

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

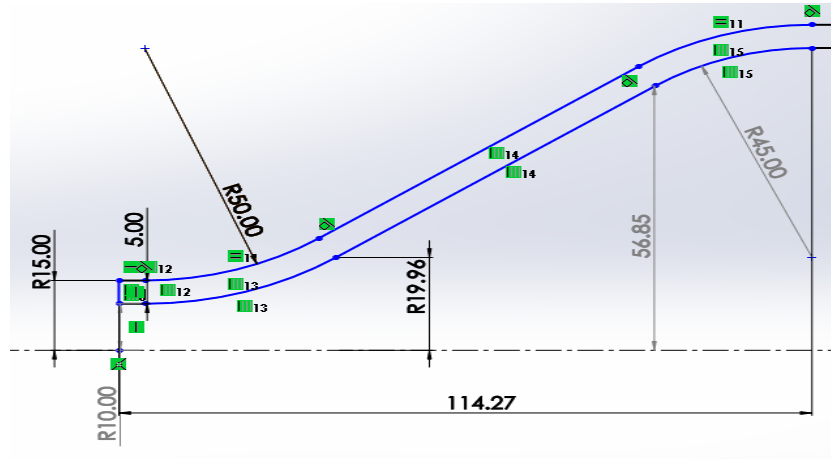
Pada tabel 4.1, dapat dilihat bahwa tabel tersebut menunjukkan dimensi yang ada pada tangki referensi. Diameter tangki oksigen yaitu 140 mm, tinggi tangki 600 mm, dan tebal tangki sebesar 5 mm. dimensi yang sudah diukur akan dijadikan sebagai referensi untuk mendesain tangka hydrogen yang akan disimulasikan.

4.2 Proses Perancangan Tangki Hidrogen

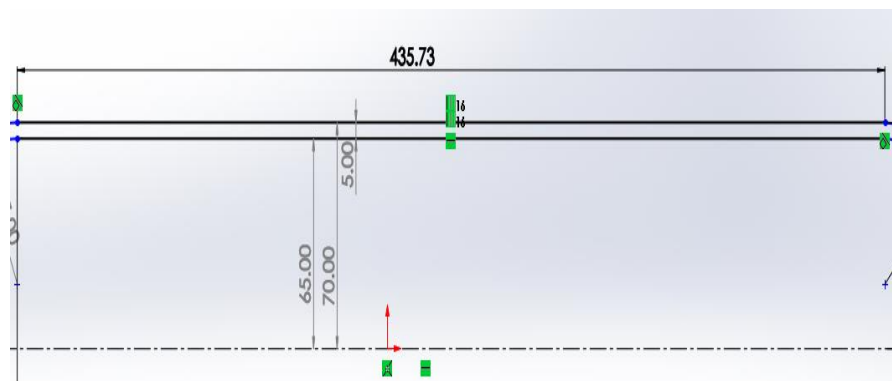
Proses perancangan tangki hydrogen terbagi menjadi 3. Yaitu perancangan tangki tipe 1, perancangan tangki tipe 2, dan perancangan tangki tipe 3. Berikut dari masing-masing perancangan dari setiap tipe tangki

1. Tipe 1

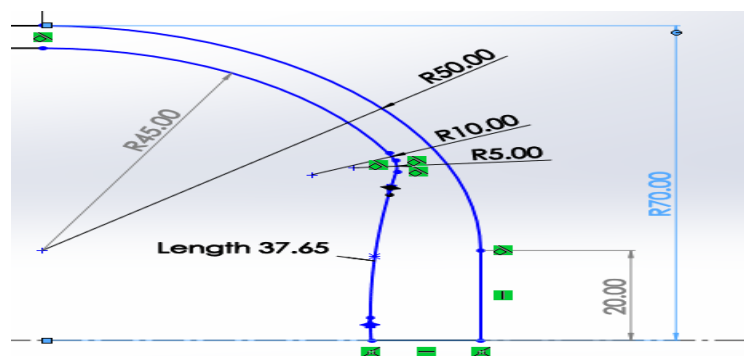
Untuk mendesain tangki tipe 1, diperlukan referensi dimensi yang sudah tertera pada subbab sebelumnya. Berikut proses perancangan tabung hidrogen tipe 1:



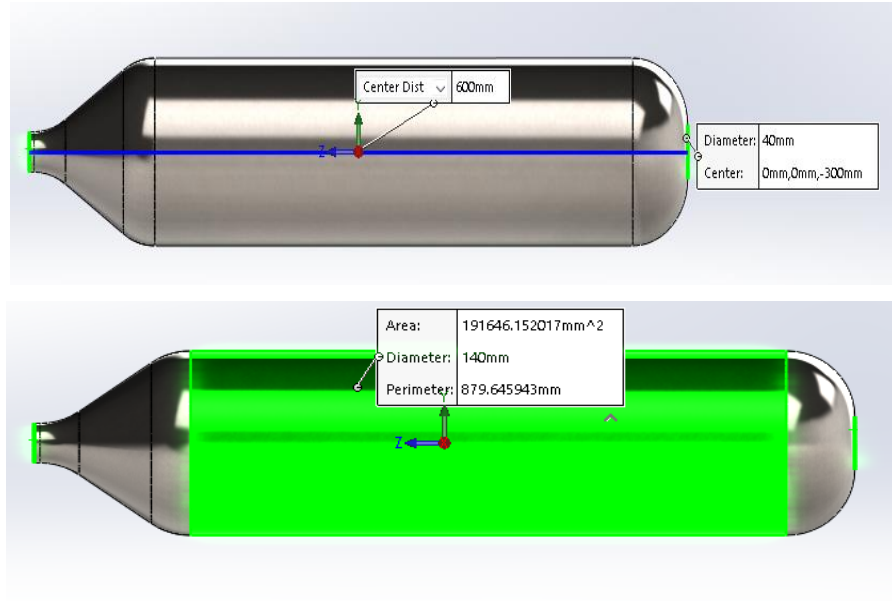
Gambar 4.2 Proses desain bagian atas



Gambar 4.3 Proses desain bagian tengah



Gambar 4.4 Proses desain bagian bawah



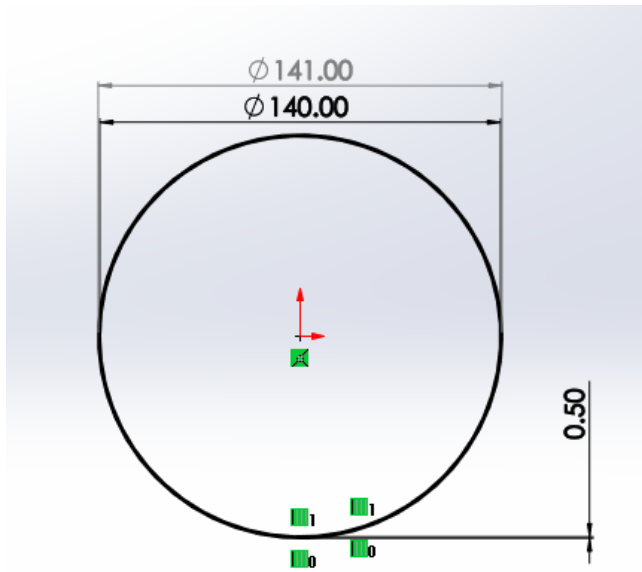
Gambar 4.5 General Dimension tank type 1



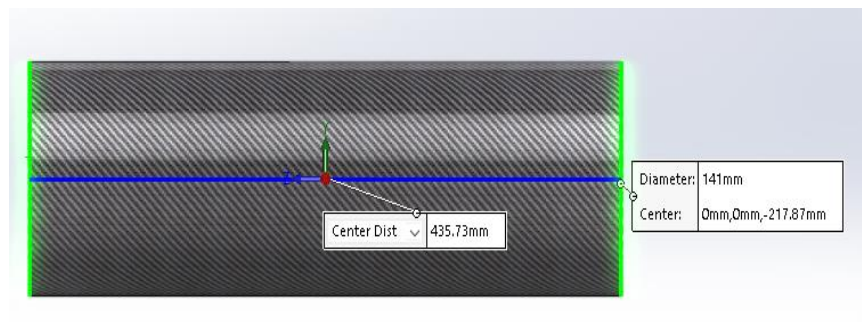
Gambar 4.6 General Dimension tank type 1

2. Tipe 2

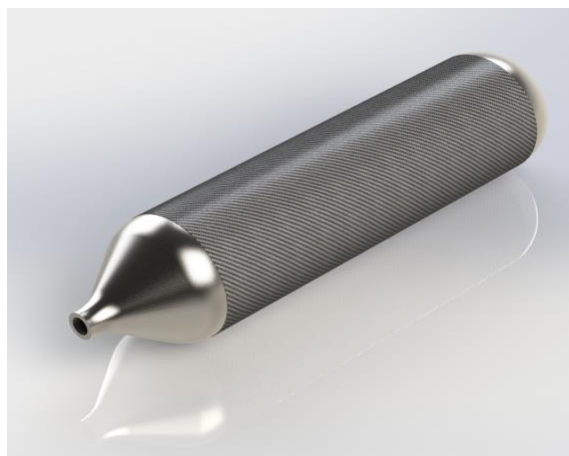
Untuk mendesain tangki tipe 2, tidak diperlukan desain tangki. hanya saja memerlukan desain *Wrapping* dari *Carbon Fiber*. *Coating* tipe 2 berbentuk *hoop*. Berikut proses perancangan tabung hidrogen tipe 2:



Gambar 4.7 Proses pembuatan silinder *Wrapping*



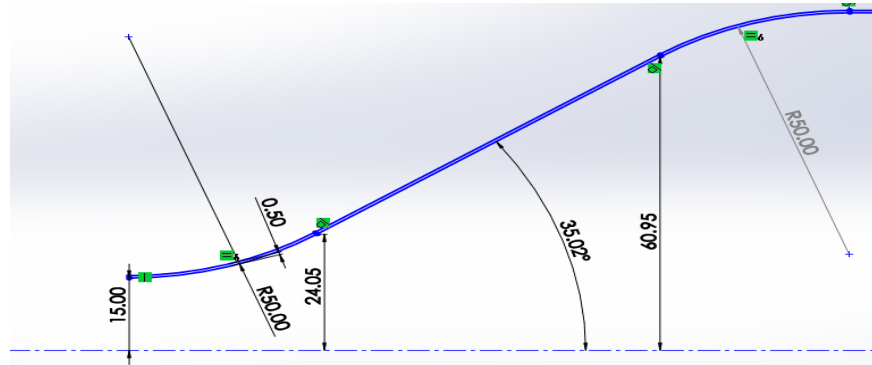
Gambar 4.8 *General dimension Wrapping type 2*



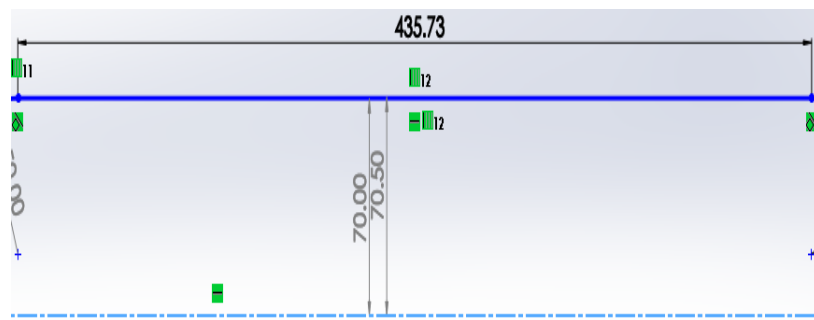
Gambar 4.9 Tangki tipe 2

3. Tipe 3

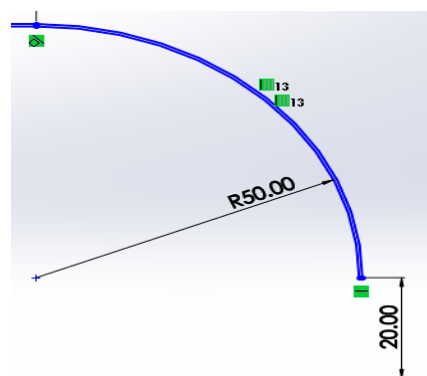
Untuk mendesain tangki tipe 3, tidak diperlukan desain tangki. hanya saja memerlukan desain *Coating* dari *Carbon Fiber*. *Coating* tipe 3 berbentuk *hoop* dan *polar*. Berikut proses perancangan tabung hidrogen tipe 3:



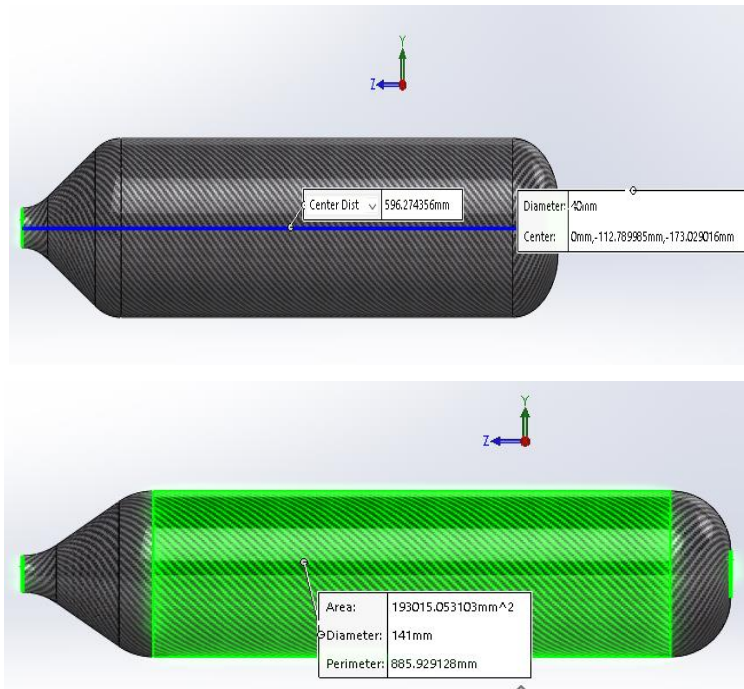
Gambar 4.10 Proses desain bagian atas



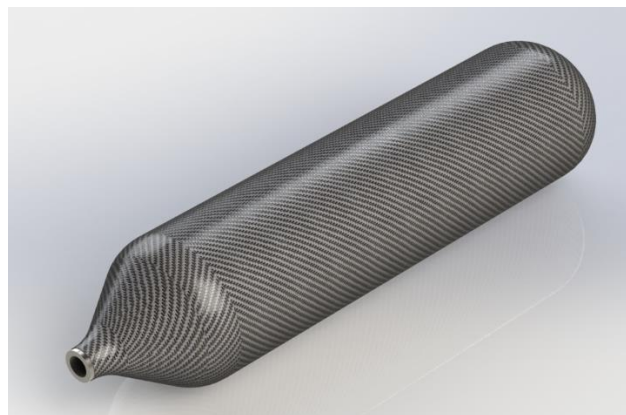
Gambar 4.11 Proses desain bagian tengah



Gambar 4.12 Proses desain bagian bawah



Gambar 4.13 *general dimension Wrapping type 3*

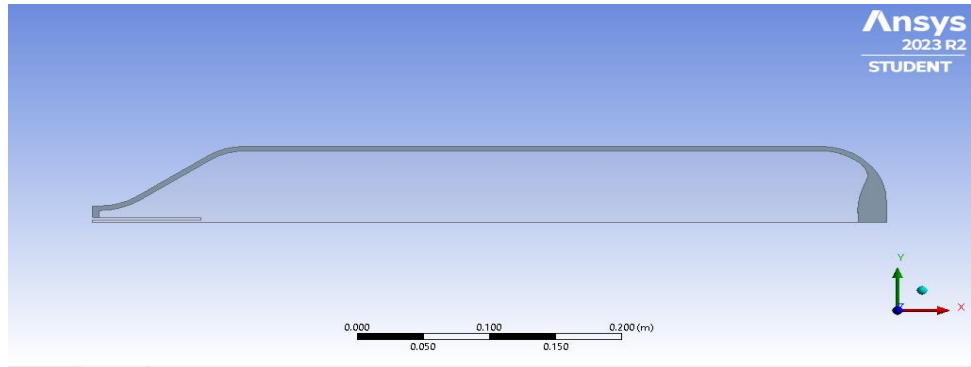


Gambar 4.14 *Tangki tipe 3*

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.

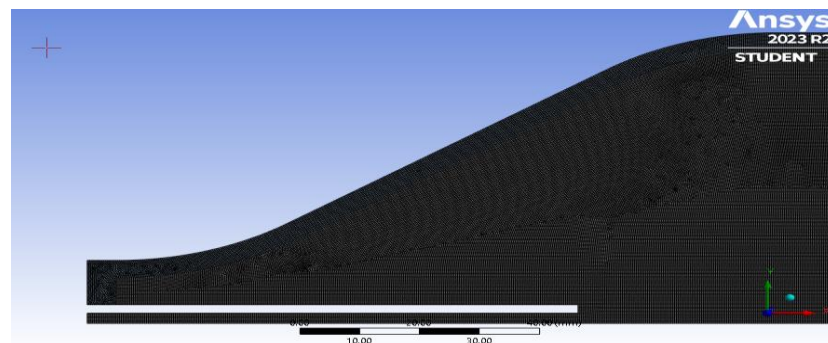


Gambar 4.15 Simplifikasi Gambar

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.

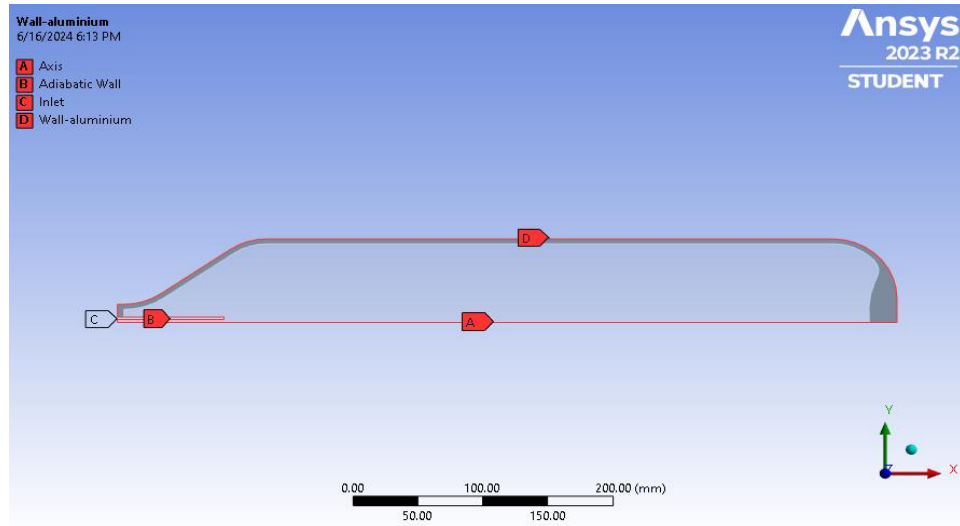
Tabel 4.2 *Meshing Parameter*

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 tangkang 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

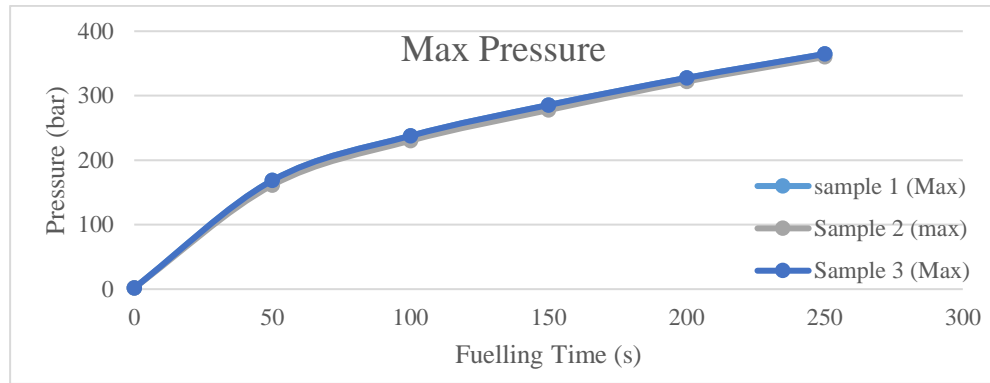
Max Pressure (bar)				
Time Step	Fuelling Time (s)	Sample		
		1	2	3
0	0	2	2	2
1000	50	168.626	161.303	168.626

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

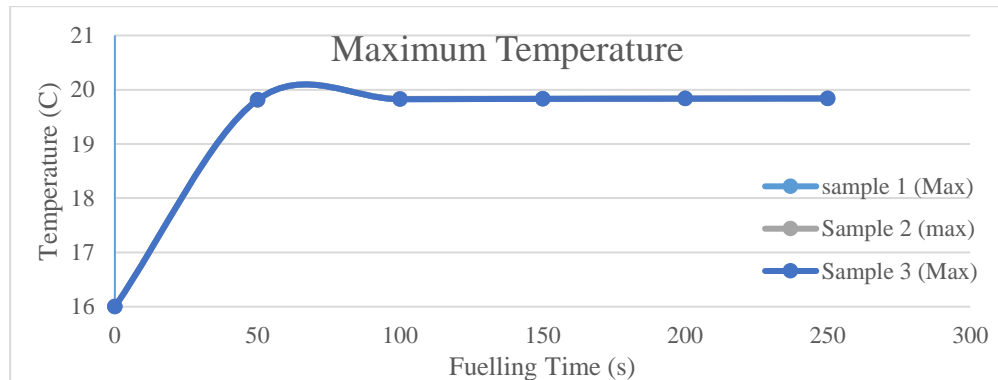
2000	100	19.824	19.8299	19.824
3000	150	19.8309	19.8324	19.8309
4000	200	19.8355	19.8354	19.8355
5000	250	19.8383	19.8382	19.8383

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.

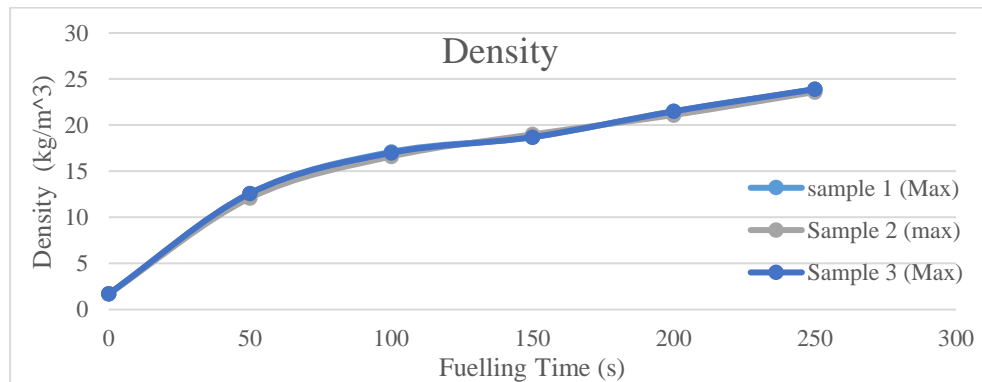
Dari data yang ditunjukkan oleh tabel 4.4, akan dibuat grafik perbandingan antara masing-masing sampel. Dengan parameter fokus utama, yaitu *Absolute Pressure*, *Static Temperature*, dan *Density*. Berikut grafik *Maximum Density* dari ke-3 sampel simulasi tipe 1.

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*

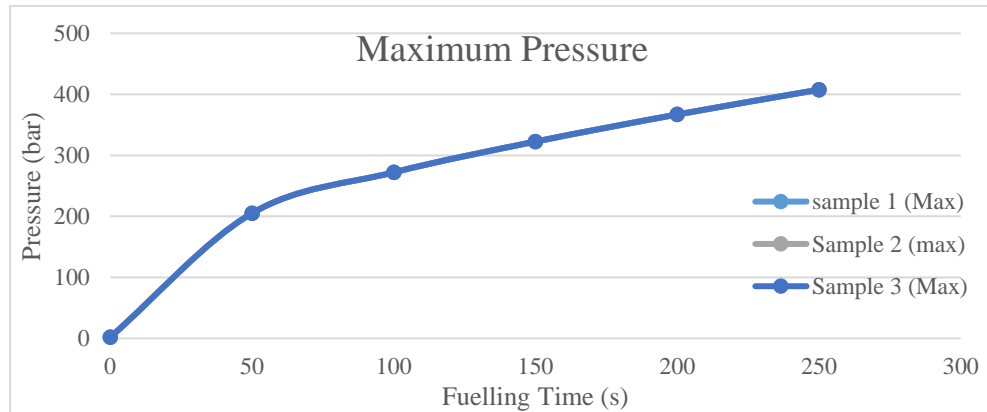
Max Pressure				
Time Step	Fuelling Time (s)	Sample		
		1	2	3
0	0	2	2	2
1000	50	205.101	205.101	205.101
2000	100	272.156	272.156	272.156
3000	150	322.575	322.575	322.575
4000	200	366.964	366.964	366.964
5000	250	407.589	407.589	407.589

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*

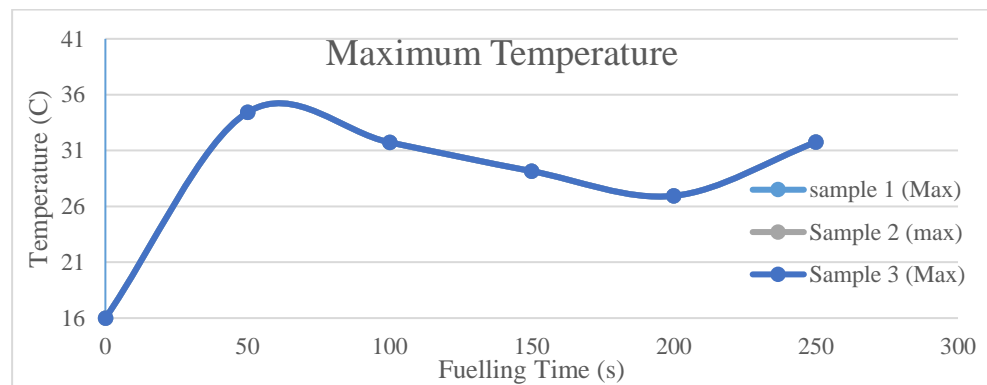
Dari grafik pada gambar 4.21, terlihat bahwa tekanan pada semua sampel cenderung meningkat seiring dengan waktu. Namun, karena data tekanan yang diberikan identik untuk setiap sampel pada setiap interval waktu, tidak mungkin memilih sampel yang terbaik berdasarkan analisis flow time saja. Dikarenakan 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, temperatur 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.

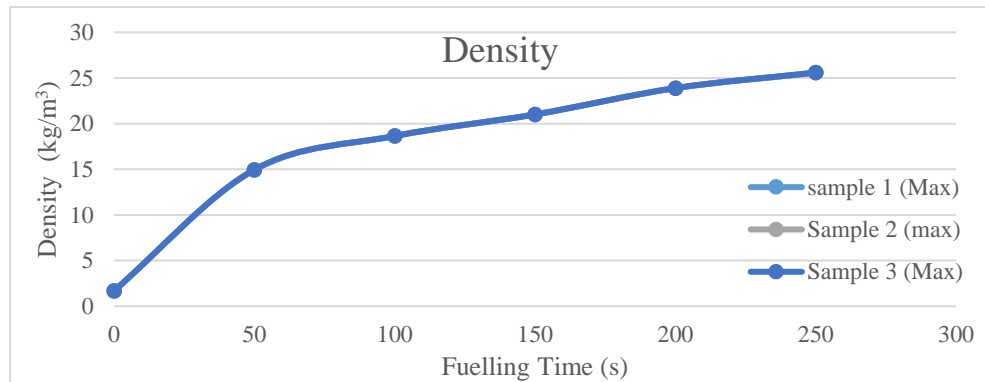
Dari data yang ditunjukkan oleh tabel 4.4, akan dibuat grafik perbandingan antara masing-masing sampel. Dengan parameter fokus utama, Yaitu *Absolute Pressure*, *Static Temperature*, dan *Density*. Berikut grafik *Maximum Density* dari ke-3 sampel simulasi tipe 2.

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/m³. Densitas meningkat secara bertahap hingga mencapai nilai maksimum 25.5869 kg/m³ pada flow time 250 s untuk semua sampel. Kenaikan densitas dari 1.7 kg/m³ ke 25.5869 kg/m³ 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

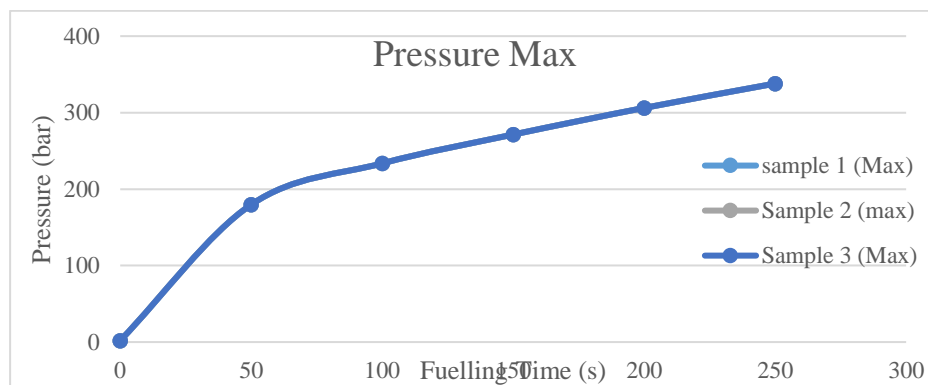
		2	233.6334	233.6567	19.81518	28.8611 7	16.32295	16.73721
		3	233.6334	233.6567	19.81518	28.8611 7	16.32295	16.73721
3000	150	1	271.307	271.3284	19.82256	29.0355 5	17.66751	18.59121
		2	271.307	271.3284	19.82256	29.0355 5	17.66751	18.59121
		3	271.307	271.3284	19.82256	29.0355 5	17.66751	18.59121
4000	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

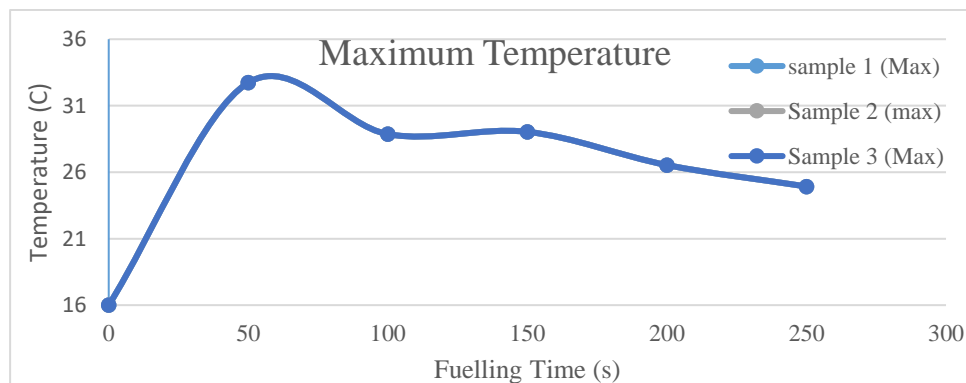
Dari data yang ditunjukkan oleh tabel 4.4, akan dibuat grafik pembandingan antara masing-masing sampel. Dengan parameter fokus utama, Yaitu *Absolute Pressure*, *Static Temperature*, dan *Density*. Berikut grafik *Maximum Temperature* dari ke-3 sampel simulasi tipe 3.

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 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 3.

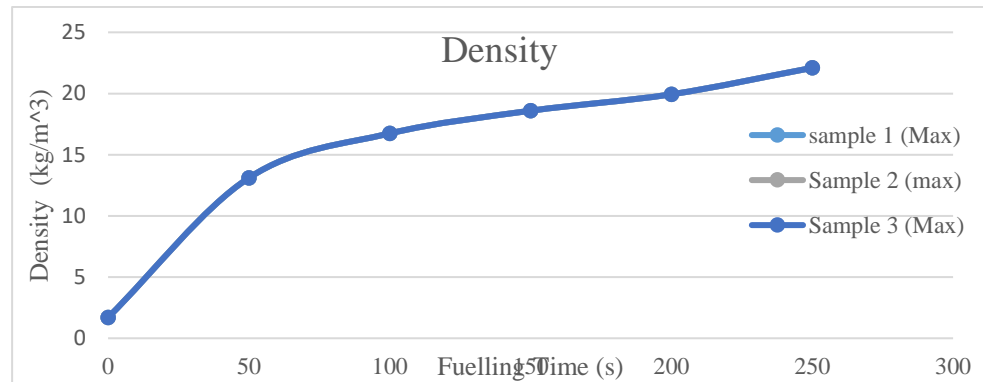
Tabel 4.15 *Max Density Tank Type 3*

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.

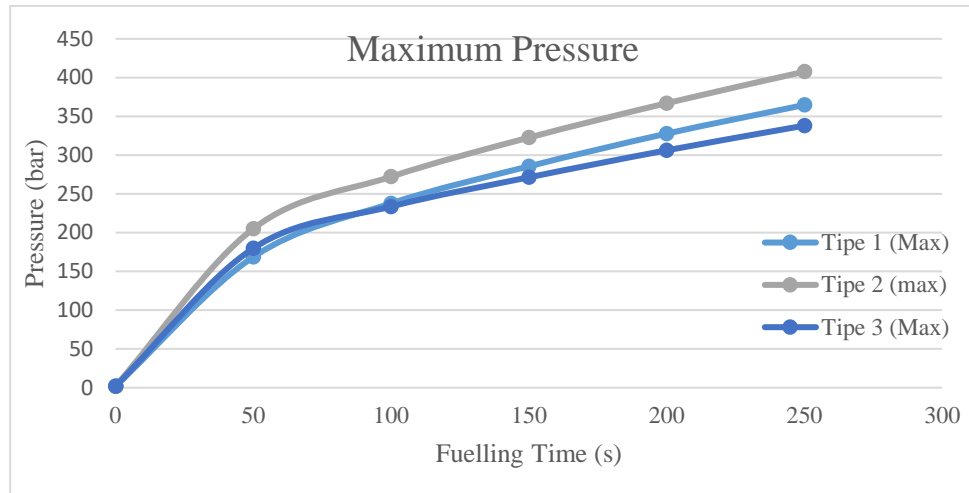


Gambar 4.26 Grafik *Max Density tank Type 3*

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*

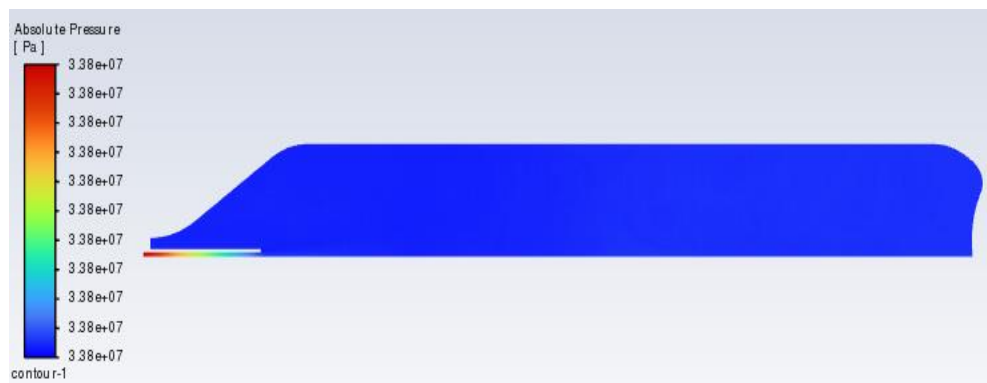
Untuk menganalisis dan memilih tipe tangki hidrogen yang paling baik berdasarkan *flow time*, kita perlu memeriksa bagaimana tekanan dari masing-masing tipe berkembang seiring dengan waktu. Tipe tangki yang lebih baik adalah yang dapat mencapai tekanan tertinggi dengan kecepatan yang lebih cepat atau 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)



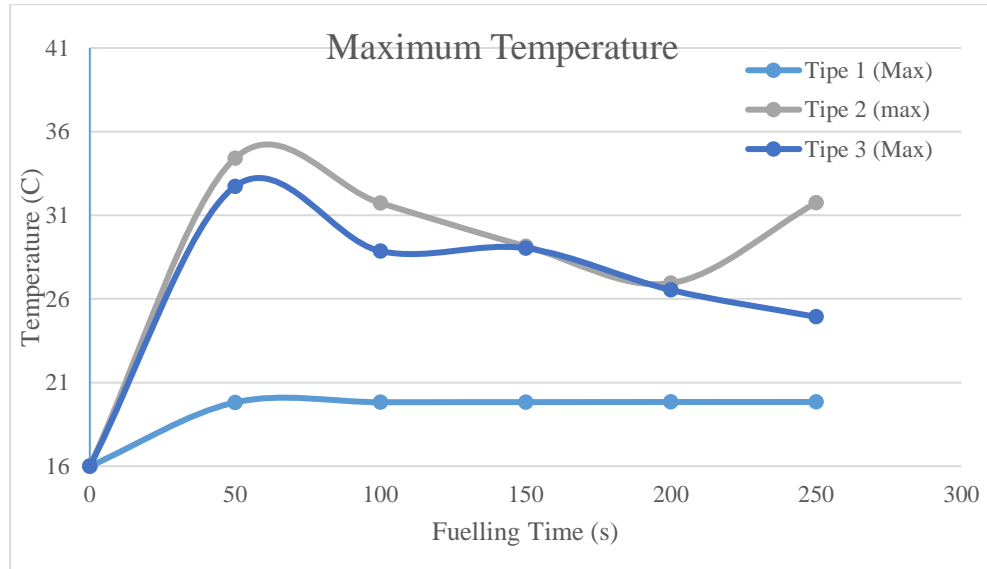
(C)

Gambar 4.28 *Contour Maximum Pressure*

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

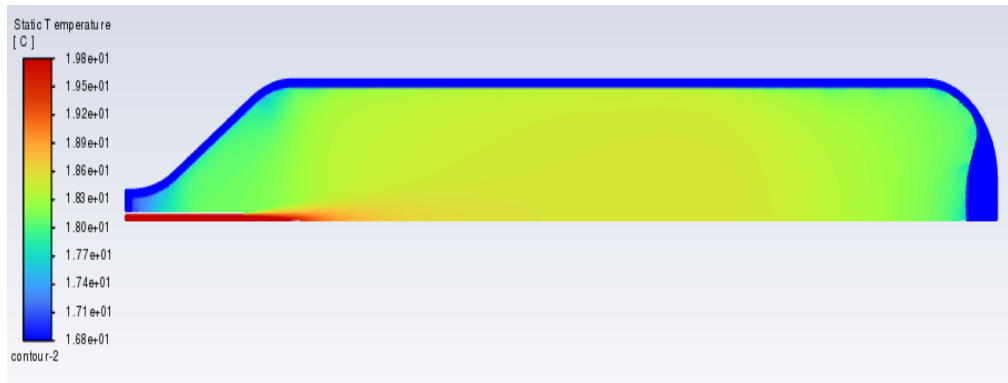
Dari gambar 4.28 yang menunjukkan mengenai kontur tekanan pada tangki tipe 1 (A), 2 (B), dan 3 (C). Dari ketiganya, memiliki persamaan yang sama. Yang mana warna biru merupakan tekanan yang ada pada ruang tabung. Warna biru diidentifikasi sebagai tekanan minimum pada *flow time* 250 s. sedangkan warna 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.

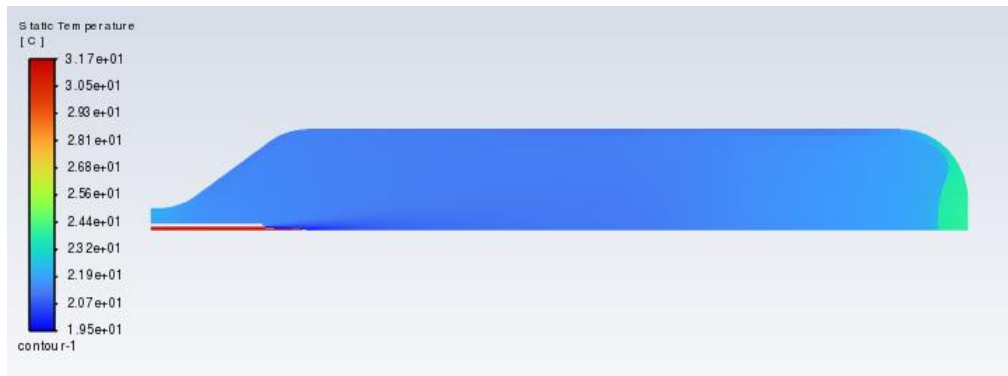


Gambar 4.29 Grafik *Maximum Temperature Hydrogen Tank*

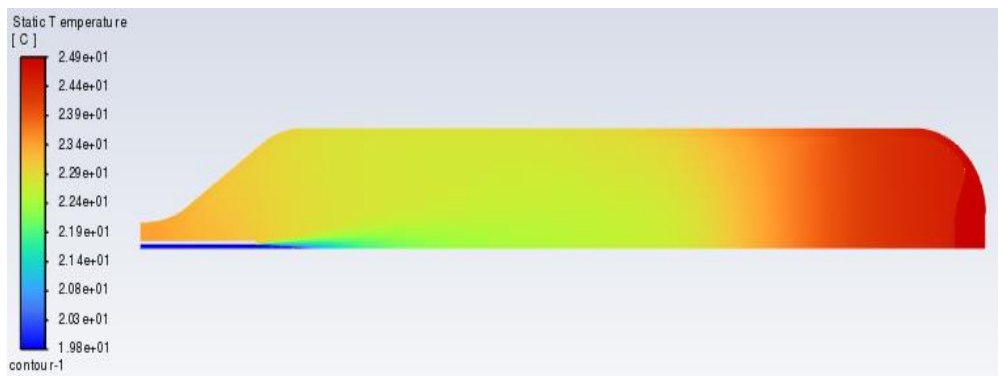
Suhu pada tipe 1 naik secara konsisten dan stabil dari 16°C menjadi sekitar 19.83°C pada akhir periode 250 s. Ini menunjukkan bahwa tipe 1 mampu mempertahankan peningkatan suhu yang stabil sepanjang waktu, tanpa fluktuasi yang signifikan. Suhu pada tipe 2 naik secara signifikan pada awalnya, tetapi kemudian 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)

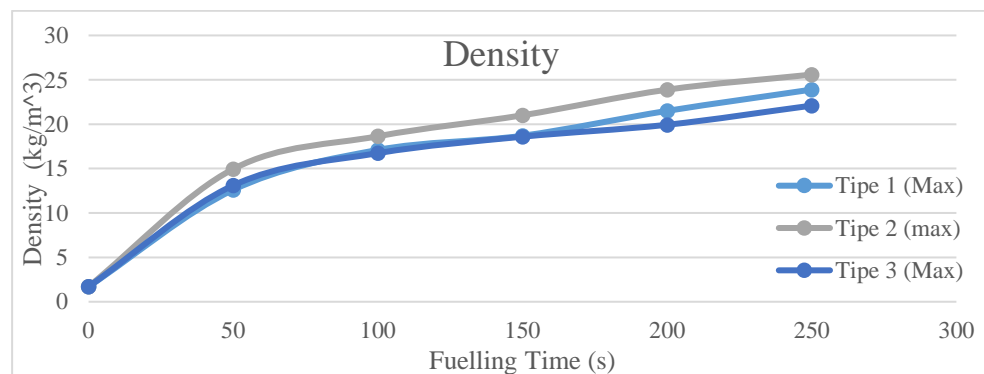
Gambar 4.30 *Contour Maximum Temperature*

(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 tempratur minimum yang dapat ditandakan dengan warna biru. Dengan kata lain, tangki tipe 1 dapat menjaga tempratur tangki secara konsisten tanpa adanya pengaruh dari tempratur fluida dan isolasi dari *carbon fiber*. Pada kontur tipe 2 (B) tempratur maksimum berada pada *nozzle inlet* yang ditandakan dengan warna merah. Hanya saja, fluida yang masuk akan langsung menurun *temperature*-nya dengan ditandakan 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 tempratur fluida. Pada kontur 3 (C) tempratur maksimum berada pada bagian bawah tangki. Dan temperature akan semakin menurun mendekati *nozzle inlet* hidrogen.

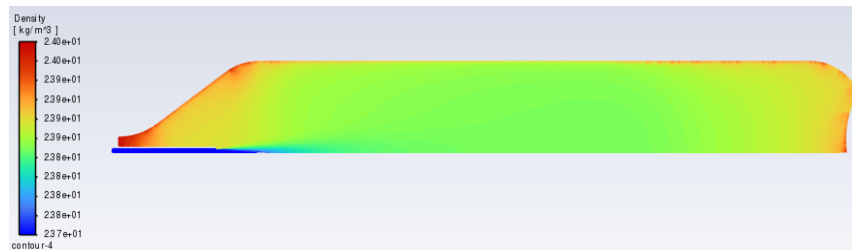
Setelah membandingkan *maximum pressure* dan *Temperature* pada tangki tipe 1, 2, dan 3. Maka selanjutnya yaitu membandingkan densitas pada saat proses pengisian hidrogen kedalam tangki. Dari ketiga tipe, sudah dipilih sampel terbaik untuk dijadikan bahan pembanding. Berikut merupakan grafik serta kontur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



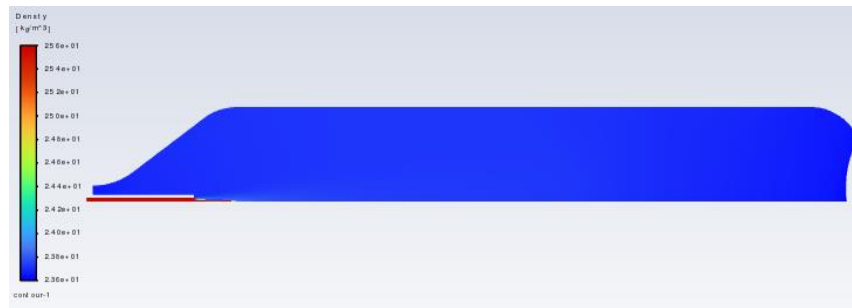
Gambar 4.31 Grafik *Maximum Density Hydrogen Tank*

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

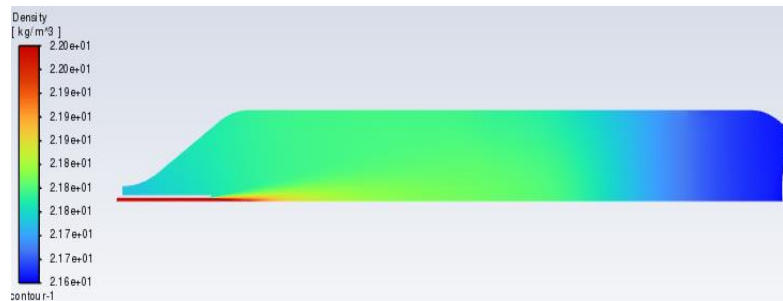
menunjukkan peningkatan densitas yang lebih besar daripada Tipe 1. Densitas pada Tipe 2 mulai dari 14.9501 kg/m^3 pada iterasi kedua dan mencapai 25.5869 kg/m^3 pada iterasi keenam, menunjukkan peningkatan yang signifikan dalam densitas seiring berjalannya waktu. Tipe 3 juga menunjukkan peningkatan densitas 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 temperatur maksimum, yang dapat menjaga temperatur berdasarkan simulasi yakni hanya tangki tipe 1. Dengan temperatur maksimum gas hidrogen sebesar 19.8°C pada *nozzle inlet*, temperatur gas sebesar 18° pada ruang tangki berdasarkan kontur, dan temperatur tangki sebesar 16.8°C (dengan syarat temperatur 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.