bersifat *anisotropic*
2. sifat mekanik terkonsentrasi dalam arah serat untuk komposit.
3. Mode kegagalan berbeda.
4. Penuaan juga berbeda.



Gambar 2.5 Parameter utama yang dipertimbangkan untuk desain *storage tank*

(Sumber: Barthélémy, 2012)

Sebagai contoh, Gambar diatas memberikan Parameter utama yang umumnya dipertimbangkan untuk wadah tekanan logam. Secara umum, kubah-kubah direncanakan lebih dari cukup. Itulah mengapa tipe II wadah, dengan penguatan lingkaran hanya pada bagian silinder dari pelapis tebal, dapat dengan mudah menahan tekanan yang lebih tinggi. Berikut beberapa proses manufaktur yang bisa dilakukan.



Gambar 2.6 Prinsip dari pembuatan tangki logam
(Sumber: Barthélémy, 2012)

1. Dari plat: proses ini terdiri dari menarik logam yang dilapisi untuk membentuk bentuknya (langkah ini dapat dilakukan beberapa kali untuk mendapatkan diameter dan ketebalan yang diinginkan)
2. dari *billets*: Billet pertama kali dipanaskan untuk memungkinkan penarikan dilakukan. Proses ini kemudian mirip dengan yang sebelumnya.
3. dari *tubes*: Tabung dibeli dan pada umumnya ketebalan asli dipertahankan untuk lingkaran. Kubah dibentuk dengan putaran panas dan silinder dengan 1 atau 2 port dapat diperoleh. Prosesnya kemudian mirip dengan yang pertama.

Untuk setiap teknologi, kontrol kualitas bahan yang digunakan dan setiap langkah pembuatan dilakukan dan dilacak. Pelapis dari wadah tipe II dan tipe III dapat diproduksi dengan cara yang sama. Pelapis polimer dapat dibuat dengan (Barthélémy, 2012):

1. Dari *polimer* atau *monomer* dengan proses *rotomolding*: *polimer* (atau *monomer*) dimasukkan ke dalam cetakan yang bentuknya adalah bentuk akhir pelapis. Pelapis dibuat dengan memanaskan dan kemudian mendinginkan cetakan sambil berputar (temperatur peleburan atau

temperatur polimerisasi harus tercapai). Ini bisa menjadi pelapis satu atau dua *port*. *Boss* logam dimasukkan selama langkah *rotomolding* atau ditempelkan pada pelapis sebelum dibungkus.

2. Dari tabung: tabung *polimer* (dibuat dengan ekstrusi *blow molding*) dan kubah (dilengkapi dengan *boss* logam) dibeli dengan diameter yang diinginkan. Kedua bentuk tersebut dilas untuk membentuk pelapis.

Untuk semua wadah komposit, pelapis logam atau *polimer* kemudian dibungkus dengan kawat melingkar atau sepenuhnya dengan komposit menggunakan mesin pembungkus kawat. Untuk wadah silinder, terdapat 3 pembungkusan yang mungkin: *hoop*, *polar*, dan heliks. Tipe II hanya dibungkus *hoop*. Wadah tipe III dan IV umumnya merupakan kombinasi pembungkusan *hoop* dan *polar*, tetapi kombinasi dari ketiga pembungkusan tersebut juga dapat dipertimbangkan. Banyak wadah dapat dibungkus dalam mesin pembungkus yang sama jika dilengkapi dengan banyak kepala pembungkus. Setelah pelapis dibungkus, resin harus diset. Pengerasan biasanya dilakukan di oven dengan perawatan panas resin yang sesuai (Barthélémy, 2012).

2.4 Standar untuk *Hydrogen Tank*

Untuk mendesain dan melaksanakan simulasi pada *hydrogen storage tank*, perlu diketahui standarisasi yang mengampu mengenai parameter utama pada *hydrogen storage tank*. Berikut ini, tabel yang berisikan beberapa standar mengenai *hydrogen storage tank*. Dibawah ini merupakan standar mengenai *general design* dan *safety* yang harus dipertimbangkan dalam desain, peletakan, instalasi, dan keamanan pada *hydrogen storage tank*. Tabel ini berisikan 8 standar CGA, 2 standar NFPA, dan 4 standar GB/T.

Tabel 2.2 *General Design and safety standards* (Yang *et al*, 2022).

No	Number of standards	Name of standards
1	CGA H-5-2014	Installation standard for bulk hydrogen supply systems
2	CGA P-12-2017	Safe handling of cryogenic liquids

3	CGA PS-17-2004	CGA position statement on underground installation of liquid hydrogen storage tanks
4	CGA PS-20	CGA Position statement on the direct burial of gaseous hydrogen storage tanks
5	CGA P-28-2014	Risk management plan guidance document for bulk liquid hydrogen systems
6	CGA P-41-2018	Locating bulk liquid storage systems in courts
7	CGA PS-46-2017	Position statement - roofs over hydrogen storage systems
8	CGA PS-48-2016	CGA Position statement on clarification of existing hydrogen setback distances and development of new hydrogen setback distances in NFPA 55
9	NFPA 2	Hydrogen technologies code
10	NFPA 55	Compressed gases and cryogenic fluids code
11	GB/T 34583-2017	Safety technical requirements for hydrogen storage devices used in hydrogen fuelling station
12	GB/T 34584-2017	Safety technical regulations for hydrogen refueling station
13	GB/T 29729-2013	Essential requirements for the safety of hydrogen systems
14	GB/T 34542.1 2017	Storage and transportation systems for gaseous hydrogen Part 1: General requirements

Dibawah ini merupakan standar untuk *hydrogen storage tank* pada kendaraan yang menggunakan *Fuel Cell* yang harus dipertimbangkan. Tabel ini berisikan 3 standar ISO, 4 standar GB/T, dan 2 standar ANSI.

Tabel 2.3 *Standards for hydrogen receptacles of fuel cell vehicles (Yang et al, 2022).*

No	Number of standards	Name of standards
1	ISO 11349:2013	specifies minimum requirements for light-weight refillable gas cylinders
2	ISO 13985:2006	Liquid hydrogen - Land vehicle fuel tanks
3	ISO 19881:2018	Gaseous hydrogen - Land vehicle fuel containers
4	ISO 19882:2018	Gaseous hydrogen - Thermally activated pressure relief devices for compressed hydrogen vehicle fuel containers
5	GB/T 34544 2017	Safety test methods for onboard low pressure hydrogen storage devices for small fuel cell vehicles
6	GB/T 29126 2012	Fuel cell electric vehicles - Onboard hydrogen system - Test methods
7	GB/T 26990 2011	Fuel cell electric vehicles - Onboard hydrogen system - Specifications
8	GB/T 35544 2017	Fully-wrapped carbon fiber reinforced cylinders with an aluminum liner for the on-board storage of compressed hydrogen as a fuel for land vehicles
9	ANSI/CSA HPRD1-2013	Standard for thermally activated pressure relief devices for compressed hydrogen vehicle fuel containers
10	ANSI HGV 2 2014	Compressed hydrogen gas vehicle fuel containers

Dari tabel diatas diperoleh 1 standar yang relevan dengan penelitian ini. Standar tersebut sudah menjelaskan mengenai *general requirement*, dan spesifikasi. Standar ini akan membantu untuk proses desain dan simulasi pada penelitian ini. Berikut standar yang akan dijadikan acuan pada penelitian ini.

Tabel 2.4 standar yang digunakan

No	Number of standards	Name of standards	Concerns
1	ISO 11349:2013	specifies minimum requirements for light-weight refillable gas cylinders	Specifies minimum requirements

ISO (the International Organization for Standardization) merupakan federasi standar internasional. Standar ISO 11349:2013 menetapkan persyaratan minimum untuk tabung gas isi ulang ringan yang diproduksi secara massal yang ditujukan hanya untuk penyimpanan gas alam terkompresi dengan tekanan tinggi di atas kendaraan sebagai bahan bakar untuk kendaraan. Standar ini tidak mencakup beban eksternal yang mungkin timbul dari tabrakan kendaraan, dll.

Standar ini mencakup tabung yang terbuat dari baja *seamless*, paduan aluminium *seamless*, atau bahan non-logam, menggunakan desain atau metode pembuatan apa pun yang sesuai untuk kondisi standar yang ditentukan. Standar internasional ini tidak mencakup tabung dari *stainless steel*. Meskipun standar menggunakan tekanan kerja referensi 200 bar, tekanan kerja lainnya dapat digunakan. Tabung penyimpanan yang dicakup oleh standar ini yaitu tipe 1, tipe 2, tipe 3, dan tipe 4. Standar ISO 11349:2013 digunakan sebagai acuan untuk perancangan, manufaktur, inspeksi, dan *Approval* pada *Storage Tank* yang terpasang pada kendaraan. *Storage tank* tersebut berfungsi untuk menyimpan gas alam. Gas alam pada tangki dijadikan sebagai bahan bakar untuk kendaraan. Pada standar ini dijelaskan bahwa umur kerja dari tangki penyimpanan yaitu 20 tahun. Tekanan maksimum yang harus diperhatikan sesuai dengan standar ISO 11439:2013 yaitu sebesar 260 bar. Dan untuk tekanan kerja untuk tangki penyimpanan sebesar 200 bar pada temperatur 15 °C

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Pelaksanaan

Penelitian ini akan dilaksanakan dengan menggunakan laptop pribadi dengan waktu perkiraan waktu pengerjaan Januari – Juni 2024

3.2 Alat yang Digunakan

Berikut Alat yang digunakan selama proses penelitian ialah sebagai berikut.

1. Computer Lab Gambar

Komputer merupakan alat penting untuk menjalankan *software Solidworks* supaya dapat melaksanakan simulasi. Berikut merupakan spesifikasi yang digunakan:

- a. *Processor*: Intel Core i5 gen 9
- b. *RAM*: 8 Gb
- c. *Storage*: HDD 1 TB

2. Software

Software yang digunakan pada penelitian ini ialah *Solidworks 2023* dan *Software* yang digunakan untuk analisis CFD yaitu *ANSYS 2023 Student*



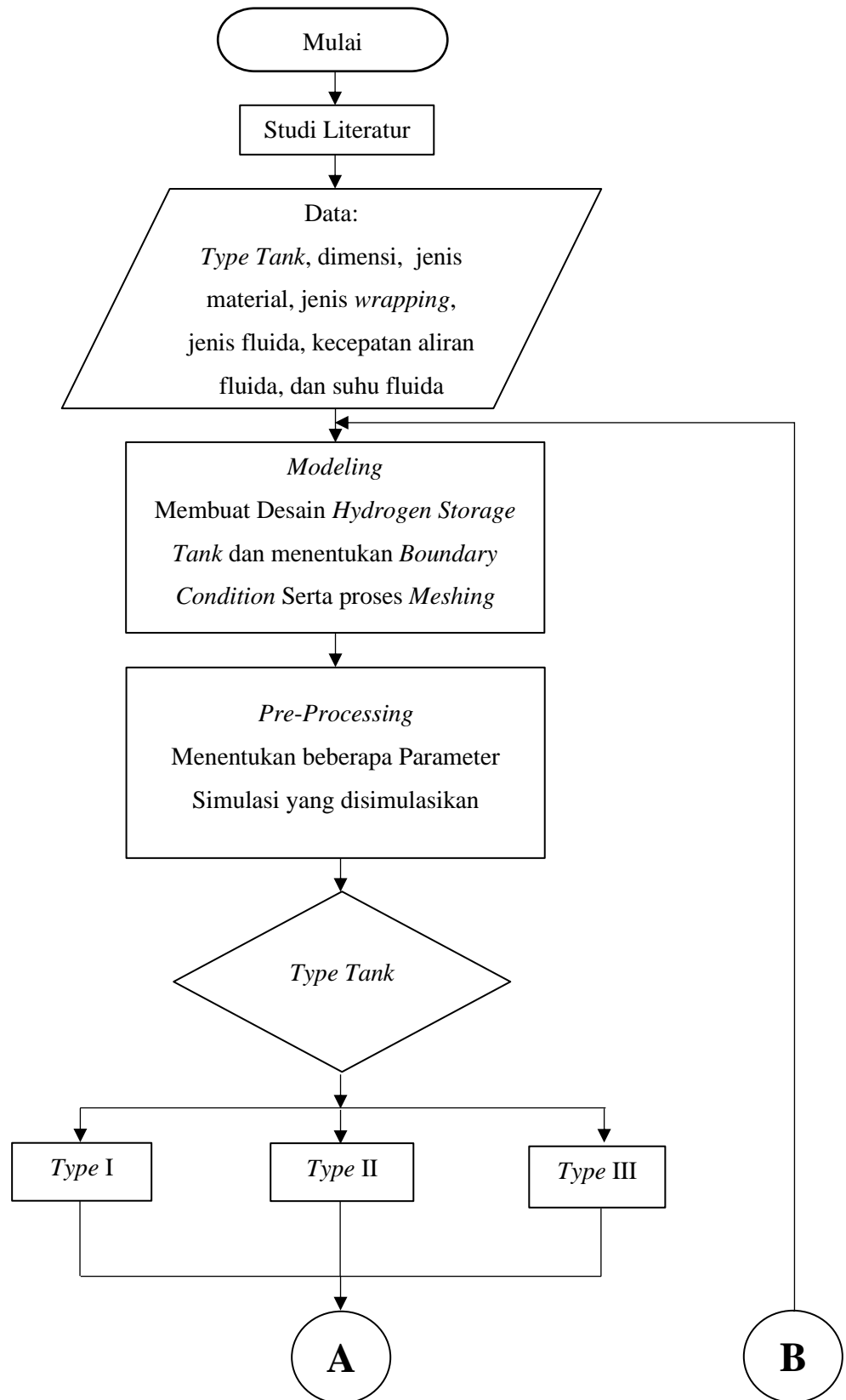
Gambar 3.1 *Solidworks* dan *Ansys*

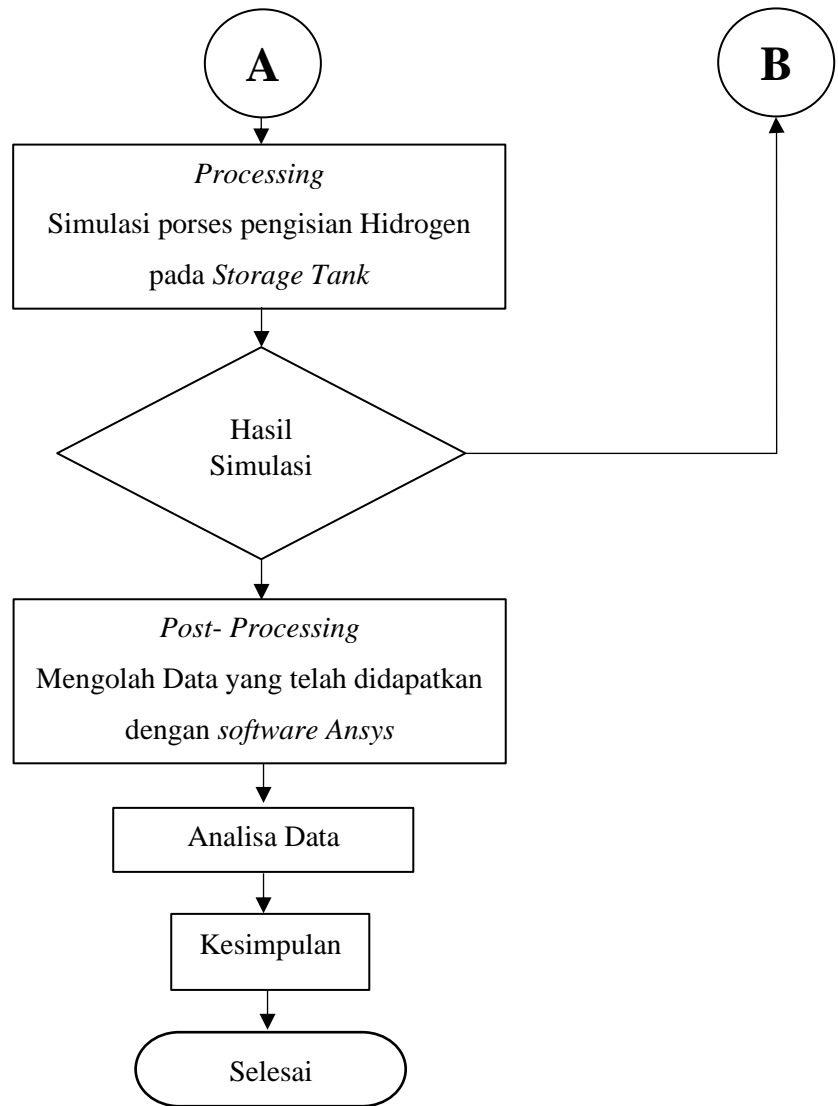
(Sumber: [solidworks.com](https://www.solidworks.com) dan [Ansys.com](https://www.ansys.com))

3.3 Diagram Alir Penelitian

Pada penelitian kali ini terdapat diagram alir penelitian yang bertujuan untuk menjelaskan mengenai tahapan-tahapan pada proses penulisan

Penelitian. Diagram alir dapat dilihat dibawah ini pada gambar 3.2 sebagai berikut





Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

Berikut merupakan penjelasan lebih detail mengenai diagram alir penelitian diatas yang bertujuan agar penelitian dapat terencana dan tepat.

1. Studi Literatur

Untuk tahap ini, dilaksanakan kegiatan pengumpulan berbagai macam data keperluan awal penelitian yang bersumber dari buku, Jurnal, dan lainnya.

2. Pengumpulan Data

Untuk tahap ini, dilaksanakan kegiatan pengumpulan berbagai macam data keperluan penelitian yang digunakan selama proses simulasi seperti

tipe tangki, dimensi, jenis material yang digunakan, suhu fluida, jenis fluida, dan kecepatan aliran Fluida.

3. *Modeling*

Untuk tahap ini, dilaksanakan kegiatan yaitu design dari *Hydrogen Storage Tank*, proses *Modelling* mencakup pembuatan model 3D dan *Meshing*.

4. *Pre-Processing*

Untuk tahap ini, dilaksanakan kegiatan penentuan beberapa parameter yang diperlukan dari data yang sudah dikumpulkan. Lalu memasukan kedalam *software Ansys Fluent Simulation*.

5. *Processing*

Untuk tahap ini, dilaksanakan kegiatan proses simulasi. proses simulasi dilakukan dengan cara mensimulasikan aliran Fluida Hidrogen yang masuk kedalam *Storage Tank* untuk proses pengisian selama 250 detik.

6. Hasil Simulasi

Setelah proses *Processing*, didapatkan data-data hasil simulasi yang diperoleh berdasarkan dengan parameter-parameter yang sudah ditentukan.

7. *Post-Processing*

Untuk tahap ini, dilaksanakan kegiatan pengolahan data lebih lanjut yaitu data hasil simulasi yang sudah diperoleh akan diubah menjadi *data sheet, contour*, dan grafik.

8. Analisis Data

Tahapan kali ini dilakukan analisis dari data hasil simulasi yang telah dilakukan pengolahan lebih lanjut melalui aplikasi *Ansys Fluent*.

9. Kesimpulan

Pada tahapan ini, penulis menyimpulkan berdasarkan data-data hasil akhir yang didapatkan untuk menjawab tujuan dilaksanakannya penelitian ini.

3.4 Metode Pengambilan Data

Proses pengumpulan data dilakukan dengan cara dilakukan simulasi menggunakan *Ansys Fluent* yang ada pada *software Ansys* dengan beberapa variabel data yang dibutuhkan seperti desain, material tangki, material *wrapping*, jenis fluida, suhu fluida dan kecepatan aliran Fluida. Dimana terdapat beberapa tahapan untuk mendapatkan data hasil yang dibutuhkan sebagai berikut.

1. *Modelling*

Pada tahap pertama ini dilakukan permodelan dari *type storage tank* yang digunakan. Serta menentukan material utama tangki dan material pembungkus yang akan digunakan. Pada langkah ini digunakan *Meshing* untuk permodelan tersebut dengan beberapa kondisi sesuai dengan yang diperlukan.

2. Input Data

Pada tahap ini, data yang ada seperti jenis material utama dan material *wrap*, jenis fluida, suhu fluida, dan Kecepatan aliran Fluida, hal tersebut akan dimasukkan kedalam program serta dilakukan beberapa pengaturan pada program sesuai dengan hasil yang ingin didapatkan nantinya

3. Pengkondisian Simulasi

Pada proses ini dilakukan pengaturan pada *software* untuk pengkondisian pada saat simulasi dilakukan.

4. *Running Simulation*

Tahap ini merupakan proses perhitungan simulasi dari berbagai tahapan sebelumnya pada program. Pada tahap ini memerlukan waktu yang cukup lama bergantung pada spesifikasi laptop ataupun PC yang digunakan, dimana setelah simulasi akan didapatkan data hasil dari proses simulasi yang dilakukan

3.5 Metode Analisis Data

Pada proses simulasi, didapatkan hasil akhir berupa data yang berasal dari *Ansys Flow Simulation* untuk analisis data, data hasil simulasi akan dilakukan pengolahan data lebih lanjut dengan menggunakan *software Fluent. software*

ini dapat memberikan visualisasi serta membuat data dapat lebih mudah dipahami dan dilakukan analisis. Pada *software* ini dapat juga dibuat animasi berupa proses pengisian dan dampak dari tekanan yang terjadi dari data hasil simulasi yang telah dilakukan.

3.6 Jadwal Penelitian

ketika penelitian berlangsung yang diawali dengan penentuan judul penelitian sampai akhir penelitian terdapat jadwal penelitian yang disusun. Berikut *gantchart* yang sudah penulis susun.

Tabel 3.1 *Ganttchart* penelitian

No	kegiatan	%	Waktu Pelaksanaan																											
			Januari				Februari				Maret				April				Mei				Juni							
			Minggu Ke																											
			1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4				
1	Konsul	5%																												
2	Proposal	15%																												
3	Konsul	5%																												
4	Seminar Proposal	10%																												
5	Proses Simulasi	20%																												
6	Skripsi	20%																												
7	Konsul Skripsi	10%																												
8	Seminar Hasil	15%																												
	total	100%																												

BAB IV

ANALISIS DATA

4.1 Referensi Dimensi Tangki Hidrogen

Pada perancangan tangki hydrogen pada mobil EV JTM mengambil referensi sebagai berikut:



Gambar 4.1 Tangki Oksigen

Tabel 4.1 *Main Dimension*

Diameter Tangki	140 mm
Tinggi Tangki	600 mm
Tebal Tangki	5 mm

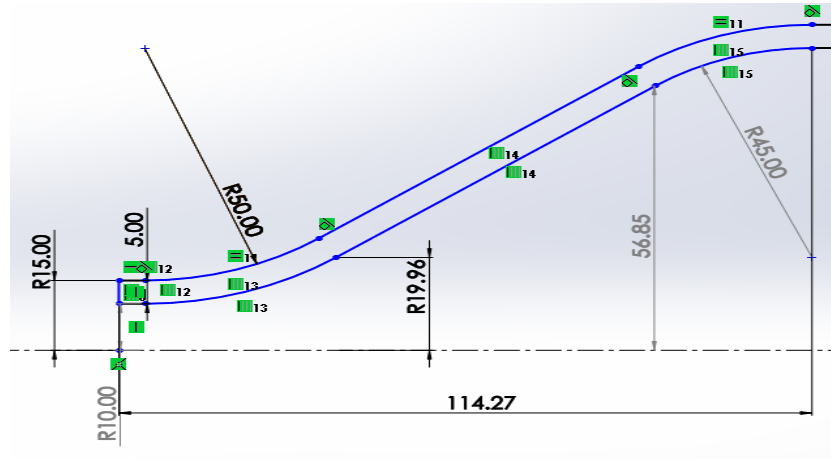
Pada tabel 4.1, dapat dilihat bahwa tabel tersebut menunjukkan dimensi yang ada pada tangki referensi. Diameter tangki oksigen yaitu 140 mm, tinggi tangki 600 mm, dan tebal tangki sebesar 5 mm. dimensi yang sudah diukur akan dijadikan sebagai referensi untuk mendesain tangka hydrogen yang akan disimulasikan.

4.2 Proses Perancangan Tangki Hidrogen

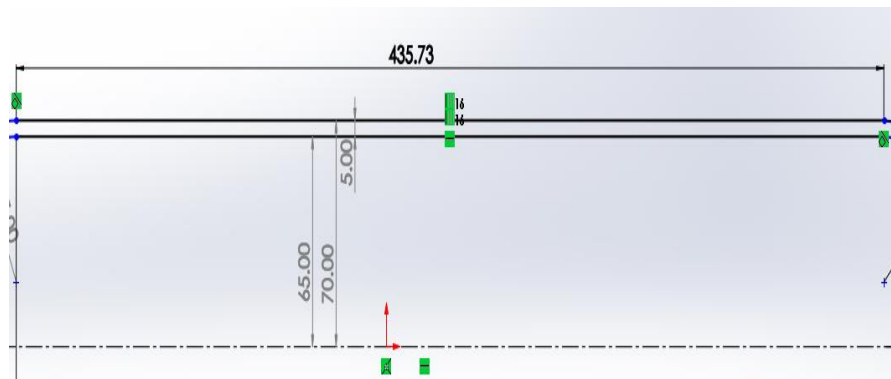
Proses perancangan tangki hydrogen terbagi menjadi 3. Yaitu perancangan tangki tipe 1, perancangan tangki tipe 2, dan perancangan tangki tipe 3. Berikut dari masing-masing perancangan dari setiap tipe tangki

1. Tipe 1

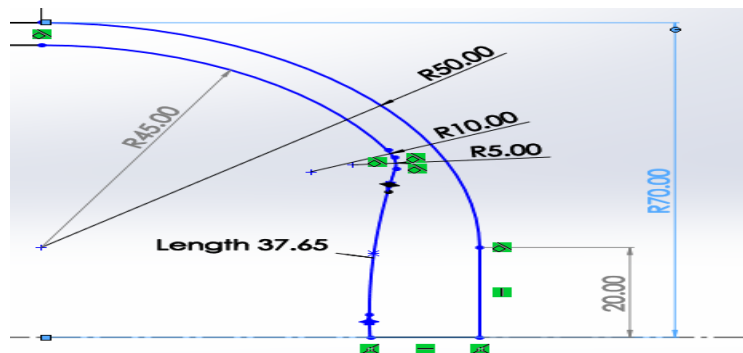
Untuk mendesain tangki tipe 1, diperlukan referensi dimensi yang sudah tertera pada subbab sebelumnya. Berikut proses perancangan tabung hidrogen tipe 1:



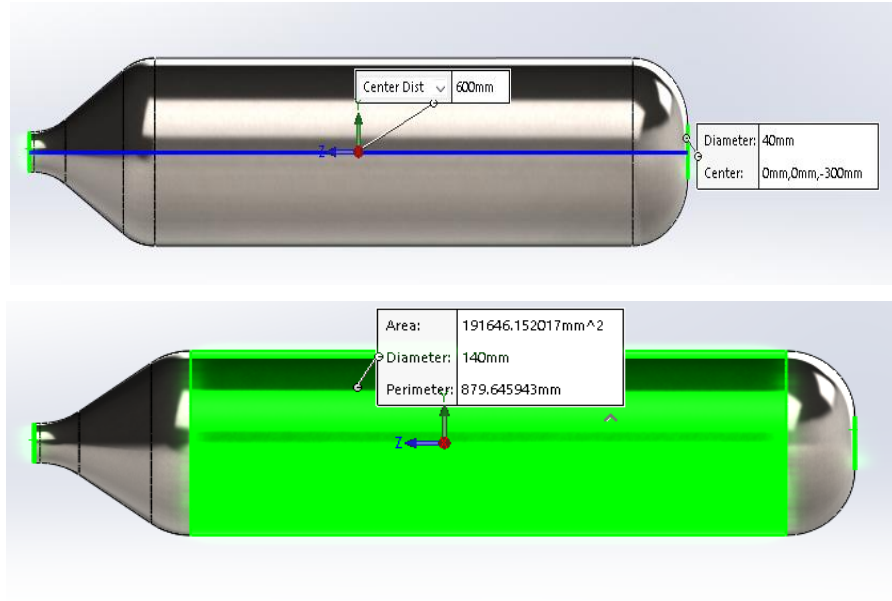
Gambar 4.2 Proses desain bagian atas



Gambar 4.3 Proses desain bagian tengah



Gambar 4.4 Proses desain bagian bawah



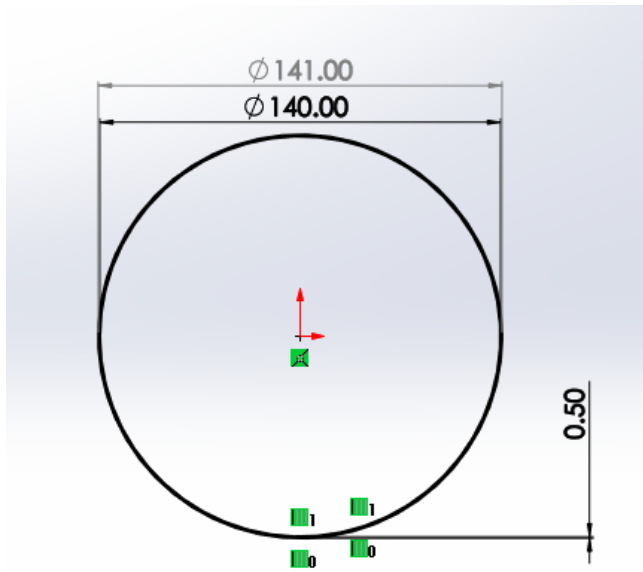
Gambar 4.5 General Dimension tank type 1



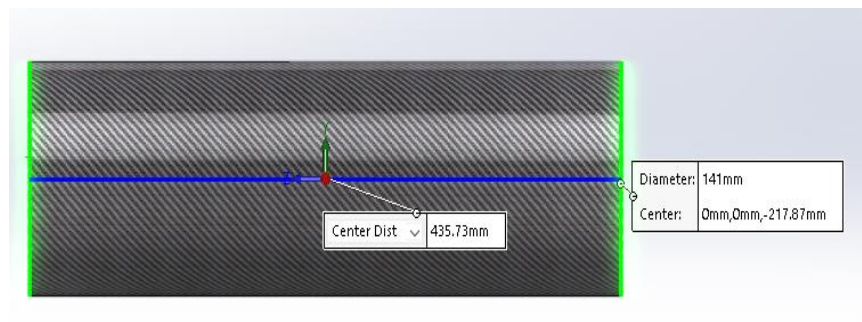
Gambar 4.6 General Dimension tank type 1

2. Tipe 2

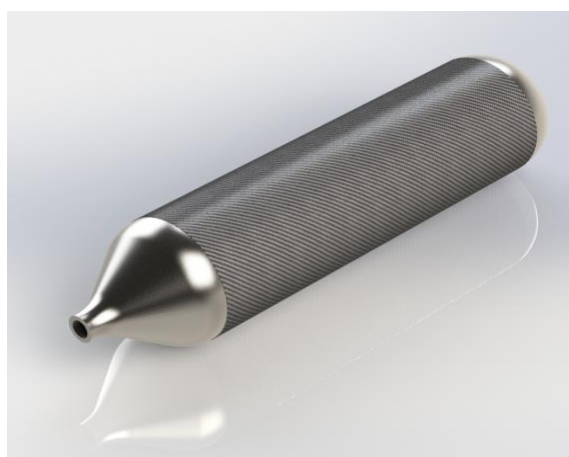
Untuk mendesain tangki tipe 2, tidak diperlukan desain tangki. hanya saja memerlukan desain *Wrapping* dari *Carbon Fiber*. *Coating* tipe 2 berbentuk *hoop*. Berikut proses perancangan tabung hidrogen tipe 2:



Gambar 4.7 Proses pembuatan silinder *Wrapping*



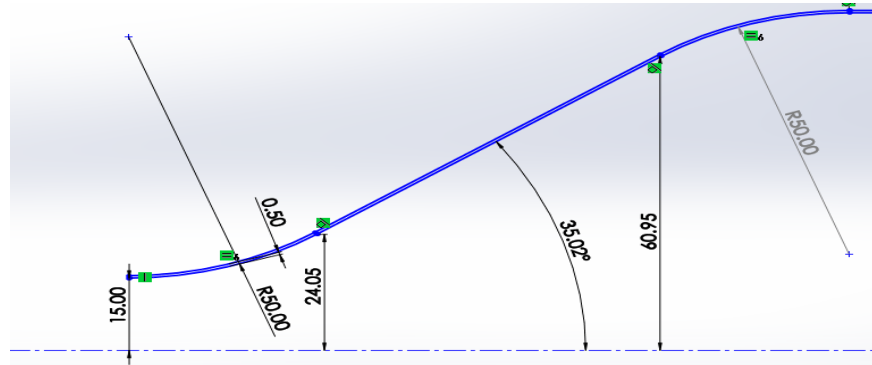
Gambar 4.8 *General dimension Wrapping type 2*



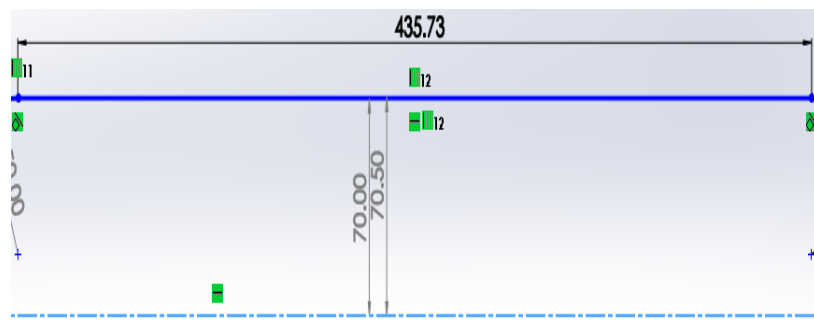
Gambar 4.9 Tangki tipe 2

3. Tipe 3

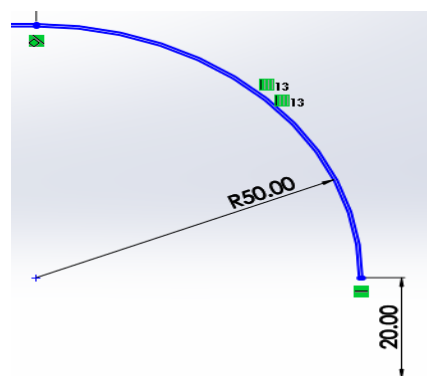
Untuk mendesain tangki tipe 3, tidak diperlukan desain tangki. hanya saja memerlukan desain *Coating* dari *Carbon Fiber*. *Coating* tipe 3 berbentuk *hoop* dan *polar*. Berikut proses perancangan tabung hidrogen tipe 3:



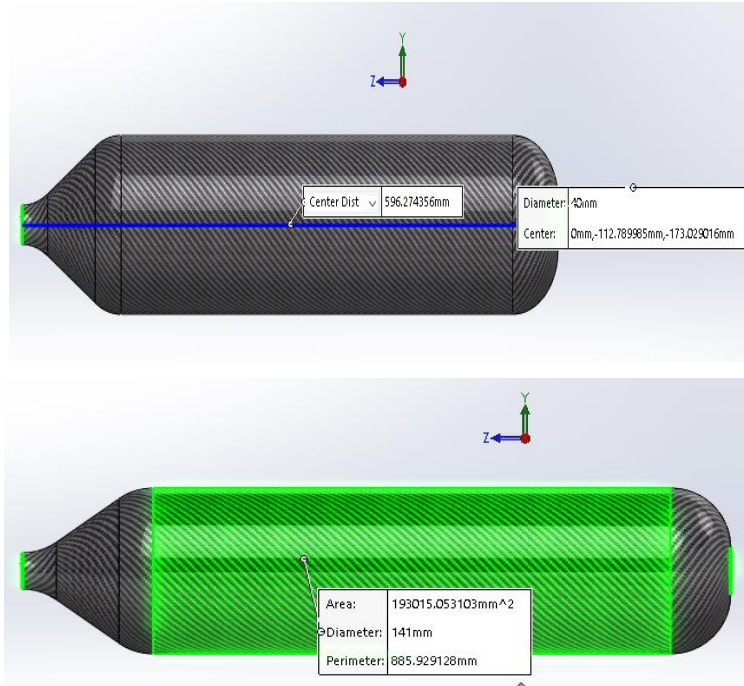
Gambar 4.10 Proses desain bagian atas



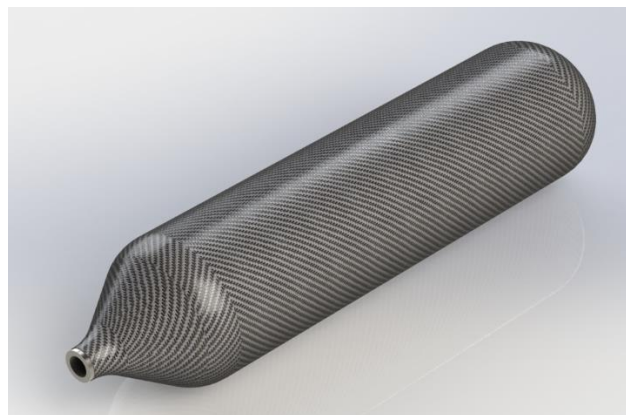
Gambar 4.11 Proses desain bagian tengah



Gambar 4.12 Proses desain bagian bawah



Gambar 4.13 *general dimension Wrapping type 3*

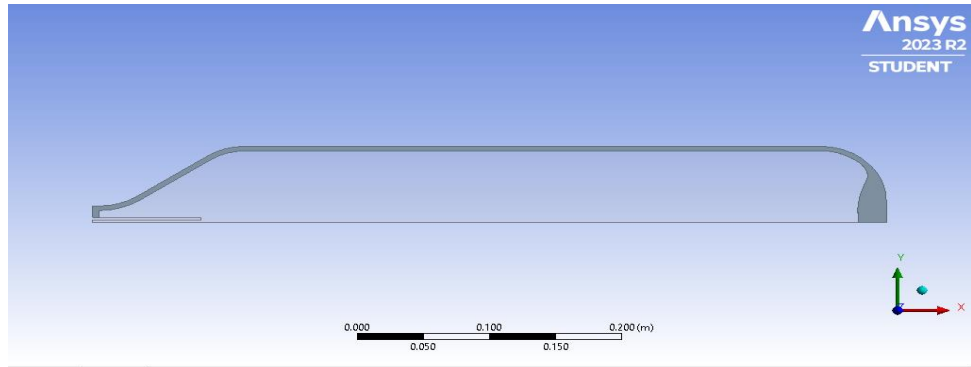


Gambar 4.14 *Tangki tipe 3*

4.3 Parameter yang digunakan dalam CFD

Setelah mendesain menggunakan aplikasi *Solidworks*, maka perlu di-*convert* kedalam *Ansys Workbench*. Penelitian ini menggunakan aplikasi *Ansys* karena memerlukan hasil simulasi CFD (*Computational Fluid Dynamics*). Dikatakan demikian karena *Hydrogen* yang masuk kedalam tabung bergerak, dan akan terperangkap didalam tabung. Untuk mempermudah dan menyederhanakan proses simulasi, gambar yang mulanya berbentuk 3 Dimensi akan diubah menjadi 2 Dimensi. Menurut *User Guide*

Ansys, dikarenakan simulasi 3D merupakan simulasi yang kompleks, maka gambar dapat diubah menjadi 2D dengan syarat penambahan Axis pada desain supaya dapat di asumsikan berbentuk silinder.

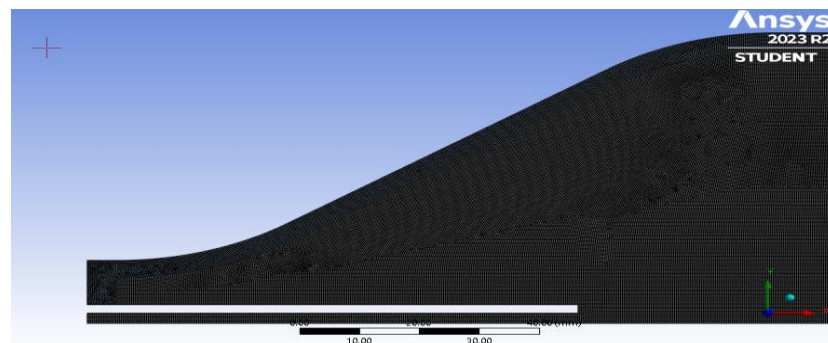


Gambar 4.15 Simplifikasi Gambar

Setelah melaksanakan simplifikasi gambar, berikutnya yaitu proses *Meshing*. Proses ini termasuk kedalam proses *Pre-Processing*. Pada proses ini, desain 2D akan didefinisikan sebagai *surface* yang akan dibagi-bagi menjadi bagian elemen kecil. Berikut *set-up* yang akan di lakukan.

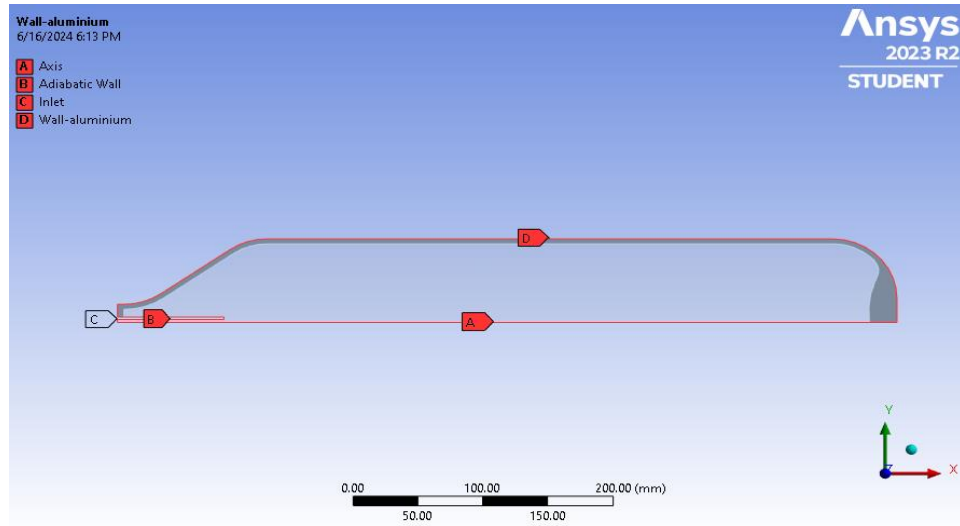
Tabel 4.2 *Meshing Parameter*

No	Parameter	Keterangan
1	Physics Preference	CFD
2	Solver Preference	Fluent
3	Element Order	Quadratic
4	Element Size	0.3 mm
5	Growth Rate	1.2 (default)
6	Elements	422963



Gambar 4.16 Hasil Meshing

Setelah proses *Meshing*, desain 2 D akan ditentukan beberapa *Boundary* yang mempengaruhi hasil simulasi, terdapat 4 *Boundary*. Yaitu *Axis*, *Wall*, *Inlet*, dan *Adiabatic Wall*. Berikut visualisasi-nya.



Gambar 4.17 *Boundary Condition*

Berikut merupakan penjelasan dari gambar 4.17. Bagian A, dikarenakan desain tabung berbentuk 2 D dan hanya $\frac{1}{2}$ saja yang digambar, maka diperlukan parameter *Axis* untuk membuat logika desain *Surface* pada desain berbentuk silinder. Sehingga diperoleh hasil simulasi yang aktual. Bagian B, *Adiabatic Wall* merupakan dinding yang tidak dapat dipengaruhi oleh suhu ataupun tekanan. Sehingga *adiabatic wall* ini di-asumsikan sebagai *nozle* hidrogen yang masuk kedalam tangki. Bagian C, karena penelitian ini merupakan proses pengisian tangki hidrogen, maka diperlukan inlet yang mana berfungsi sebagai jalur masuknya hidrogen kedalam tangki. Bagian D, merupakan *Boundary Layer* antara permukaan paling luar tabung dengan kondisi sekitar.

Berikutnya yaitu *setup* pada aplikasi *Ansys Fluent*. Aplikasi ini berfungsi untuk mensimulasikan proses pengisian tangki hidrogen. Proses simulasi ini dapat mengambil waktu yang lumayan lama. Sehingga diperlukan ketelitian dalam proses *setup*-nya. Berikut dibawah ini merupakan parameter yang digunakan dalam proses simulasi pengisian tangki hidrogen.

Tabel 4.3 *Simulation Parameter*

No	Parameter	Keterangan
1	Energy Model	On
2	Viscous Model	On (K-epsilon)
3	Mass Flow Rate	0.01 kg/s
4	Initial Pressure Gauge	2 Bar
5	Inlet Temperature	293 K
6	Timestep	5000
7	Flow time per timestep	0.05 s
8	Iteration per timestep	20

Menurut Monteiro *et al* (2024) *Mass Flow Rate* pada simulasi pengisian tangki hidrogen, diberikan *range* minimum dan maksimum. Yaitu 0.001 kg/s sampai dengan 0,06 kg/s. diberikan batasan minimum dan maksimum supaya tidak merubah sifat-sifat mekanik maupun fisik dari material secara signifikan. Hal ini harus diperhatikan guna keamanan ketika proses pengisian tabung hidrogen.

Menurut Monteiro *et al* (2024) *Initial Pressure Gauge* atau bisa kita sebut sebagai tekanan mula-mula pada tangki diasumsikan sebagai kondisi tangki yang *vacuum*, Dan menyisakan gas hidrogen sebesar 2 bar dari kondisi penuhnya. Dibuat kondisi seperti ini karena bila diisi dari tekanan 0 bar, maka tangki perlu di-*vacuum* kan kembali supaya dapat diisi hidrogen. Pada penelitian Monteiro *et al* (2024) kebanyakan sampel simulasi menggunakan *Inlet temperature* sebesar 293 K, sehingga membuat penulis menentukan *inlet temperature* pada penelitian ini sebesar 293 K.

4.4 Hasil simulasi Hydrogen Tank Tipe 1

Dari hasil simulasi, akan dilaksanakan pengolahan data untuk melihat karakteristik parameter yang disimulasikan pada tangki hidrogen tipe 1. Data yang diperoleh akan di analisis. Dari hasil simulasi, terdapat 3 parameter yang difokuskan dari 3 sample pengujian *Hydrogen Tank* tipe 1 ini. Yaitu *Absolute Pressure*, *Static Temperature*, dan *Density*. Dari Ke-3 sample ini akan dipilih

sample terbaik untuk analisis perbandingan antara tangki tipe 1, tipe 2, dan tipe 3.

Tabel 4.4 Hasil Simulasi Tank Type 1

TIPE 1								
Time Step	Fuelling Time (s)	n	Pressure (bar)		Temperature (C)		Density (kg/m ³)	
			MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
0	0	1	2	2	16	16	1.7	1.7
		2	2	2	16	16	1.7	1.7
		3	2	2	16	16	1.7	1.7
1000	50	1	168.595	168.626	16.8485	19.812	12.5	12.6
		2	161.27	161.303	16.8485	19.8087	12	12.1
		3	168.595	168.626	16.8485	19.812	12.5	12.6
2000	100	1	237.695	237.719	16.8485	19.824	16.6	17.1
		2	230.277	230.301	16.8485	19.8299	16.5	16.6
		3	237.695	237.719	16.8485	19.824	15.6	17
3000	150	1	285.514	285.536	16.8485	19.8309	18.5	18.7
		2	277.77	277.726	16.8485	19.8324	17.9	19
		3	285.514	285.536	16.8485	19.8309	18.5	18.7
4000	200	1	327.65	327.67	16.8485	19.8355	21.3	21.5
		2	322.034	322.053	16.8485	19.8354	20.9	21.1
		3	327.65	327.67	16.8485	19.8355	21.3	21.5
5000	250	1	364.6	364.7	16.8485	19.8383	23.7	23.9
		2	360.05	360.07	16.8485	19.8382	23.4	23.6
		3	364.6	364.7	16.8485	19.8383	23.7	23.9

Dari data yang ditunjukkan oleh tabel 4.4, akan dibuat grafik perbandingan antara masing-masing sampel. Dengan parameter fokus utama, Yaitu *Absolute Pressure*, *Static Temperature*, dan *Density*. Berikut grafik *Absolute Pressure* dari ke-3 sampel simulasi tipe 1.

Tabel 4.5 Max Pressure Tank Type 1

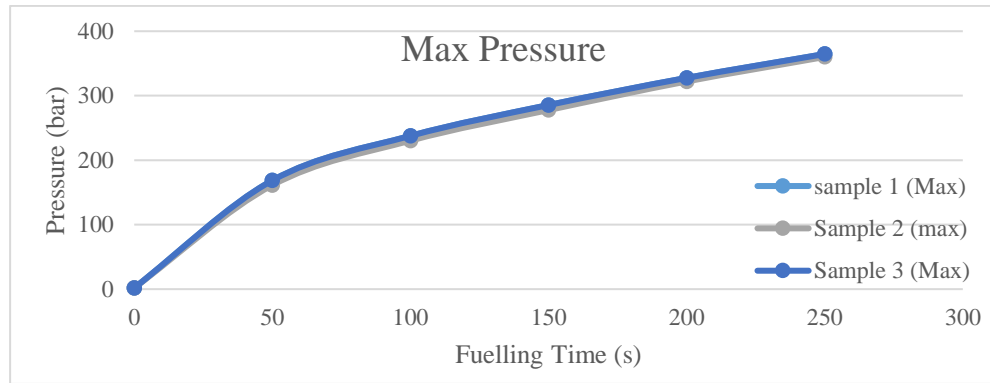
Max Pressure (bar)				
Time Step	Fuelling Time (s)	Sample		
		1	2	3
0	0	2	2	2
1000	50	168.626	161.303	168.626

2000	100	237.719	230.301	237.719
3000	150	285.536	277.726	285.536
4000	200	327.67	322.053	327.67
5000	250	364.7	360.07	364.7

Untuk menentukan sampel mana yang memenuhi standar ISO 11439:2013 tentang minimum dan maksimum tekanan pada tangki hidrogen, nilai tekanan maksimum dari masing-masing sampel yang tercantum pada tabel 4.5 berikan perlu dibandingkan. Dari ketiga sampel tersebut, kita perlu mencari nilai tekanan tertinggi di setiap sampel: Sampel 1 memiliki tekanan tertinggi sebesar 364.7 bar. Sampel 2 memiliki tekanan tertinggi sebesar 360.07 bar. Sampel 3 memiliki tekanan tertinggi sebesar 364.7 bar. Standar ISO 11439:2013 untuk tangki hidrogen tipe 1 menetapkan batas minimum sebesar 200 bar dan batas maksimum tekanan kerja (*Working Pressure*) sebesar 700 bar. Hal ini berarti tangki tersebut tidak boleh digunakan di bawah atau di atas tekanan yang tercantum pada standar ISO 11439:2013 untuk memastikan keamanan.

Dari ketiga sampel yang diberikan, semua nilai tekanan (maksimum) yang tercantum jauh di bawah batas maksimum 700 bar yang diatur oleh standar ISO 11439:2013. Sampel 1 dan 3 memiliki tekanan tertinggi dengan nilai 364.7 bar, diikuti oleh Sampel 2 dengan nilai 360.07 bar. Kedua sampel ini berada jauh di bawah batas minimum dan maksimum yang diizinkan.

Ketiga sampel (Sampel 1, Sampel 2, dan Sampel 3) memenuhi standar ISO 11439:2013 tentang minimum dan maksimum tekanan pada tangki hidrogen tipe 1 karena nilai tekanan minimum dan maksimum yang tercatat pada semua sampel berada jauh di atas dan bawah batas minimum-maksimum yang diizinkan sebesar 200 bar s/d 700 bar. Oleh karena itu, dari segi tekanan, ketiga sampel ini dapat digunakan dengan aman sesuai dengan standar yang ditetapkan.



Gambar 4.18 Grafik *Max Pressure tank Type 1*

Dari grafik diatas. dapat diketahui bahwa, pada waktu 0 s, semua sampel memiliki tekanan awal yang sama, yaitu 2 bar. Pada waktu 50 s, sampel 1 dan 3 memiliki tekanan 168.626 bar, sedangkan sampel 2 memiliki tekanan 161.303 bar. Tekanan pada sampel 1 dan 3 lebih tinggi dibandingkan sampel 2. Pada waktu 100 s, sampel 1 dan 3 memiliki tekanan 237.719 bar, sedangkan sampel 2 memiliki tekanan 230.301 bar. Kembali, tekanan pada sampel 1 dan 3 lebih tinggi. Proses perbandingan dapat dilanjutkan hingga waktu 250 s. Tekanan maksimum pada tangki hidrogen tipe 1 dan 3 adalah 364.7 bar. Berdasarkan analisis flow time, terlihat bahwa sampel 1 dan 3 memiliki tekanan yang sedikit lebih tinggi daripada sampel 2 pada setiap titik waktu yang diukur. Ini menunjukkan bahwa sampel 1 dan 3 memiliki kinerja yang sedikit lebih baik dalam mempertahankan tekanan dalam rentang waktu yang diberikan dibandingkan dengan sampel 2.

Dari data yang ditunjukkan oleh tabel 4.4, akan dibuat grafik perbandingan antara masing-masing sampel. Dengan parameter fokus utama, Yaitu *Absolute Pressure*, *Static Temperature*, dan *Density*. Berikut grafik *Maximum Temperature* dari ke-3 sampel simulasi tipe 1.

Tabel 4.6 *Max Temperature Tank Type 1*

Max Temperature (°C)				
Time Step	Fuelling Time (s)	Sample		
		1	2	3
0	0	16	16	16
1000	50	19.812	19.8087	19.812

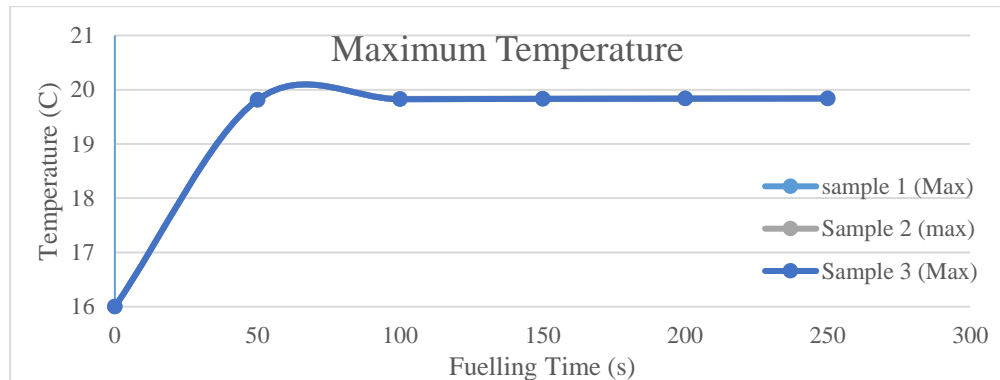
2000	100	19.824	19.8299	19.824
3000	150	19.8309	19.8324	19.8309
4000	200	19.8355	19.8354	19.8355
5000	250	19.8383	19.8382	19.8383

Untuk menganalisis hasil sampel terbaik dari data yang diberikan dan membandingkannya dengan standar ISO 11439:2013 mengenai suhu, kita harus melakukan beberapa langkah analisis sederhana. Berikut adalah data suhu maksimum yang telah diperoleh dari simulasi untuk tiga sampel tangki hidrogen tipe 1. Suhu maksimum Sampel 1: 19.8383 °C. Suhu maksimum Sampel 2: 19.8382 °C. Suhu maksimum Sampel 3: 19.8383 °C. Selanjutnya, kita melihat bahwa suhu maksimum dari ketiga sampel sangat konsisten, berkisar antara 19.8382 °C hingga 19.8383 °C. Hal ini menunjukkan bahwa pengukuran suhu ketika simulasi pada ketiga sampel memiliki tingkat keseragaman yang sangat tinggi.

ISO 11439:2013 adalah standar internasional yang mengatur persyaratan desain, konstruksi, dan pengujian untuk tangki penyimpanan hidrogen berbahan dasar baja atau bahan komposit yang digunakan pada kendaraan bermotor. Salah satu aspek penting dari standar ini adalah batas suhu operasi tangki hidrogen. Berdasarkan ISO 11439:2013, tangki hidrogen harus mampu beroperasi dengan aman dalam rentang suhu dari -40 °C hingga +85 °C.

Setelah mengetahui batas suhu operasi yang diizinkan oleh standar, kita dapat membandingkan hasil pengukuran suhu maksimum pada sampel dengan batas tersebut. Suhu maksimum yang tercatat pada ketiga sampel adalah sekitar 19.8383 °C, yang berada jauh di bawah batas maksimum yang diizinkan, yaitu +85 °C. Selain itu, suhu ini juga berada di atas batas minimum -40 °C yang ditetapkan oleh standar. Berdasarkan analisis yang dilakukan, suhu maksimum yang tercatat pada ketiga sampel tangki hidrogen tipe 1 adalah 19.8383 °C, yang menunjukkan tingkat keseragaman tinggi antara sampel. Suhu maksimum ini berada dalam rentang suhu operasi yang aman dan diizinkan oleh ISO 11439:2013, yaitu antara -40 °C hingga +85 °C. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa tangki hidrogen tipe 1 yang

disimulasikan memenuhi persyaratan standar internasional terkait suhu operasi. Tidak ada perbedaan signifikan antara hasil simulasi pada ketiga sampel, menunjukkan bahwa tangki-tangki ini menunjukkan performa yang konsisten dan andal dalam hal suhu operasi. Hal ini memberikan kesimpulan bahwa tangki-tangki tersebut aman untuk digunakan dalam aplikasi kendaraan sesuai dengan standar ISO 11439:2013.



Gambar 4.19 Grafik *Max Temperature tank Type 1*

Dari data yang diberikan, kita dapat melihat bahwa temperatur maksimum pada tangki hidrogen tipe 1 terjadi pada beberapa titik waktu yang berbeda. Kita dapat melihat bahwa temperatur naik seiring berjalannya waktu aliran (flow time). Hal ini menunjukkan bahwa semakin lama gas mengalir melalui tangki, semakin panas suhunya. Namun, perbedaan temperatur antara sampel-sampel sangat kecil dan cenderung konstan dari waktu ke waktu, yang mengindikasikan bahwa tangki dapat mempertahankan suhu yang stabil pada tingkat tertentu selama aliran gas berjalan.

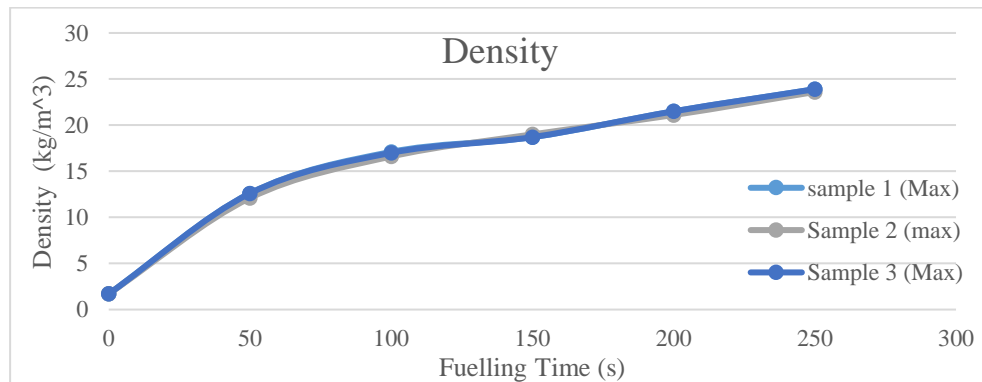
Dari data yang ditunjukkan oleh tabel 4.4, akan dibuat grafik perbandingan antara masing-masing sampel. Dengan parameter fokus utama, yaitu *Absolute Pressure*, *Static Temperature*, dan *Density*. Berikut grafik *Maximum Density* dari ke-3 sampel simulasi tipe 1.

Tabel 4.7 Max Density Tank Type 1

Density (kg/m ³)				
Time Step	Fuelling Time (s)	Sample		
		1	2	3
0	0	1.7	1.7	1.7
1000	50	12.6	12.1	12.6
2000	100	17.1	16.6	17
3000	150	18.7	19	18.7
4000	200	21.5	21.1	21.5
5000	250	23.9	23.6	23.9

Untuk menentukan sampel mana yang memiliki densitas terbaik berdasarkan standar ISO 11439:2013, kita perlu memeriksa apakah ada ketentuan khusus yang diberlakukan oleh standar tersebut. Standar ISO 11439:2013 memberikan spesifikasi untuk tabung gas hidrogen kompresi untuk penggunaan pada kendaraan bertenaga hidrogen dan infrastruktur bahan bakar hidrogen. Namun, standar ini tidak secara khusus memberikan persyaratan untuk densitas gas hidrogen.

Secara umum, densitas gas hidrogen dipengaruhi oleh tekanan dan suhu gas tersebut. Densitas yang lebih tinggi dapat dianggap lebih baik karena menyimpan lebih banyak energi dalam volume yang sama. Oleh karena itu, untuk menentukan sampel mana yang memiliki densitas terbaik, kita akan mencari nilai densitas tertinggi pada setiap titik waktu aliran.



Gambar 4.20 Grafik Max Density tank Type 1

Dari grafik diatas, terlihat bahwa kita memiliki data kepadatan (densitas) untuk tiga sampel dari tangki hidrogen tipe 1. Dari data tersebut akan di analisis dan dibandingkan sampel-sampel berdasarkan *flow time*. Pada waktu 0 s, semua sampel memiliki kepadatan awal yang sama, yaitu 1.7 kg/m^3 . Pada waktu 50 s, tampaknya tidak ada perubahan yang signifikan dalam kepadatan di antara sampel-sampel. Pada waktu 100 s, terlihat sedikit perbedaan antara sampel-sampel. Sampel 2 memiliki kepadatan sedikit lebih rendah dibandingkan dengan Sampel 1 dan Sampel 3. Proses perbandingan dapat dilanjutkan hingga waktu 250 s.

Berdasarkan data kepadatan yang diberikan, tidak ada perbedaan yang signifikan antara sampel-sampel pada setiap titik waktu. Pada beberapa titik waktu tertentu, terlihat sedikit perbedaan dalam kepadatan antara sampel-sampel, namun perbedaannya tidak signifikan. Secara keseluruhan, tidak ada perbedaan yang mencolok dalam kepadatan antara sampel-sampel berdasarkan *flow time*.

4.5 Hasil simulasi Hydrogen Tank Tipe 2

Dari hasil simulasi, akan dilaksanakan pengolahan data untuk melihat karakteristik parameter yang disimulasikan pada tangki hidrogen tipe 2. Data yang diperoleh akan di analisis. Dari hasil simulasi, terdapat 3 parameter yang difokuskan dari 3 sample pengujian *Hydrogen Tank* tipe 1 ini. Yaitu *Absolute Pressure*, *Static Temperature*, dan *Density*. Dari Ke-3 sample ini akan dipilih sample terbaik untuk analisis perbandingan antara tangki tipe 1, tipe 2, dan tipe 3.

Tabel 4.8 Hasil Simulasi Tank Type 1

TIPE 2								
Time Step	Fueling Time (s)	n	Pressure (bar)		Temperature (C)		Density (kg/m^3)	
			MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
0	0	1	2	2	16	16	1.7	1.7
		2	2	2	16	16	1.7	1.7
		3	2	2	16	16	1.7	1.7
1000	50	1	205.0748	205.1006	19.80654	34.41454	14.30723	14.95006

		2	205.0748	205.1006	19.80654	34.41454	14.30723	14.95006
		3	205.0748	205.1006	19.80654	34.41454	14.30723	14.95006
2000	100	1	272.1375	272.1557	19.67358	31.73165	17.72045	18.64266
		2	272.1375	272.1557	19.67358	31.73165	17.72045	18.64266
		3	272.1375	272.1557	19.67358	31.73165	17.72045	18.64266
3000	150	1	322.565	322.5751	19.8257	29.15377	20.38709	21.00449
		2	322.565	322.5751	19.8257	29.15377	20.38709	21.00449
		3	322.565	322.5751	19.8257	29.15377	20.38709	21.00449
4000	200	1	366.888	366.9642	19.83166	26.94253	23.34319	23.89063
		2	366.888	366.9642	19.83166	26.94253	23.34319	23.89063
		3	366.888	366.9642	19.83166	26.94253	23.34319	23.89063
5000	250	1	407.5728	407.5893	19.47131	31.74719	23.62449	25.58693
		2	407.5728	407.5893	19.47131	31.74719	23.62449	25.58693
		3	407.5728	407.5893	19.47131	31.74719	23.62449	25.58693

Dari data yang ditunjukkan oleh tabel 4.8, akan dibuat grafik perbandingan antara masing-masing sampel. Dengan parameter fokus utama, yaitu *Absolute Pressure*, *Static Temperature*, dan *Density*. Berikut grafik *Absolute Pressure* dari ke-3 sampel simulasi tipe 2.

Tabel 4.9 *Max Pressure Tank Type 2*

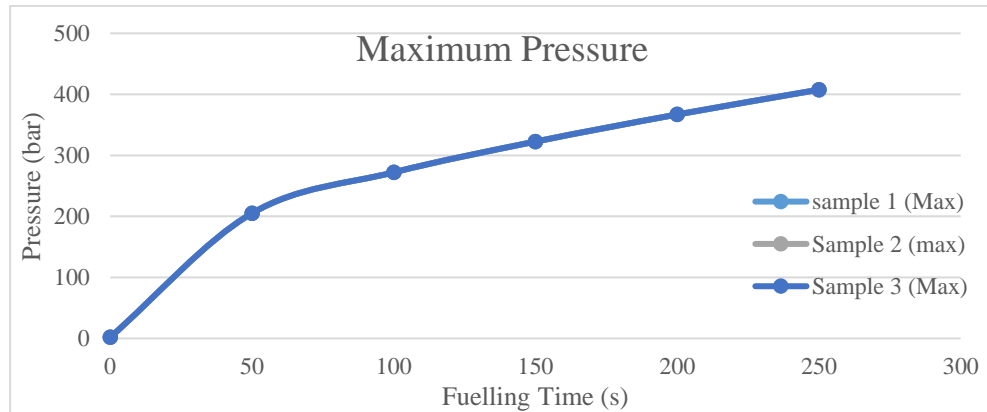
Max Pressure				
Time Step	Fuelling Time (s)	Sample		
		1	2	3
0	0	2	2	2
1000	50	205.101	205.101	205.101
2000	100	272.156	272.156	272.156
3000	150	322.575	322.575	322.575
4000	200	366.964	366.964	366.964
5000	250	407.589	407.589	407.589

Dari data yang ada pada tabel 4.9, terlihat bahwa semua sampel memiliki nilai tekanan yang sama pada setiap titik waktu aliran. Hal ini mungkin disebabkan oleh beberapa faktor:

- Pengaturan Awal yang Serupa: Mungkin ada pengaturan awal yang serupa untuk semua simulasi, yang menghasilkan nilai tekanan awal yang identik untuk setiap sampel.
- Model yang Sama: Kemungkinan besar, semua sampel menggunakan model yang sama dalam simulasi Ansys Fluent, sehingga menghasilkan hasil yang serupa.
- Parameter Simulasi yang Sama: Selain itu, mungkin juga ada parameter simulasi yang sama, seperti suhu awal, volume tangki, atau kecepatan aliran, yang menyebabkan hasil yang seragam.

Meskipun nilai tekanan pada semua sampel sama, kita masih dapat mengevaluasi sampel terbaik berdasarkan standar ISO 11439:2013 mengenai tekanan maksimum dan minimum. Jika nilai tekanan pada setiap sampel memenuhi persyaratan standar, maka semua sampel dapat dianggap sebagai pilihan yang baik. Standar ISO 11439:2013 untuk tangki hidrogen menetapkan batas minimum sebesar 200 bar dan batas maksimum tekanan kerja (*Working Pressure*) sebesar 700 bar. Dari data yang kita peroleh berdasarkan hasil dari simulasi. Diketahui bahwa setiap sampel memiliki tekanan maksimum sebesar 407.589 bar. Dengan artian bahwa seluruh sampel tangki tipe 2 dapat memenuhi standar ISO 11439:2013.

Ketiga sampel (Sampel 1, Sampel 2, dan Sampel 3) memenuhi standar ISO 11439:2013 tentang minimum dan maksimum tekanan pada tangki hidrogen tipe 1 karena nilai tekanan minimum dan maksimum yang tercatat pada semua sampel berada jauh di atas dan bawah batas minimum-maksimum yang diizinkan sebesar 200 bar s/d 700 bar. Oleh karena itu, dari segi tekanan, ketiga sampel ini dapat digunakan dengan aman sesuai dengan standar yang ditetapkan.



Gambar 4.21 Grafik *Max Pressure tank Type 2*

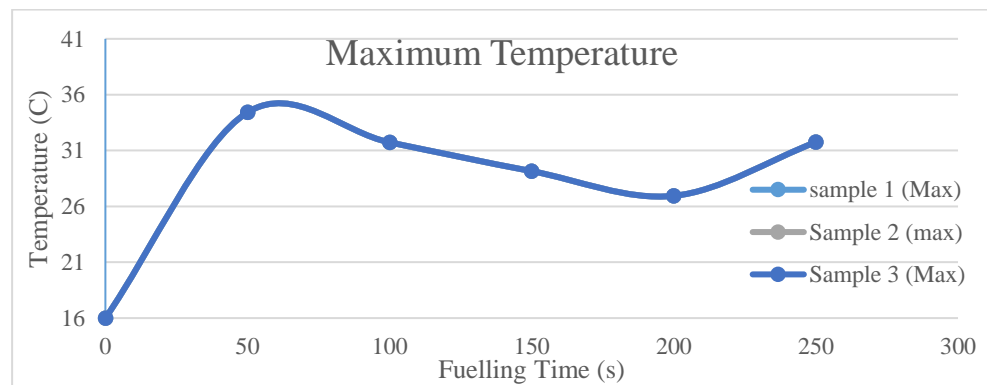
Dari grafik pada gambar 4.21, terlihat bahwa tekanan pada semua sampel cenderung meningkat seiring dengan waktu. Namun, karena data tekanan yang diberikan identik untuk setiap sampel pada setiap interval waktu, tidak mungkin memilih sampel yang terbaik berdasarkan analisis flow time saja. Dikarenakan data tekanan setiap sampel identik, maka tidak ada sampel yang secara khusus dijadikan sampel dari tangki hidrogen 2 tipe ini. Dengan kata lain, ketiga-nya dapat dijadikan sebagai sampel perbandingan dari ketiga tipe tangki.

Dari data yang ditunjukkan oleh tabel 4.4, akan dibuat grafik perbandingan antara masing-masing sampel. Dengan parameter fokus utama, Yaitu *Absolute Pressure*, *Static Temperature*, dan *Density*. Berikut grafik *Maximum Temperature* dari ke-3 sampel simulasi tipe 2.

Tabel 4.10 *Max Temperature Tank Type 2*

Max Temperature				
Time Step	Fuelling Time (s)	Sample		
		1	2	3
0	0	16	16	16
1000	50	34.4145	34.4145	34.4145
2000	100	31.7317	31.7317	31.7317
3000	150	29.1538	29.1538	29.1538
4000	200	26.9425	26.9425	26.9425
5000	250	31.7472	31.7472	31.7472

Untuk menganalisis hasil sampel terbaik dari data yang diberikan dan membandingkannya dengan standar ISO 11439:2013 mengenai suhu, kita harus melakukan beberapa langkah analisis sederhana. Berikut adalah data suhu maksimum yang telah diperoleh dari simulasi untuk tiga sampel tangki hidrogen tipe 1. Berdasarkan ISO 11439:2013, tangki hidrogen harus mampu beroperasi dengan aman dalam rentang suhu dari $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ hingga $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. dikarenakan ketiga sampel memiliki hasil yang identik, maka tidak diperlukan perbandingan dari ketiga sampel. Desain tangki hidrogen tipe 2 ini memiliki tempratur maksimum sebesar $31.7472\text{ }^{\circ}\text{C}$. nilai tersebut masih berada diatas tempratur minimumyaitu $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ dan dibawah suhu maksimum yaitu $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa tangki hidrogen tipe 2 yang disimulasikan memenuhi persyaratan standar internasional terkait suhu operasi. Hal ini memberikan kesimpulan bahwa tangki-tangki tersebut aman untuk digunakan dalam aplikasi kendaraan sesuai dengan standar ISO 11439:2013.



Gambar 4.22 Grafik *Max Temperature tank Type 2*

Dari grafik pada gambar 4.22, terlihat bahwa kita memiliki data suhu untuk tiga sampel dari tangki hidrogen tipe 2 pada berbagai iterasi dan *flow time*. Pada waktu 0 s, semua sampel memiliki temperatur awal yang sama, yaitu 16°C . Pada waktu 50 s, temperatur semua sampel naik menjadi 34.414°C . Pada waktu 100 s ampai dengan 200 s , temperatur semua sampel menurun sampai dengan 26.9425°C . dan pada waktu 250 s, temperatur seluruh sampel

naik kembali menjadi 31.7472°C . dapat diartikan, tempratur maksimum untuk simulasi tangki hidrogen tipe 2 ini sebesar 31.7472°C . Dikarenakan data tekanan setiap sampel identik, maka tidak ada sampel yang secara khusus dijadikan sampel dari tangki hidrogen 2 tipe ini. Dengan kata lain, ketiga-nya dapat dijadikan sebagai sampel perbandingan dari ketiga tipe tangki.

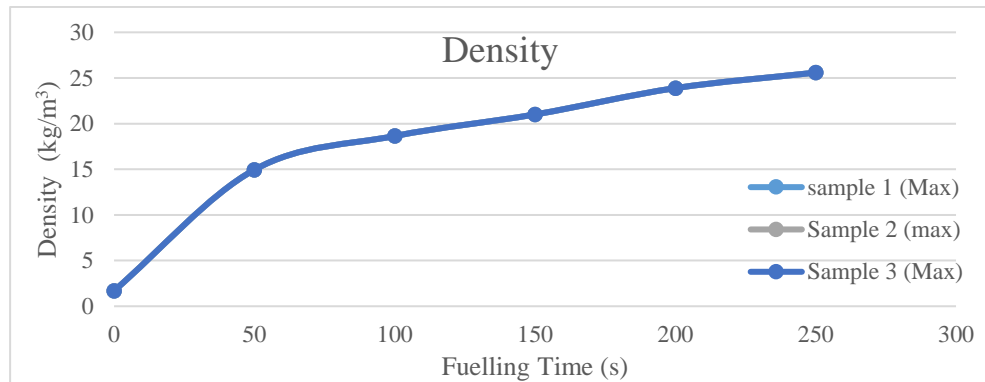
Dari data yang ditunjukkan oleh tabel 4.4, akan dibuat grafik perbandingan antara masing-masing sampel. Dengan parameter fokus utama, Yaitu *Absolute Pressure*, *Static Temperature*, dan *Density*. Berikut grafik *Maximum Density* dari ke-3 sampel simulasi tipe 2.

Tabel 4.11 *Max Density Tank Type 2*

Density				
Time Step	Fuelling Time (s)	Sample		
		1	2	3
0	0	1.7	1.7	1.7
1000	50	14.9501	14.9501	14.9501
2000	100	18.6427	18.6427	18.6427
3000	150	21.0045	21.0045	21.0045
4000	200	23.8906	23.8906	23.8906
5000	250	25.5869	25.5869	25.5869

Semua sampel memiliki nilai densitas yang identik pada setiap titik waktu aliran. Hal ini menunjukkan bahwa pengaturan awal dan parameter simulasi untuk ketiga sampel sangat mungkin sama. Densitas awal untuk semua sampel adalah 1.7 kg/m^3 . Densitas meningkat secara bertahap hingga mencapai nilai maksimum 25.5869 kg/m^3 pada flow time 250 s untuk semua sampel. Kenaikan densitas dari 1.7 kg/m^3 ke 25.5869 kg/m^3 menunjukkan perubahan yang signifikan selama periode waktu aliran. Setiap titik waktu aliran menunjukkan peningkatan yang konsisten dalam densitas, yang mengindikasikan bahwa proses penambahan hidrogen ke dalam tangki berjalan dengan baik dan seragam. Karena semua sampel menunjukkan data yang identik dan tidak ada perbedaan dalam nilai densitas pada setiap titik waktu aliran, maka tidak ada sampel yang bisa dianggap lebih baik atau lebih

buruk dibandingkan yang lain berdasarkan data densitas yang diberikan. Ketiga sampel tersebut memiliki performa yang sama baiknya dalam hal peningkatan densitas selama waktu aliran yang diuji. Oleh karena itu, dalam konteks densitas maksimum, semua sampel bisa dianggap memenuhi standar performa yang sama dan dapat digunakan secara interchangeably.



Gambar 4.23 Grafik *Max Density tank Type 2*

Pada waktu aliran 0 detik, semua sampel memiliki densitas awal yang sama yaitu 1.7 kg/m^3 . Ini adalah densitas awal yang seragam untuk ketiga sampel. Setelah 50 detik, densitas untuk semua sampel meningkat menjadi 14.9501 kg/m^3 . Ini menunjukkan peningkatan signifikan dalam densitas dalam waktu singkat, dan semua sampel menunjukkan peningkatan yang seragam. Pada waktu aliran 100 detik, densitas meningkat lebih lanjut menjadi 18.6427 kg/m^3 untuk semua sampel. Peningkatan ini konsisten di semua sampel. Pada waktu aliran 150 detik, densitas mencapai 21.0045 kg/m^3 untuk semua sampel. Peningkatan ini masih konsisten di semua sampel. Pada waktu aliran 200 detik, densitas meningkat menjadi 23.8906 kg/m^3 untuk semua sampel. Konsistensi peningkatan masih terjaga di semua sampel. Pada waktu aliran 250 detik, densitas maksimum tercapai pada 25.5869 kg/m^3 untuk semua sampel. Ini adalah densitas tertinggi yang dicapai dalam waktu aliran yang diberikan, dan semua sampel menunjukkan nilai yang identik.

Semua sampel menunjukkan nilai densitas yang sama pada setiap titik waktu aliran. Ini menunjukkan bahwa ketiga sampel diproses dalam kondisi yang identik. Densitas Maksimum pada waktu aliran 250 detik, semua sampel mencapai densitas maksimum yang sama yaitu 25.5869 kg/m^3 . Tidak ada

variasi dalam nilai densitas maksimum antar sampel. Berdasarkan data yang diberikan, ketiga sampel memiliki performa yang identik dalam hal peningkatan densitas selama waktu aliran yang diuji. Tidak ada satu sampel pun yang lebih baik dari yang lain berdasarkan data ini karena semuanya menunjukkan hasil yang sama. Jika semua parameter dan kondisi simulasi dipertahankan sama, maka tidak ada perbedaan signifikan antara ketiga sampel. Dalam situasi ini, ketiga sampel dapat dianggap sama baiknya dalam memenuhi kriteria densitas maksimum untuk tangki hidrogen tipe 2. Oleh karena itu, tidak ada satu sampel pun yang bisa dianggap terbaik secara khusus, karena semuanya menunjukkan performa yang identik.

4.6 Hasil simulasi Hydrogen Tank Tipe 3

Dari hasil simulasi, akan dilaksanakan pengolahan data untuk melihat karakteristik parameter yang disimulasikan pada tangki hidrogen tipe 3. Data yang diperoleh akan di analisis. Dari hasil simulasi, terdapat 3 parameter yang difokuskan dari 3 sample pengujian *Hydrogen Tank* tipe 3 ini. Yaitu *Absolute Pressure*, *Static Temperature*, dan *Density*. Dari Ke-3 sample ini akan dipilih sample terbaik untuk analisis perbandingan antara tangki tipe 1, tipe 2, dan tipe 3.

Tabel 4.12 Hasil Simulasi Tank Type 3

TIPE 3								
Time Step	Fueling Time (s)	n	PRESSURE (bar)		Temperature (C)		Density (kg/m ³)	
			MIN	MAX	MIN	MAX	MIN	MAX
0	0	1	2	2	16	16	1.7	1.7
		2	2	2	16	16	1.7	1.7
		3	2	2	16	16	1.7	1.7
1000	50	1	179.7601	179.7888	19.79363	32.72976	12.79378	13.1069
		2	179.7601	179.7888	19.79363	32.72976	12.79378	13.1069
		3	179.7601	179.7888	19.79363	32.72976	12.79378	13.1069
2000	100	1	233.6334	233.6567	19.81518	28.86117	16.32295	16.73721

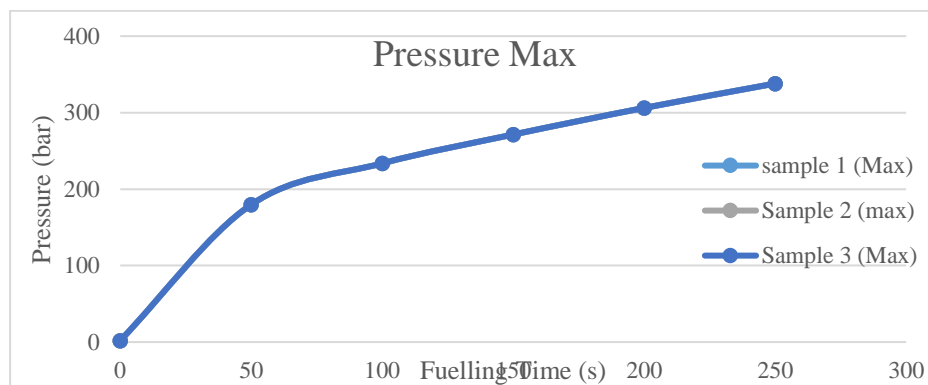
		2	233.6334	233.6567	19.81518	28.8611 7	16.32295	16.73721
		3	233.6334	233.6567	19.81518	28.8611 7	16.32295	16.73721
3000	150	1	271.307	271.3284	19.82256	29.0355 5	17.66751	18.59121
		2	271.307	271.3284	19.82256	29.0355 5	17.66751	18.59121
		3	271.307	271.3284	19.82256	29.0355 5	17.66751	18.59121
4000	200	1	306.1246	306.1441	19.82287	26.5357 9	19.51116	19.93473
		2	306.1246	306.1441	19.82287	26.5357 9	19.51116	19.93473
		3	306.1246	306.1441	19.82287	26.5357 9	19.51116	19.93473
5000	250	1	337.9946	338.0125	19.82809	24.9266 9	21.64686	22.0957
		2	337.9946	338.0125	19.82809	24.9266 9	21.64686	22.0957
		3	337.9946	338.0125	19.82809	24.9266 9	21.64686	22.0957

Dari data yang ditunjukkan oleh tabel 4.12, akan dibuat grafik perbandingan antara masing-masing sampel. Dengan parameter fokus utama, yaitu *Absolute Pressure*, *Static Temperature*, dan *Density*. Berikut grafik *Absolute Pressure* dari ke-3 sampel simulasi tipe 3.

Tabel 4.13 Max Pressure Tank Type 3

Max Pressure				
Time Step	Fuelling Time (s)	Sample		
		1	2	3
0	0	2	2	2
1000	50	179.789	179.789	179.789
2000	100	233.657	233.657	233.657
3000	150	271.328	271.328	271.328
4000	200	306.144	306.144	306.144
5000	250	338.013	338.013	338.013

Dari data yang ada pada tabel 4.13, bertujuan untuk menganalisis tekanan maksimum pada tangki hidrogen tipe 3 berdasarkan standar ISO 11439:2013. Data tekanan maksimum diambil pada berbagai iterasi dan waktu pengisian bahan bakar untuk tiga sampel tangki. Hasil dari analisis ini diharapkan dapat memberikan gambaran mengenai performa dan keamanan tangki hidrogen tipe 3. Sampel 1, 2, dan 3 menunjukkan nilai yang identik untuk tekanan maksimum pada semua waktu pengisian bahan bakar. Ada peningkatan yang jelas dalam tekanan maksimum untuk Sampel 1, 2, dan 3 seiring waktu pengisian bahan bakar meningkat dari 0 hingga 250 detik. ISO 11439:2013 menetapkan persyaratan untuk desain, konstruksi, dan pengujian silinder bertekanan tinggi untuk penyimpanan bahan bakar gas alam di kendaraan JTM EV, yang juga berlaku untuk penyimpanan hidrogen. Beberapa poin penting yang relevan dengan analisis ini adalah Tekanan Maksimum yang Diperbolehkan. Standar ini menentukan tekanan kerja maksimum yang diperbolehkan untuk silinder, yang harus dipatuhi untuk memastikan keselamatan. Berdasarkan data yang disediakan, kita dapat membandingkan sampel untuk menentukan mana yang paling sesuai dengan standar ISO.



Gambar 4.24 Grafik *Max Pressure tank Type 3*

Dari grafik pada gambar 4.24, Sampel 1 dan 2 mencapai tekanan maksimum 338.013 bar setelah 250 detik. Jika nilai ini berada dalam batas yang diizinkan oleh ISO 11439:2013, kedua sampel ini memenuhi standar. Sampel 1 dan 2 menunjukkan peningkatan tekanan yang konsisten dan identik, mencapai maksimum 338.013 bar setelah 250 detik. Jadi tekanan ini

berada dalam batas yang diizinkan oleh ISO 11439:2013, kedua sampel ini dapat dianggap andal dan sesuai. Sampel 1,2, dan 3 dapat dijadikan sampel untuk perbandingan antara ketiga tipe tangki

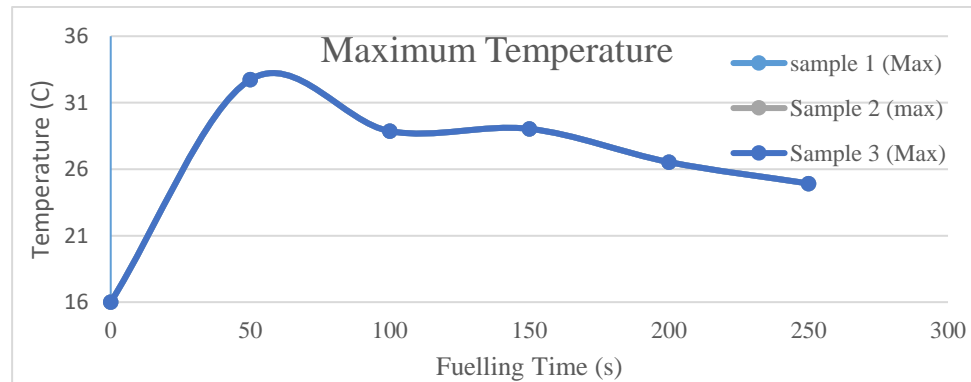
Dari data yang ditunjukkan oleh tabel 4.4, akan dibuat grafik pembandingan antara masing-masing sampel. Dengan parameter fokus utama, Yaitu *Absolute Pressure*, *Static Temperature*, dan *Density*. Berikut grafik *Maximum Temperature* dari ke-3 sampel simulasi tipe 3.

Tabel 4.14 *Max Temperature Tank Type 3*

Max Temperature				
Time Step	Fuelling Time (s)	Sample		
		1	2	3
0	0	16	16	16
1000	50	32.7298	32.7298	32.7298
2000	100	28.8612	28.8612	28.8612
3000	150	29.0356	29.0356	29.0356
4000	200	26.5358	26.5358	26.5358
5000	250	24.9267	24.9267	24.9267

Untuk menganalisis hasil sampel terbaik dari data yang diberikan dan membandingkannya dengan standar ISO 11439:2013 mengenai suhu, kita harus melakukan beberapa langkah analisis sederhana. Berikut adalah data suhu maksimum yang telah diperoleh dari simulasi untuk tiga sampel tangki hidrogen tipe 3. Berdasarkan ISO 11439:2013, tangki hidrogen harus mampu beroperasi dengan aman dalam rentang suhu dari -40 °C hingga +85 °C. Pada sampel 1 dan 2, tren suhu maksimum menunjukkan peningkatan awal yang signifikan diikuti oleh penurunan bertahap. Peningkatan awal disebabkan oleh kompresi gas, sedangkan penurunan berikutnya disebabkan oleh perpindahan panas ke lingkungan. Suhu maksimum yang dicatat dalam kedua sampel (32.7298°C) berada jauh di bawah batas maksimum 85°C, menunjukkan bahwa ketiga sampel mematuhi standar ini dari segi suhu operasi. Ketiga sampel mematuhi standar ISO 11439:2013 mengenai batas suhu operasi. Tidak ada perbedaan signifikan antara kedua sampel dalam hal

suhu maksimum, menunjukkan konsistensi dalam hasil pengujian. Berdasarkan data yang diberikan, tidak ada sampel yang lebih baik dari yang lain karena keduanya menunjukkan hasil yang identik. Sampel 1 dan 2 dapat dianggap memenuhi standar keselamatan yang diperlukan untuk penggunaan tangki hidrogen tipe 3.



Gambar 4.25 Grafik *Max Temperature tank Type 3*

Dari grafik pada gambar 4.25, Waktu Pengisian 0 detik suhu awal adalah 16°C untuk kedua sampel. Waktu Pengisian 50 detik suhu meningkat signifikan menjadi 32.7298°C pada kedua sampel. Waktu Pengisian 100 detik suhu menurun menjadi 28.8612°C pada kedua sampel. Waktu Pengisian 150 detik suhu sedikit meningkat menjadi 29.0356°C pada kedua sampel. Peningkatan kecil ini bisa disebabkan oleh fluktuasi dalam proses pengisian atau perubahan laju perpindahan panas. Waktu Pengisian 200 detik suhu kembali menurun menjadi 26.5358°C pada kedua sampel. Penurunan ini menunjukkan bahwa perpindahan panas ke lingkungan lebih dominan. Waktu Pengisian 250 detik suhu mencapai 24.9267°C pada kedua sampel, yang merupakan suhu terendah yang tercatat setelah pengisian dimulai. Ini menandakan bahwa sistem telah mencapai kondisi stabil.

Kedua sampel menunjukkan pola perubahan suhu yang identik selama proses pengisian, dengan peningkatan suhu awal yang signifikan diikuti oleh penurunan bertahap. Tidak ada perbedaan antara kedua sampel, sehingga keduanya dapat dianggap memiliki performa yang sama baik dalam hal perubahan suhu maksimum selama pengisian hidrogen. Kedua sampel menunjukkan kemampuan untuk mengelola kenaikan suhu selama pengisian

sesuai dengan standar keselamatan. Secara keseluruhan, baik sampel 1 maupun sampel 2 dapat dianggap sebagai pilihan yang aman dan efektif untuk digunakan dalam tangki hidrogen tipe 3 berdasarkan analisis suhu maksimum selama pengisian.

Dari data yang ditunjukkan oleh tabel 4.4, akan dibuat grafik pembandingan antara masing-masing sampel. Dengan parameter fokus utama, Yaitu *Absolute Pressure*, *Static Temperature*, dan *Density*. Berikut grafik *Maximum Density* dari ke-3 sampel simulasi tipe 3.

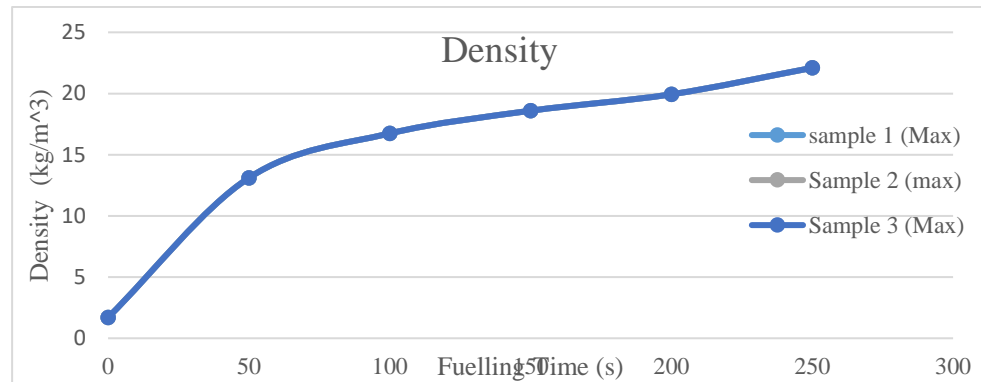
Tabel 4.15 *Max Density Tank Type 3*

Density				
Time Step	Fuelling Time (s)	Sample		
		1	2	3
0	0	1.7	1.7	1.7
1000	50	13.1069	13.1069	13.1069
2000	100	16.7372	16.7372	16.7372
3000	150	18.5912	18.5912	18.5912
4000	200	19.9347	19.9347	19.9347
5000	250	22.0957	22.0957	22.0957

Semua sampel memiliki nilai densitas yang identik pada setiap titik waktu. dalam tabel 4.15, semua sampel memiliki densitas yang meningkat seiring dengan waktu (*flow time*), yang menunjukkan peningkatan tekanan dalam tangki seiring dengan pengisian. Oleh karena itu, berdasarkan data yang diberikan, semua sampel menunjukkan peningkatan densitas yang serupa seiring dengan pengisian tangki.

Dalam konteks standar ISO 11439:2013, yang mencakup spesifikasi teknis untuk tabung gas alam, termasuk tangki hidrogen, densitas yang lebih tinggi mungkin diinginkan untuk memaksimalkan kapasitas penyimpanan gas dalam tangki dengan mempertimbangkan parameter seperti keamanan, kinerja, dan efisiensi penggunaan ruang. Dengan demikian, berdasarkan analisis tersebut, tidak ada sampel yang secara signifikan lebih baik dari yang lain dalam hal densitas, karena semua sampel mengikuti tren peningkatan

densitas yang serupa seiring dengan waktu. Oleh karena itu, untuk menentukan sampel yang terbaik, kita mungkin perlu mempertimbangkan faktor-faktor lain seperti keamanan, keandalan, dan kinerja secara keseluruhan sesuai dengan persyaratan standar dan kebutuhan aplikasi spesifik.

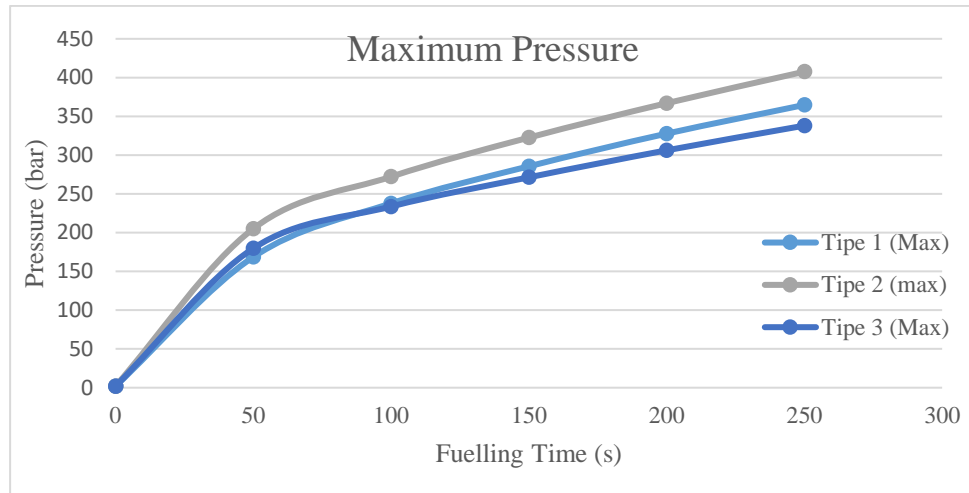


Gambar 4.26 Grafik *Max Density tank Type 3*

Berdasarkan grafik pada gambar 4.26, sampel 1 dan 2 menunjukkan peningkatan densitas yang serupa seiring dengan waktu. Densitas dari semua sampel meningkat secara signifikan dari iterasi awal hingga iterasi terakhir, mencapai nilai tertinggi pada 22.0957 kg/m³ pada iterasi terakhir, 250 s. Dalam situasi ini, sampel 1 dan 2 dapat dianggap sama baiknya dalam memenuhi kriteria densitas maksimum untuk tangki hidrogen tipe 3. Oleh karena itu, tidak ada satu sampel pun yang bisa dianggap terbaik secara khusus, karena semuanya menunjukkan performa yang identik.

4.7 Perbandingan 3 Tipe Tank

Setelah kita mengkaji dari masing-masing sampel dari ketiga tipe tangki, berikutnya yaitu pemilihan tipe tangki terbaik untuk dipasang pada mobil JTM EV. Pembahasan sebelumnya sudah membandingkan setiap sampel dengan standar ISO 11439:2013. Seluruh sampel baik dari sampel tipe 1, tipe 2, dan tipe 3 sudah memenuhi standar dari tekanan minimum dan temperatur maximum dan minimum tangki untuk hidrogen. Berikut ini merupakan grafik-grafik mengenai *Absolute Pressure*, *Static Temperature*, dan *Density* dari ketiga tipe tangki.



Gambar 4.27 Grafik *Maximum Pressure Hydrogen Tank*

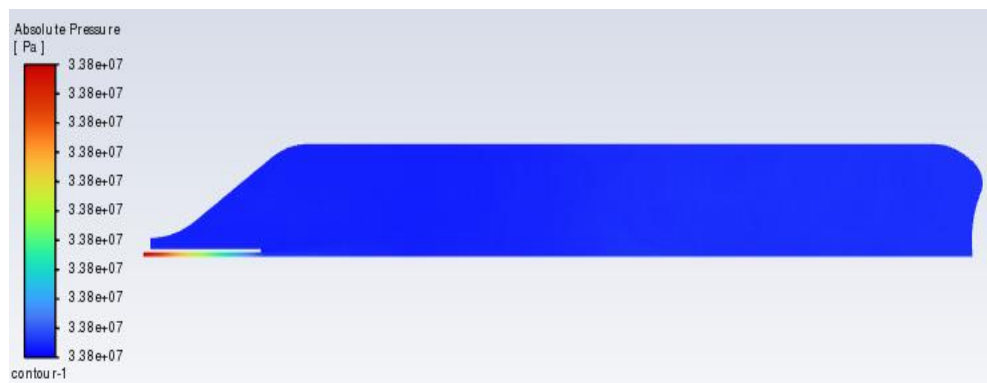
Untuk menganalisis dan memilih tipe tangki hidrogen yang paling baik berdasarkan *flow time*, kita perlu memeriksa bagaimana tekanan dari masing-masing tipe berkembang seiring dengan waktu. Tipe tangki yang lebih baik adalah yang dapat mencapai tekanan tertinggi dengan kecepatan yang lebih cepat atau yang memiliki tekanan yang lebih stabil seiring dengan waktu. Pada Iterasi 5000 (*flow time* 250 s): Tipe 1: 364.7 bar, Tipe 2: 407.589 bar, Tipe 3: 338.0125 bar. Dari data tersebut, kita dapat melihat bahwa tipe 2 memiliki tekanan maksimum tertinggi pada setiap interval *flow time*. Ini menunjukkan bahwa tipe 2 memiliki kinerja yang paling baik dalam menahan tekanan secara konsisten sepanjang proses pengisian. Oleh karena itu, berdasarkan analisis *flow time*, tipe 2 adalah yang paling baik dari ketiga tipe dalam menahan tekanan.



(A)



(B)



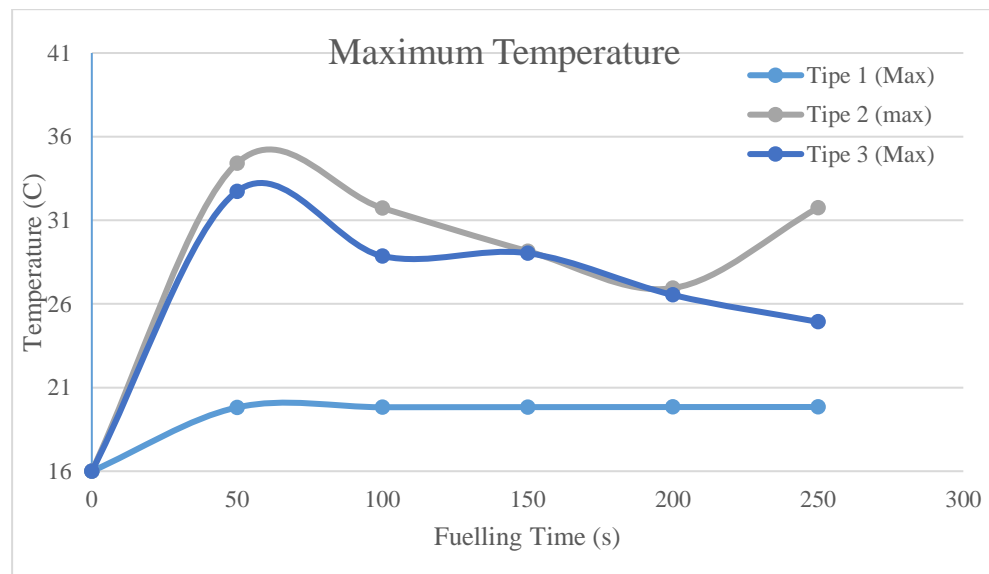
(C)

Gambar 4.28 *Contour Maximum Pressure*

(A) Tipe 1 (B) Tipe 2 (C) Tipe 3

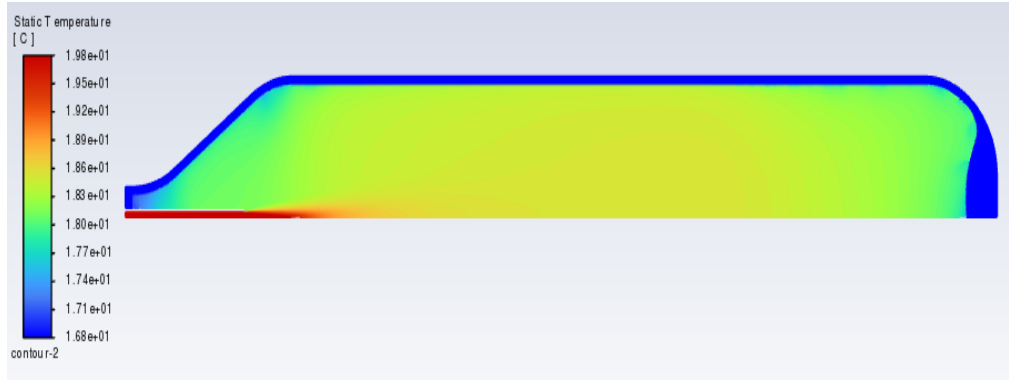
Dari gambar 4.28 yang menunjukkan mengenai kontur tekanan pada tangki tipe 1 (A), 2 (B), dan 3 (C). Dari ketiganya, memiliki persamaan yang sama. Yang mana warna biru merupakan tekanan yang ada pada ruang tabung. Warna biru diidentifikasi sebagai tekanan minimum pada *flow time* 250 s. sedangkan warna merah merupakan tekanan maksimum yang terjadi ketika proses pengisian tangki yang terletak pada *nozzle* hidrogen. Adanya perbedaan tekanan karena ketika fluida masuk memiliki tekanan yang lebih tinggi supaya fluida yang sudah masuk kedalam tangki tidak keluar kembali atau berbalik menuju aliran *Nozzle*. Dari kontur pada gambar 4.28, seiring Bergeraknya fluida kedalam ruang tangki, maka tekanannya akan semakin berkurang dan menjadi sama dengan tekanan pada ruang tangki. Hal ini terjadi karena fluida akan saling bertabrakan dan tekanan fluida yang masuk akan menjadi setara dengan tekanan yang ada pada ruangan tangki.

Setelah membandingkan *maximum pressure* pada tangki tipe 1, 2, dan 3. Maka selanjutnya yaitu membandingkan tempratur pada saat proses pengisian hidrogen kedalam tangki. Dari ketiga tipe, sudah dipilih sampel terbaik untuk dijadikan bahan pembanding. Berikut merupakan grafik serta kontur dari hasil tempratur maksimal selama proses pengisian tangki hidrogen.

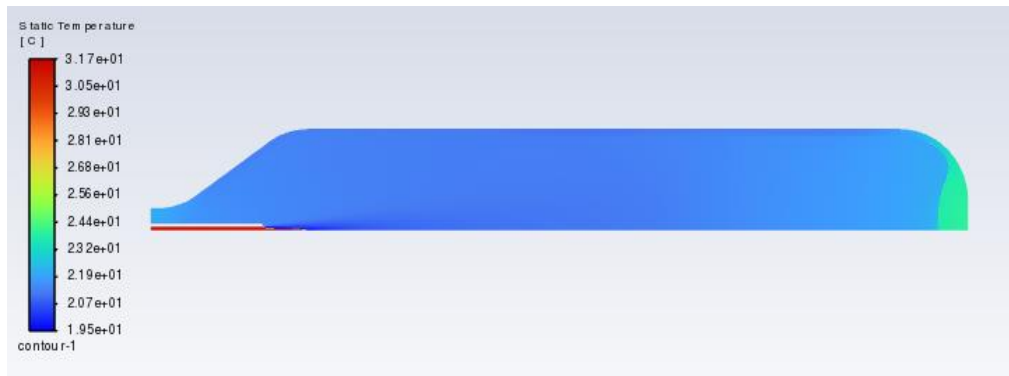


Gambar 4.29 Grafik *Maximum Temperature Hydrogen Tank*

Suhu pada tipe 1 naik secara konsisten dan stabil dari 16°C menjadi sekitar 19.83°C pada akhir periode 250 s. Ini menunjukkan bahwa tipe 1 mampu mempertahankan peningkatan suhu yang stabil sepanjang waktu, tanpa fluktuasi yang signifikan. Suhu pada tipe 2 naik secara signifikan pada awalnya, tetapi kemudian mengalami fluktuasi yang besar. Ini mungkin menunjukkan adanya masalah dengan pengaturan suhu atau karakteristik isolasi yang kurang baik pada tangki tipe ini. Suhu pada tipe 3 juga mengalami fluktuasi, meskipun tidak sebesar tipe 2. Namun, suhu akhir pada tipe 3 lebih rendah daripada tipe 2, menunjukkan bahwa tipe 3 mungkin memiliki masalah dalam mempertahankan suhu yang stabil dan konsisten. Berdasarkan analisis tersebut, tipe tangki terbaik adalah tipe 1. Tipe 1 mampu mempertahankan suhu yang stabil dan konsisten sepanjang waktu, tanpa fluktuasi yang signifikan seperti yang terlihat pada tipe 2 dan tipe 3.



(A)



(B)



(C)

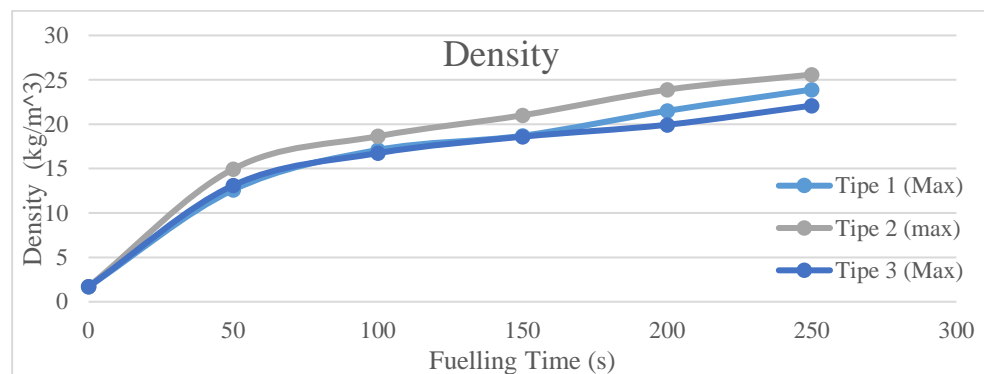
Gambar 4.30 *Contour Maximum Temperature*

(A) Tipe 1 (B) Tipe 2 (C) Tipe 3

Dari gambar 4.30 yang menunjukkan mengenai kontur temperatur pada tangki tipe 1 (A), 2 (B), dan 3(C). pada kontur tipe 1 (A), dapat dilihat temperatur maksimum berada pada *nozzle inlet* yang ditandakan dengan warna merah. Dan warna akan memudar menjadi warna hijau muda dan akan menjadi kuning seiring menyebarnya laju aliran ke dinding permukaan *inner* silinder.

Permukaan silinder memiliki temperatur minimum yang dapat ditandai dengan warna biru. Dengan kata lain, tangki tipe 1 dapat menjaga temperatur tangki secara konsisten tanpa adanya pengaruh dari temperatur fluida dan isolasi dari *carbon fiber*. Pada kontur tipe 2 (B) temperatur maksimum berada pada *nozzle inlet* yang ditandai dengan warna merah. Hanya saja, fluida yang masuk akan langsung menurun *temperature*-nya dengan ditandai perubahan warna menjadi biru muda. Warna kontur permukaan silinder pun memiliki suhu yang lebih rendah dibandingkan dengan suhu yang ada pada *nozzle*. Dapat diartikan bahwa dinding pada permukaan tangki dapat menyerap temperatur fluida. Pada kontur 3 (C) temperatur maksimum berada pada bagian bawah tangki. Dan temperature akan semakin menurun mendekati *nozzle inlet* hidrogen.

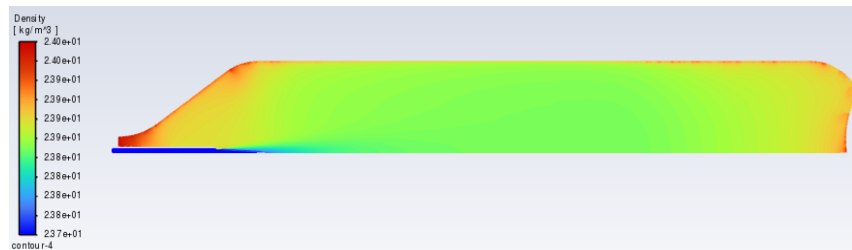
Setelah membandingkan *maximum pressure* dan *Temperature* pada tangki tipe 1, 2, dan 3. Maka selanjutnya yaitu membandingkan densitas pada saat proses pengisian hidrogen kedalam tangki. Dari ketiga tipe, sudah dipilih sampel terbaik untuk dijadikan bahan pembanding. Berikut merupakan grafik serta kontur dari hasil densitas maksimum setelah proses pengisian tangki hidrogen.



Gambar 4.31 Grafik *Maximum Density Hydrogen Tank*

dari data yang diberikan, dapat diamati bahwa setiap tipe tangki hidrogen memiliki densitas awal yang sama, yaitu 1.7 kg/m^3 . Namun, seiring berjalannya waktu, densitas setiap tipe tangki mengalami peningkatan yang berbeda. Densitas terendah pada Tipe 1 adalah 12.6 kg/m^3 pada iterasi kedua dan densitas tertinggi adalah 23.9 kg/m^3 pada iterasi keenam. Tipe 2

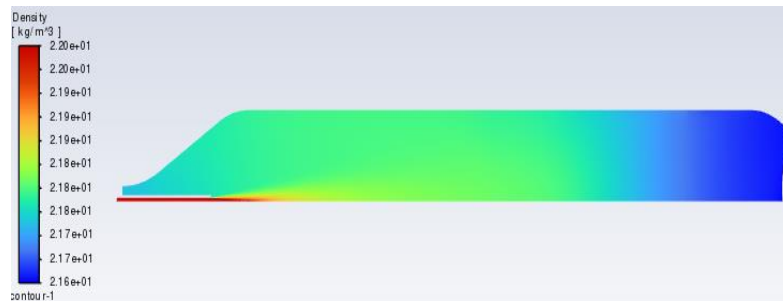
menunjukkan peningkatan densitas yang lebih besar daripada Tipe 1. Densitas pada Tipe 2 mulai dari 14.9501 kg/m^3 pada iterasi kedua dan mencapai 25.5869 kg/m^3 pada iterasi keenam, menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam densitas seiring berjalannya waktu. Tipe 3 juga menunjukkan peningkatan densitas yang cukup konsisten seiring waktu. Densitas mulai dari 13.1069 kg/m^3 pada iterasi kedua dan mencapai 22.0957 kg/m^3 pada iterasi keenam. Berdasarkan analisis diatas, Tipe 2 memiliki peningkatan densitas yang paling signifikan, diikuti oleh Tipe 3 dan kemudian Tipe 1. Oleh karena itu, jika kriteria terbaik adalah mencapai densitas yang tinggi dalam periode waktu yang diberikan, Tipe 2 merupakan pilihan terbaik.



(A)



(B)



(C)

Gambar 4.32 *Contour Maximum Density*

(A) Tipe 1 (B) Tipe 2 (C) Tipe 3

Dari gambar 4.30 yang menunjukkan mengenai kontur densitas pada tangki tipe 1 (A), 2 (B), dan 3(C). pada tipe 1 (A), densitas maksimum terjadi pada bagian bagian yang bersentuhan dengan *inner wall surface* tangki. dan densitas minimum terjadi di *inlet nozzle*. Pada *inlet* memiliki densitas yang rendah karena memiliki *inlet velocity*. Sehingga menyebabkan gas terus bergerak. Berbeda dengan bagian yang mendekati *inner wall surface* tangki, densitas akan semakin padat seiring bertumpuknya molekul hidrogen. Pada tipe 2 (B), dapat diketahui bahwa densitas minimum pada timestep ke 5000 sudah memenuhi seluruh ruang tangki tipe 2. Hanya saja, nilai densitas maksimum terjadi pada bagian *inlet nozzle*. Pada tipe 3 (C), densitas maksimum terjadi pada bagian *inlet nozzle*. Hal ini karena densitas di ruang dalam tangki masih kecil sehingga kontur menunjukkan bahwa *inlet nozzle* memiliki densitas tertinggi.

Untuk densitas maksimum, berdasarkan data tipe 2 memiliki densitas tertinggi sebesar 25.58 kg/m^3 . Hanya saja densitas maksimum terjadi pada *nozzle inlet*. Dan bukan pada ruang tangki. berdasarkan kontur densitas, pada ruang tangki tipe 2 memiliki densitas sebesar 23.6 kg/m^3 . Bila dibandingkan dengan densitas gas pada tipe 1, nilai maksimum densitas sebesar 23.9 kg/m^3 , berdasarkan kontur, ruangan tangki tipe 1 dipenuhi gas dengan densitas sebesar 23.8 kg/m^3 . Dengan kata lain, tipe 1 memiliki densitas paling tinggi pada nilai densitas di dalam ruang tangki ketika timestep ke-5000. Sehingga tipe 1 merupakan tipe yang paling ideal dalam segi densitas.

Dari perbandingan data mengenai tipe-tipe tangki, dapat diketahui bahwa tangki tipe 2 merupakan tangki yang memiliki tekanan paling besar di bagian *nozzle inlet* dan bagian ruang tangki sebesar 407,58 bar. Untuk tempratur maksimum, yang dapat menjaga tempratur berdasarkan simulasi yakni hanya tangki tipe 1. Dengan tempratur maksimum gas hidrogen sebesar 19.8°C pada *nozzle inlet*, tempratur gas sebesar 18° pada ruang tangki berdasarkan kontur, dan tempratur tangki sebesar 16.8°C (dengan syarat tempratur pada lingkungan diabaikan). Untuk densitas maksimum, berdasarkan kontur densitas, pada ruang tangki tipe 2 memiliki densitas sebesar 23.6 kg/m^3 . Sedangkan ruang tangki pada tipe 1 memiliki densitas sebesar 23.9 kg/m^3 .

Tipe 2 memiliki tekanan maksimum yang lebih besar dibandingkan tipe 1 dan 3. Hanya saja temperatur maksimum pada tipe 1 lebih baik dibandingkan dengan tipe 2 dan 3. Dan juga densitas maksimum pada ruangan tangki tipe 2 lebih kecil dibandingkan dengan tipe 1 dan lebih besar dibandingkan dengan tipe 3. Sehingga dapat disimpulkan bahwa tangki tipe 1 merupakan tangki tipe terbaik untuk dipasang pada mobil JTM. Walaupun tekanan tidak sebesar tipe 2, tetapi dari segi temperatur dan densitas lebih baik dibandingkan dengan tipe 2 dan tipe 3.

BAB V

KESIMPULAN

5.1 Kesimpulan

Dari penelitian berjudul analisis simulasi kapasitas *hydrogen storage tank* dalam proses pengisian *hydrogen* pada mobil JTM ini dapat diperoleh beberapa kesimpulan yang bersumber berdasarkan analisis simulasi CFD dari tangki tipe 1, 2, dan 3. Berikut kesimpulannya.

1. Seluruh tipe tabung dapat menyimpan tekanan yang berbeda beda. Tipe 1 memiliki tekanan maksimum sebesar 367.7 bar. Tipe 2 memiliki tekanan maksimum sebesar 407.6 bar. Tipe 3 memiliki tekanan maksimum sebesar 339.01 bar. Ketiga tipe tangki memenuhi standar ISO 11439:2013. Dalam standar tersebut diberikan range tekanan maksimum yang aman. Dengan nilai paling kecil sebesar 200 bar dan nilai paling besar sebesar 700 bar.
2. Tipe 1 memiliki tempratur akhir sebesar 19.8°C, tipe 2 memiliki temperature akhir sebesar 31.7°C, dan tipe 3 memiliki tempratur akhir sebesar 24°C. Tempratur ketiganya berada di atas dan dibawah batas aman yang mana tercantum berdasarkan standar ISO 11439:2013. Batas minimum tempratur berada di -40°C dan batas maksimum tempratur berada di +65°C.
3. Setelah proses simulasi, tipe 1 memiliki densitas akhir sebesar 23.9 kg/m³, tipe 2 memiliki densitas akhir sebesar 25.58 kg/m³, dan tipe 3 memiliki densitas akhir sebesar 22.09 kg/m³. Tidak ada standar pasti mengenai densitas dalam tangki. hanya saja nilai densitas mempengaruhi tingkat penyimpanan hidrogen didalam tangki. sehingga semakin besar nilainya, maka tangki tersebut dapat menyimpan lebih banyak hidrogen.
4. Tipe tangki yang terbaik untuk dipasang pada mobil JTM yaitu tipe 1 dengan nilai tekanan maksimum sebesar 367.7 bar, tempratur gas hidrogen sebesar 18°C dan densitas pada ruang tangki sebesar 23.9 kg/m³.

5.2 Saran

Dari penelitian berjudul analisis simulasi kapasitas *hydrogen storage tank* dalam proses pengisian *hydrogen* pada mobil JTM ini, terdapat beberapa saran yang berguna untuk pengembangan penelitian berikutnya.

1. Desain tangki dibuat sesuai dengan referensi berdasarkan jurnal atau yang sudah terpasang pada mobil berbahan bakar hidrogen. Sehingga hasil simulasi dapat diaplikasikan atau dibandingkan dengan kondisi aktual.
2. Untuk desain pada saat proses simulasi, gunakan dimensi 3D supaya dapat dibandingkan dengan penelitian ini yang menggunakan desain 2D.

DAFTAR PUSTAKA

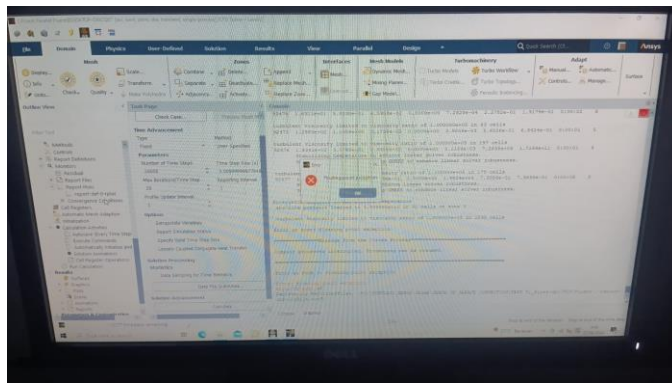
- Ansyes (2022). ANSYS Fluent User Guide. Ansys: Canonsburg, PA, USA
- Barthélémy, H. (2012). Hydrogen storage—Industrial perspectives. *International journal of hydrogen energy*, 37(22), 17364-17372.
- Chandrasa, G. T., Zuhail, Z., Dalimi, R., & Hoetman, A. R. (2006). Fuel cell Hidrogen Tipe Pem Sebagai Sumber Energi Mobil Listrik Ultra Ringan. *Jurnal Ilmiah Teknologi Energi*, 98862. 31-40
- Ma'ruf, M., & Widiharsa, F. A. (2016). Fuel cell sebagai sumber energi listrik alternatif pengisi baterai dengan pengendali panas. *Transmisi*, 12(1), 45-54.
- Monteiro, J. M., Ribeiro, L., Monteiro, J., Baptista, A., & Pinto, G. F. (2024). Computational Fluid Dynamics Simulation of Filling a Hydrogen Type 3 Tank at a Constant Mass Flow Rate. *Energies*, 17(6), 1375.
- Putra, A. M. (2010). Analisis produktifitas gas hidrogen dan gas oksigen pada elektrolisis larutan KOH. *Jurnal Neutrino: Jurnal Fisika dan Aplikasinya*.vol 2 no 2 141-154
- Saferna, A., Saferna, P., Kuczyński, S., Łaciak, M., Szurlej, A., & Włodek, T. (2024). Effects of Hydrogen, Methane, and Their Blends on Rapid-Filling Process of High-Pressure Composite Tank. *Energies*, 17(5), 1130.
- Simonovski, I., Baraldi, D., Melideo, D., & Acosta-Iborra, B. (2015). Thermal simulations of a hydrogen storage tank during fast filling. *international journal of hydrogen energy*, 40(36), 12560-12571..
- Stops, L., Siebe, D., Stary, A., Hamacher, J., Sidarava, V., Rehfeldt, S., & Klein, H. (2024). Generalized thermodynamic modeling of hydrogen storage tanks for truck application. *Cryogenics*, 103826.
- Xie, H., Makarov, D., Kashkarov, S., & Molkov, V. (2023). CFD Simulations of Hydrogen Tank Fuelling: Sensitivity to Turbulence Model and Grid Resolution. *Hydrogen*, 4(4), 1001-1021.
- Yang, Y., Lin, L., & Bao, W. (2022, April). Development of standards for liquid hydrogen in China. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 1011, No. 1, p. 012001). IOP Publishing.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Proses Simulasi



Gambar L1.1 Proses mula-mula berjalannya simulasi



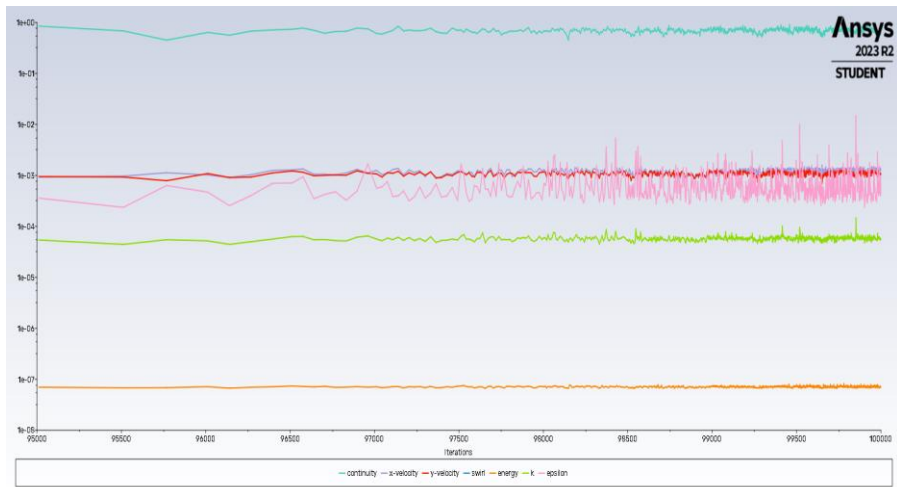
Gambar L1.2 *Error & Trial* proses simulasi



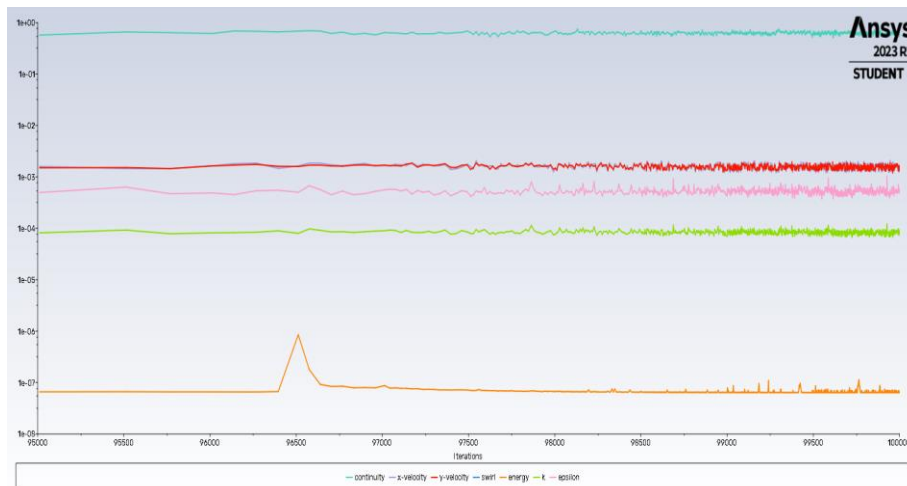
Gambar L1.3 Proses simulasi yang sudah berjalan selama 18 jam

Lampiran 2. Residual Simulasi sampel terbaik

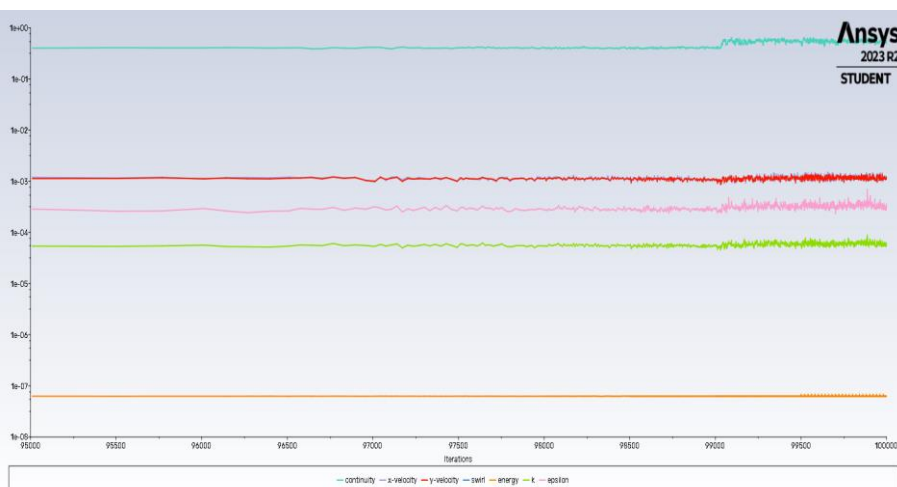
1. Tipe 1



2. Tipe 2

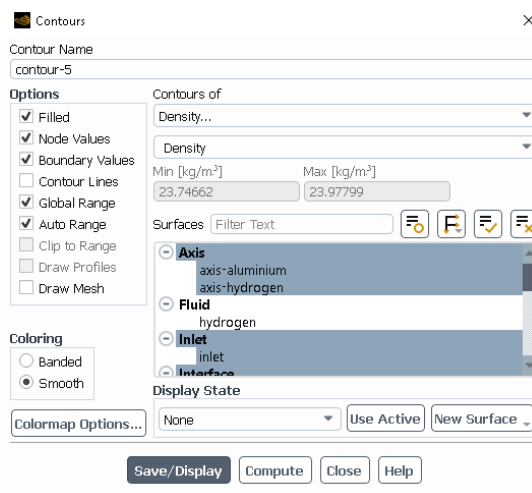
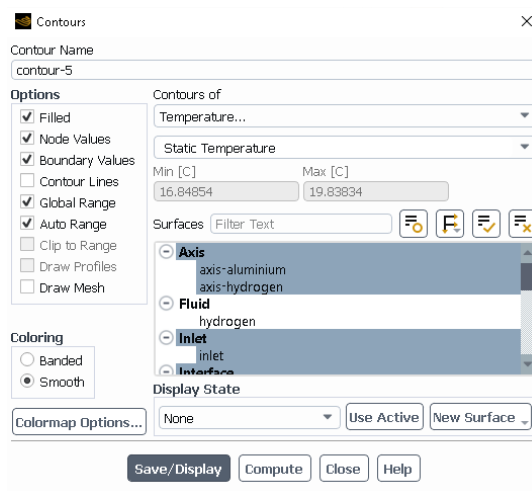
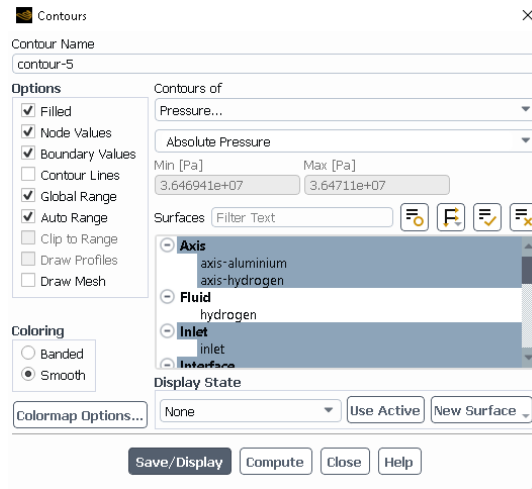


3. Tipe 3

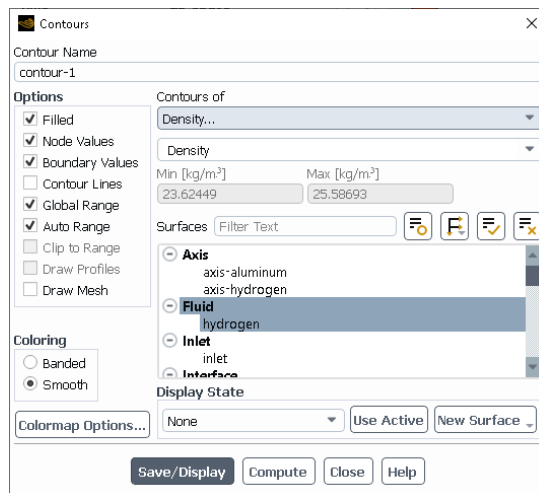
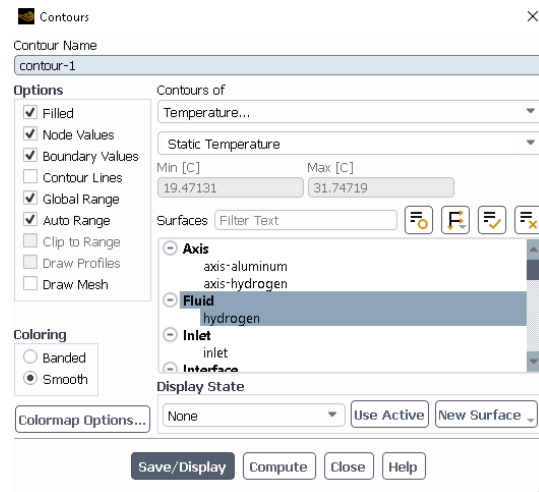
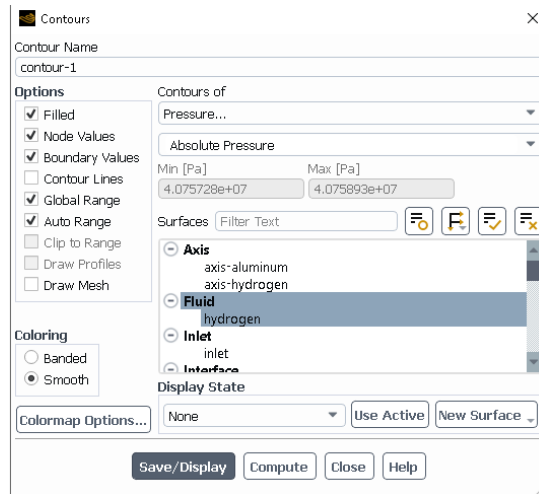


Lampiran 3. Data hasil simulasi sampel terbaik pada Timestep ke-5000

1. Tipe 1



2. Tipe 2



3. Tipe 3

