

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

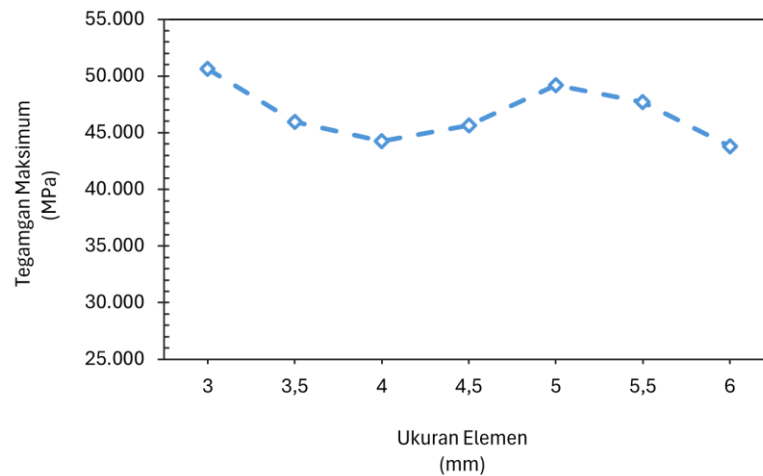
Bab ini menyajikan hasil simulasi dan pembahasan yang mencakup hasil uji grid independence, proses optimasi geometri rangka, hasil simulasi dinamis pada kondisi pengereman meliputi tegangan ekuivalen maksimum, deformasi maksimum, *safety factor* minimum, perbandingan berat antar rangka terhadap material, kekuatan spesifik, dan rekomendasi desain.

4.1 Uji *Grid Independence* dan *Skewness*

Pada kondisi *boundary condition* yang disimulasikan, dilakukan uji grid independence terhadap mesh agar memperoleh data yang mendekati kondisi sebenarnya. Uji grid independence dilakukan dengan memvariasikan *element size* untuk mendapatkan tegangan ekuivalen maksimum *konvergen* dan ditunjukkan pada Tabel 4.1

Tabel 4.1 Hasil uji *grid independence*

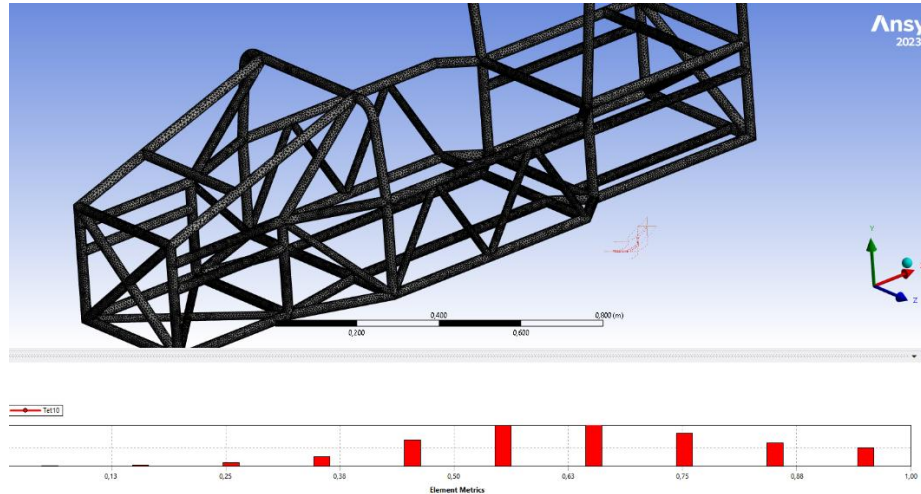
Element Size (mm)	Skewness	Tegangan Maximum (Mpa)	Standart Error %
6	0,740	43.788	-
5,5	0,732	47.678	-8
5	0,725	49.213	-3
4,5	0,699	45.631	8
4	0,651	44.237	3
3,5	0,633	45.939	-4
3	0,518	50.642	-9



Gambar 4.1 Hasil uji *grid independece*

Gambar 4.1 diatas adalah hasil uji konvergensi dengan menggunakan variasi element size dan menunjukan hasil di *element size* 4,5. 4. 3,5 dengan perbedaan nilai tegangan ekuivalen maksimum yang tidak terlalu signifikan yang artinya yang menunjukan bahwa hasil *konvergen* atau nilai tegangan maksimum yang tidak bergantung pada ukuran element.

Berdasarkan hasil uji grid independence tersebut, ukuran element sebesar 4 mm dipilih sebagai ukuran mesh yang digunakan seluruh proses simulasi karena menghasilkan nilai tegangan ekuivalen maksimum yang konvergen dengan efisiensi komputasi yang baik dan dengan standart eror dibawah 5%. Kualitas mesh juga dievaluasi menggunakan parameter skewness, di mana nilai rata-rata skewness yang diperoleh dari element size 4 adalah 0,65 yang termasuk dalam kategori good berdasarkan metrik kualitas mesh yang ditunjukan pada Gambar 4.2



Gambar 4.2 Hasil meshing dan rata-rata skewness

4.2 Simulasi Dinamis Kondisi Pengereman

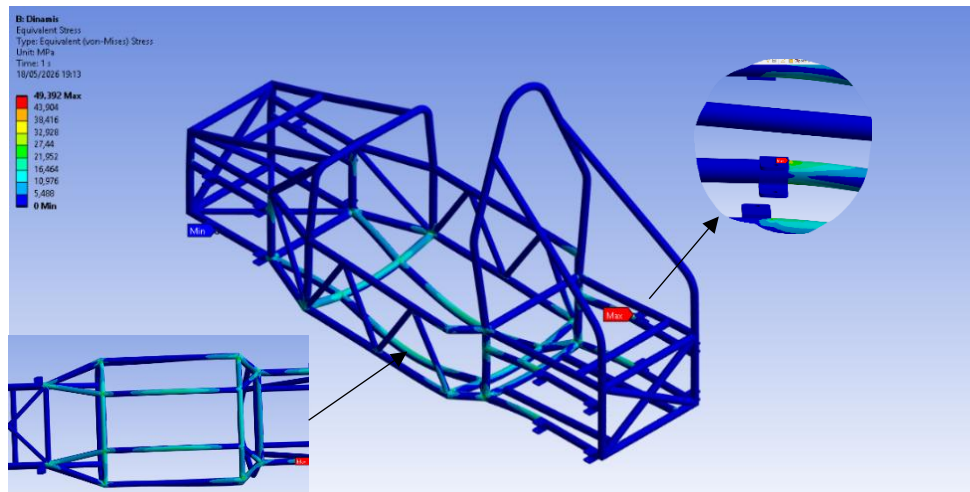
Simulasi kondisi pengereman ini dilakukan pada tiga varian desain rangka yaitu, desain awal, desain optimasi 1, dan desain optimasi 2, untuk mengevaluasi pengaruh perubahan geometri terhadap kekuatan dan kekakuan struktural rangka pada kondisi pengereman.

4.2.1 Tegangan Ekuivalen Maksimum

Tegangan ekuivalen maksimum digunakan sebagai parameter utama dalam mengevaluasi kekuatan struktural rangka pada kondisi dinamis pengereman. Nilai tegangan ini merepresentasikan kombinasi dari seluruh komponen tegangan yang bekerja pada setiap titik elemen rangka. Berikut ini adalah hasil simulasi tegangan ekuivalen maksimum untuk masing-masing varian desain rangka:

A. Desain awal

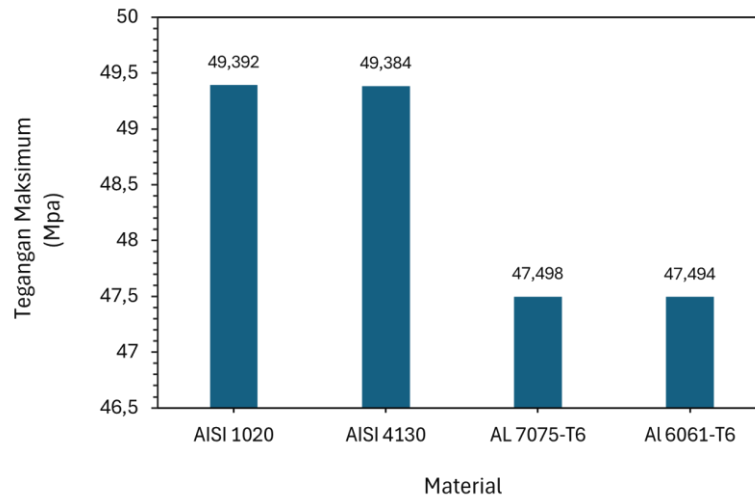
Berdasarkan hasil simulasi dinamis pada kondisi pengereman Gambar 4.3 desain awal menunjukkan nilai tegangan maksimum sebesar 49,392 Mpa pada material AISI 1020. Distribusi tegangan pada rangka menunjukkan bahwa sebagian besar elemen rangka berada pada rentang tegangan rendah yang mengindikasikan distribusi beban yang cukup merata. Konsentrasi tegangan tertinggi terdapat pada sambungan pipa belakang, tepatnya pada titik pertemuan pipa dengan titik tumpu. Dari simulasi tersebut, dilakukan variasi material untuk mengetahui perbedaan respon tegangan maksimal.



Gambar 4.3 Hasil tegangan ekuivalen desain awal material AISI 1020

Dari hasil simulasi tersebut, dilakukan variasi material untuk mengetahui perbedaan respon rangka terhadap tegangan maksimum. Pada Gambar 4.4 AISI 1020 dan AISI 4130 menghasilkan nilai tegangan yang hampir identik yaitu 49,392 Mpa dan 49,383 Mpa, hal ini disebabkan oleh kesamaan nilai modulus elastisitas keduanya. Sementara itu, material aluminium menunjukkan nilai tegangan yang lebih rendah, yaitu AL 7075-T6 sebesar 47,498 MPa dan Al 6061-T6 sebesar 47,494 MPa.

Perbedaan ini disebabkan oleh perbedaan sifat mekanik antara baja dan aluminium, di mana aluminium memiliki modulus elastisitas yang lebih rendah sehingga distribusi tegangan yang terbentuk berbeda meskipun geometri rangka sama.

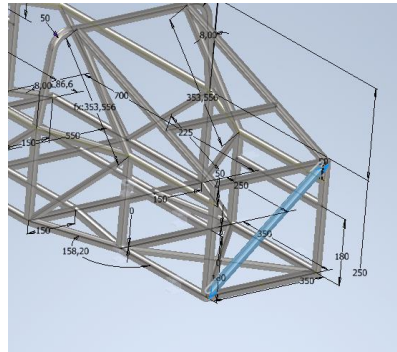


Gambar 4.4 Grafik perbandingan tegangan ekuivalen maksimum desain awal terhadap material

B. Desain Optimasi 1

Desain optimasi 1 merupakan hasil optimasi dari desain rangka mobil KMLI pertama, proses optimasi dilakukan berdasarkan hasil analisis simulasi awal dengan memperhatikan distribusi tegangan von Mises, deformasi maksimal, dan nilai *safety factor*. Modifikasi geometri rangka diarahkan pada pengurangan massa tanpa mengorbankan kekuatan struktural, dengan mengacu pada prinsip efisiensi material. Proses optimasi rangka mobil KMLI dilakukan dengan:

1. Pengurangan pipa pada area frontal depan.



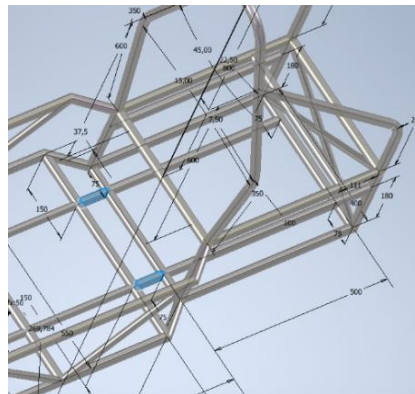
Gambar 4.5 Pengurangan geometri frontal depan

2. Konfigurasi area samping pada rangka.



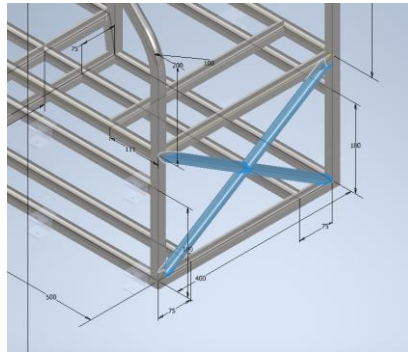
Gambar 4.6 Konfigurasi rangka area samping

3. Kofigurasi rangka area tengah pada rangka.



Gambar 4. 7 Kofigurasi rangka area tengah

4. Pengurangan diameter pipa area frontal belakang menjadi 19,5 mm.



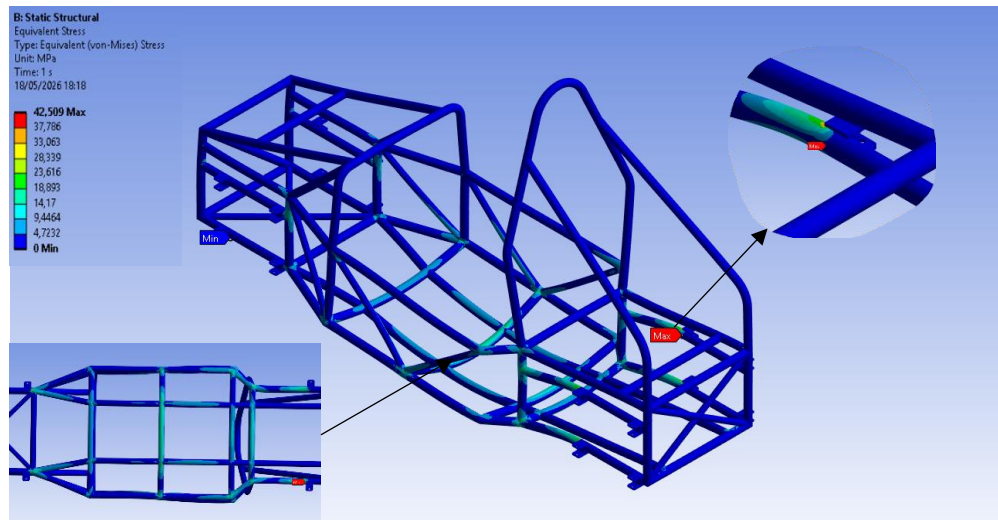
Gambar 4.8 Pengurangan diameter frontal belakang

- Menambahkan pipa penguat pada bagian tengah dengan diameter 25,4 mm.



Gambar 4.9 Penambahan pipa bagian tengah

Dari hasil optimalisasi didapatkan desain optimasi 1, yang selanjutnya dilakukan proses simulasi dinamis saat pengereman dengan hasil tegangan ekuivalen pada Gambar 4.10

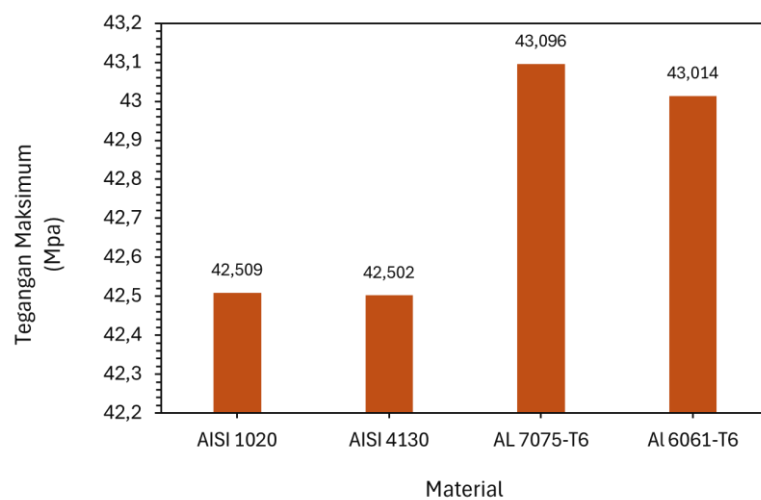


Gambar 4.10 Hasil tegangan ekuivalen desain optimasi 1 material AISI 1020

Hasil simulasi statis pada desain optimasi 1 menghasilkan nilai tegangan maksimum sebesar 42,509 Mpa dengan material AISI 1020. Konviguravi area samping berbentuk-V menghasilkan tegangan yang lebih besar dari desain awal, tetapi masih menunjukkan nilai batas aman. Pada Gambar 4.10 merupakan hasil tegangan pada bawah rangka desain optimasi 1 yang berhasil menurunkan tegangan dari desain awal. Modifikasi berupa penambahan pipa penguat pada bagian tengah, berhasil mendistribusikan beban secara lebih efisien dengan nilai tegangan 14,7 Mpa pada struktur yang menerima beban pengemudi dan kursi, sedangkan konvigurasi pipa bagian tengah berhasil mendistribusikan beban lebih merata dan meminimalisir pada area yang memiliki sambungan berlebih. Konsentrasi tegangan tertinggi terlokalisasi pada area sambungan pipa bagian breket belakang rangka.

Dari hasil variasi material pada Gambar 4.11 optimasi 1 memperoleh nilai tegangan maksimum yang lebih rendah dibandingkan desain awal. Untuk material AISI 1020 diperoleh 42,509 MPa dan AISI 4130 sebesar 42,502 MPa, yang keduanya

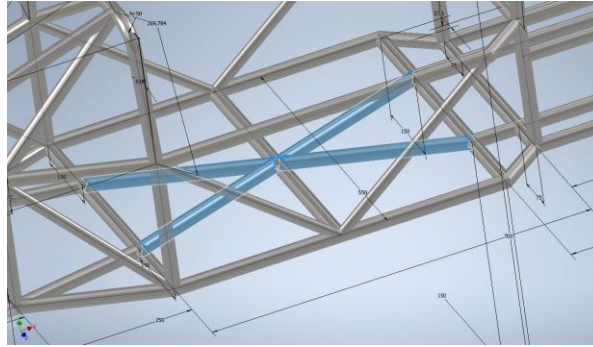
menunjukkan penurunan signifikan dibandingkan desain awal. Pada material aluminium menghasilkan tegangan yang sedikit lebih tinggi dibandingkan material baja yaitu, AL 7075-T6 sebesar 43,096 MPa dan Al 6061-T6 sebesar 43,014 MPa. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan geometri pada desain optimasi 1 lebih menguntungkan untuk material baja dalam mendistribusikan tegangan, sedangkan konfigurasi pola-V yang ditambahkan menghasilkan konsentrasi tegangan berbeda bagi material aluminium akibat perbedaan kekakuan.



Gambar 4.11 Grafik perbandingan tegangan ekuivalen maksimum desain optimasi 1 terhadap material

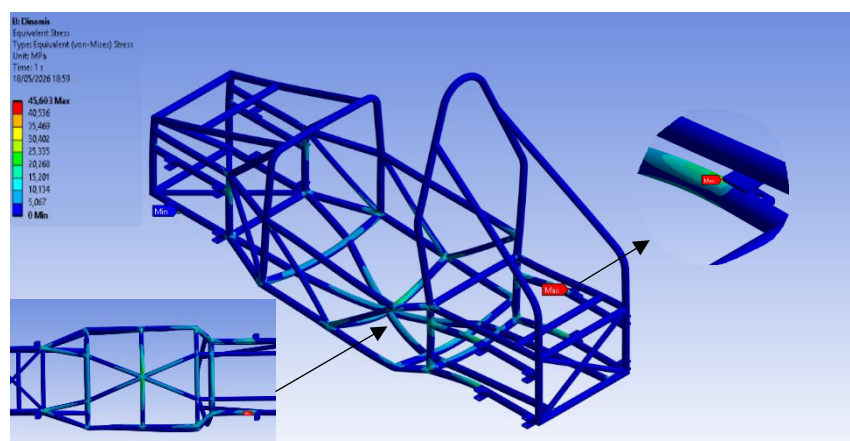
C. Desain optimasi 2

Desain optimasi 2 merupakan desain optimasi 2 hanya saja rangka diubah konfigurasi bagian tengah bawah menjadi X untuk mengetahui respon rangka yang ditunjukkan Gambar 4.12



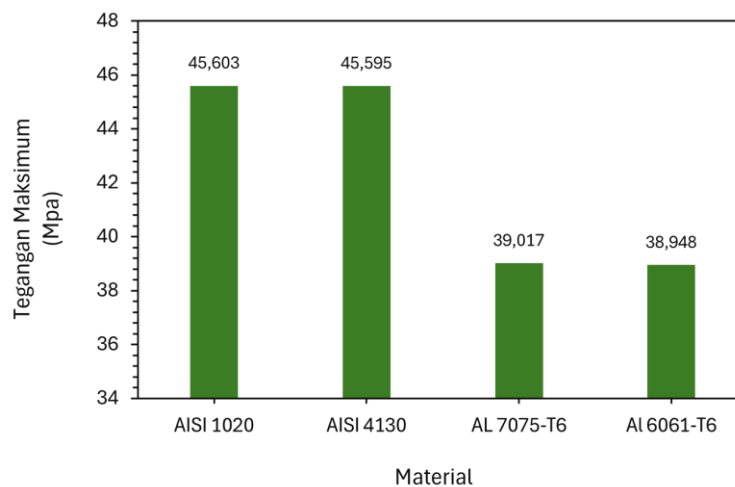
Gambar 4.12 Perubahan konfigurasi pipa tengah pada desain optimasi 2

Pada simulasi dinamis desain optimasi 2, diperoleh nilai tegangan maksimum sebesar 45,603 Mpa yang ditunjukkan Gambar 4.13. Pada area tengah hasil optimasi mendapatkan tegangan sebesar 20 Mpa, nilai ini lebih tinggi dibanding desain optimasi 1. Sedangkan pada perubahan konfigurasi pola-V pada area samping mendapatkan tegangan sebesar 15,201 Mpa. Perubahan bagian tengah menjadi X mengakibatkan tegangan naik yang ditunjukkan. Konsentrasi tegangan tertinggi berada pada pipa bagian bracket belakang rangka, sementara titik minimum tegangan berada di bagian ujung depan rangka.



Gambar 4.13 Hasil tegangan desain optimasi 2 material AISI 1020

Pada Gambar 4.14 desain optimasi 2 menghasilkan nilai tegangan maksimum sebesar 45,603 MPa untuk AISI 1020 dan 45,595 MPa untuk AISI 4130. Pada material aluminium, desain optimasi 2 justru menghasilkan performa terbaik di antara ketiga variasi desain yang disimulasikan, AL 7075-T6 hanya menghasilkan tegangan 39,017 MPa dan Al 6061-T6 sebesar 38,949 Mpa. Hal ini menunjukkan konfigurasi pada bagian tengah pada desain optimasi 2 lebih kompatibel pada material aluminium sehingga menghasilkan distribusi tegangan yang lebih baik dari baja.



Gambar 4.14 Grafik perbandingan tegangan ekuivalen maksimum desain optimasi 2 terhadap material

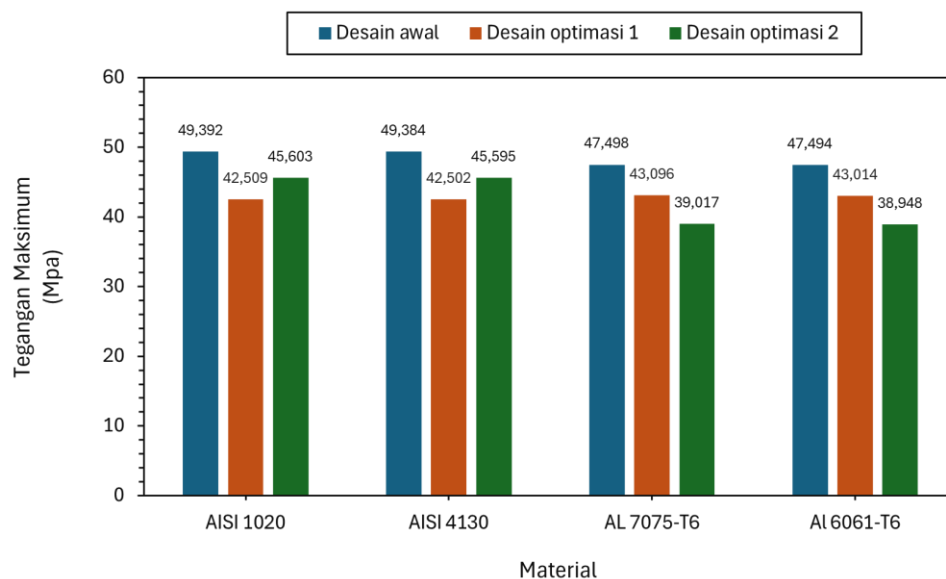
D. Perbandingan Nilai Tegangan Ekuivalen Maksimum

Pada Gambar 4.15, desain awal menghasilkan nilai tegangan maksimum tertinggi pada material AISI 1020 49,392 Mpa. Tingginya tegangan mengindikasikan adanya distribusi beban yang belum optimal, dimana konsentrasi tegangan terpusat pada sambungan pipa di bagian tengah-bawah rangka akibat beban dan momen inersia saat pengereman.

Pada desain optimasi 1 tegangan maksimum mengalami penurunan menjadi

42,509 Mpa untuk AISI 1020 dan 42,502 Mpa untuk AISI 4130. Penurunan tegangan ini diakibatkan oleh penambahan pipa pada bagian tengah-bawah untuk meminimalisir tegangan berlebih dan bagian samping berpola-V sebagai penguat yang secara efektif mendistribusikan beban lebih merata dan mampu mengurangi konsentrasi tegangan pada titik kritis.

Pada desain optimasi 2 menunjukkan hasil yang terbaik untuk material aluminium dengan AL 7075-T6 menghasilkan tegangan 39,017 Mpa dan Al 6061-T6 sebesar 39,948 Mpa. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan konfigurasi geometri pada desain optimasi 2 sangat kompatibel dengan karakteristik kekakuan material aluminium



Gambar 4.15 Grafik perbandingan tegangan ekuivalen maksimum desain dengan material

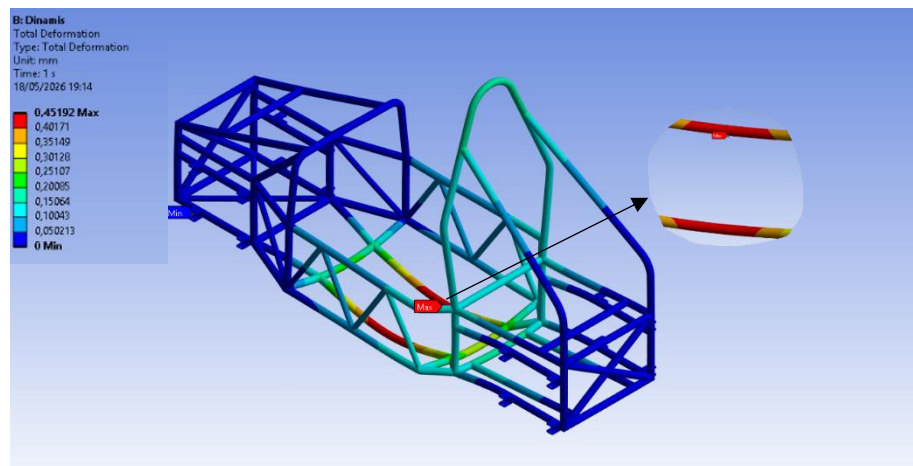
4.2.2 Deformasi

Deformasi total pada rangka dianalisis untuk mengetahui perpindahan maksimum yang terjadi akibat beban dinamis pada kondisi pengereman. Nilai

deformasi yang rendah menunjukkan bahwa rangka memiliki kekakuan yang baik dalam menahan perubahan bentuk selama perlambatan. Hasil simulasi deformasi untuk ketiga varian desain disajikan sebagai berikut:

A. Desain awal

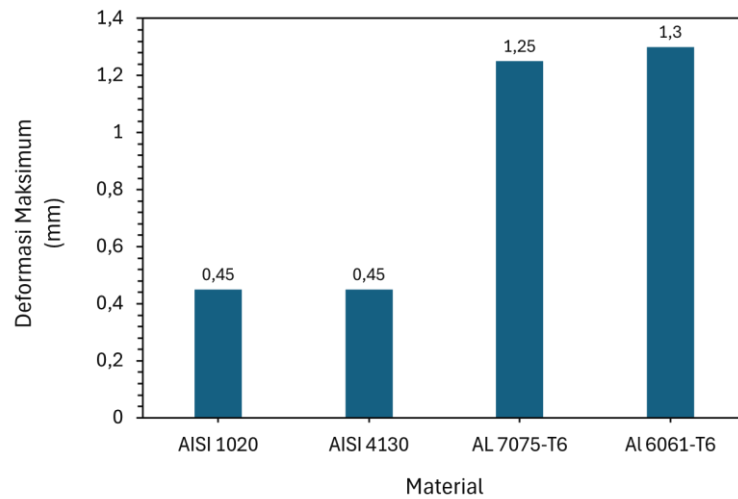
Dari Gambar 4.16 menunjukkan nilai deformasi total maksimum sebesar 0,45 mm. Konsentrasi deformasi maksimal terletak pada bagian struktur pipa melintang yang menerima beban kursi, pengemudi dan momen inersianya. Distribusi deformasi secara keseluruhan didominasi oleh warna biru, yang menunjukkan bahwa sebagian elemen rangka mengalami perpindahan yang relatif kecil. Nilai deformasi maksimum tersebut masih dalam batas telah ditetapkan.



Gambar 4.16 Hasil deformasi desain awal material AISI 1020

Pada Gambar 4.17 diatas deformasi total maksimum sebesar 0,45 mm untuk material AISI 1020 dan AISI 4130, yang nilainya identik karena kedua material memiliki modulus elastisitas yang sama 205 GPa. Sebaliknya, material aluminium mengalami deformasi yang jauh lebih besar dibanding baja, AL 7075-T6 sebesar 1,25 mm dan Al 6061-T6 sebesar 1,3 mm. Perbedaan nilai yang cukup signifikan

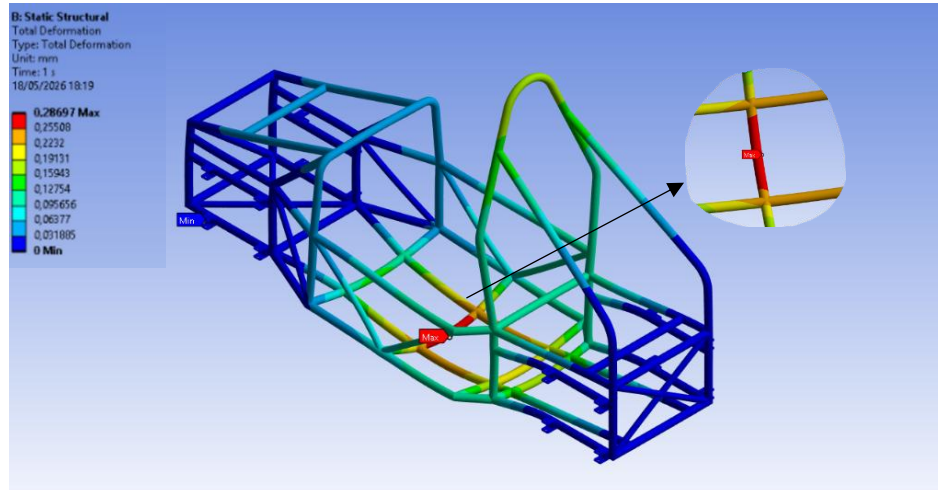
disebabkan nilai modulus elastisitas aluminium yang lebih rendah yaitu sekitar 69-72 Gpa.



Gambar 4.17 Grafik perbandingan deformasi maksimum desain awal terhadap material

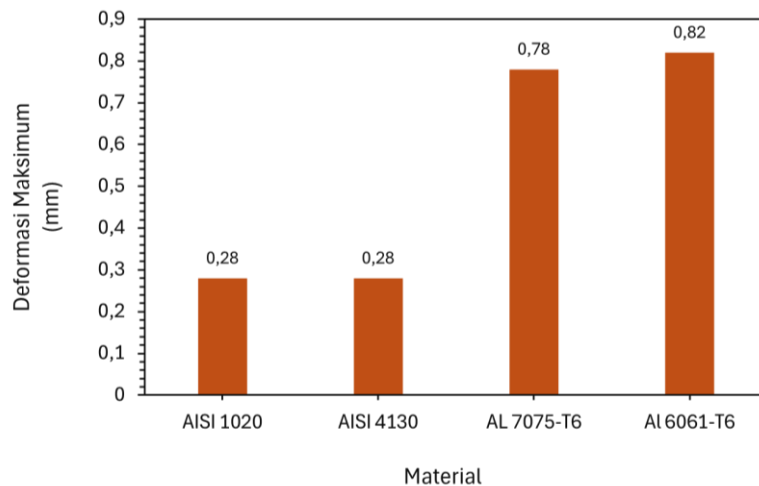
B. Desain optimasi 1

Pada Gambar 4.18 diperoleh nilai deformasi maksimum sebesar 0,28 mm pada material AISI 1020 dan AISI 4130. Deformasi maksimum terlokalisasi pada bagian bawah tengah rangka. Pola distribusi minimum hingga maksimum memperlihatkan gradien perpindahan yang teratur dari titik tumpuan menuju titik bebas, yang mengindikasikan bahwa geometri rangka mendistribusikan beban dengan cukup baik. Hal ini juga menunjukkan bahwa modifikasi pada desain optimasi 1, berupa penambahan pipa penguat berpola-V, berkontribusi pada peningkatan kekakuan keseluruhan struktur.



Gambar 4.18 Hasil deformasi desain optimasi 1 material AISI 1020

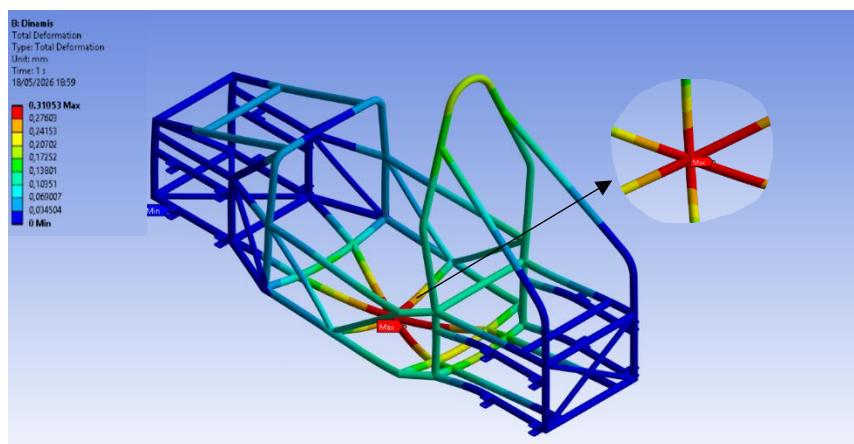
Dari Gambar 4.19 material AISI 1020 dan AISI 4130 menghasilkan deformasi sebesar 0,28 mm, turun sekitar 35% dibandingkan desain awal. Pada material aluminium juga mengalami penurunan deformasi yang proporsional, di mana deformasinya sebesar 0,8 yang menurun sekitar 37% dibandingkan desain awal. Penurunan deformasi yang konsisten pada seluruh material membuktikan bahwa penambahan pipa penguat pada bagian tengah dan konfigurasi samping berpola-V pada desain optimasi 1 secara efektif meningkatkan kekakuan keseluruhan struktur, terlepas dari jenis material yang digunakan.



Gambar 4.19 Grafik perbandingan deformasi maksimum desain optimasi 1 terhadap material

C. Desain optimasi 2

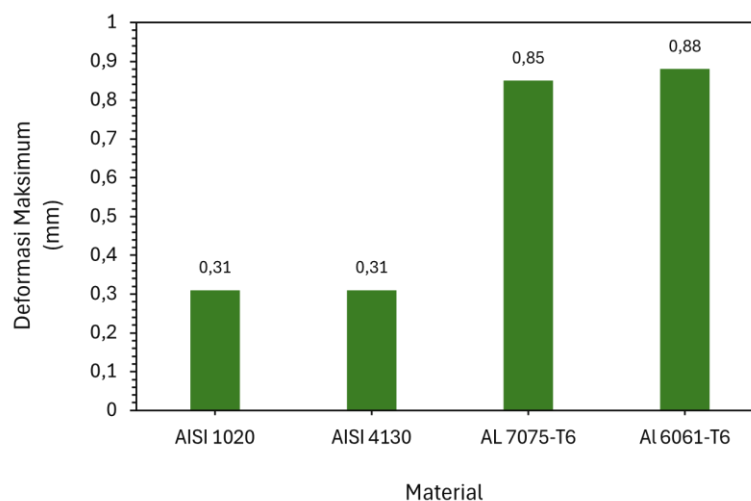
Pada Gambar 4.20 menghasilkan nilai deformasi total maksimum sebesar 0,31 mm. Deformasi maksimal terpusat pada area sambungan pipa di bagian tengah-samping bawah rangka. Pola distribusi deformasi pada desain optimasi 2 menunjukkan sebaran yang lebih merata dibandingkan desain awal, yang mengindikasikan bahwa perubahan konfigurasi pipa menjadi posisi miring pada desain optimasi 2 berhasil meningkatkan distribusi kekakuan secara lateral dan longitudinal.



Gambar 4.20 Hasil deformasi desain optimasi 2 material AISI 1020

Pada Gambar 4.21 ke dua material baja menghasilkan deformasi yang sama, yaitu 0,31 mm, sedangkan aluminium menghasilkan deformasi yang lebih besar. Perbedaan ini disebabkan oleh modulus elastisitas yang berbeda, baja memiliki modulus elastisitas sekitar 205 GPa, jauh lebih tinggi dibandingkan aluminium yang hanya sekitar 69–72 GPa. Semakin rendah modulus elastisitas, semakin besar deformasi yang terjadi akibat beban yang sama.

Meski deformasi material aluminium lebih besar, pada desain optimasi 2 masih lebih baik dibandingkan desain awal, yang menunjukkan bahwa proses optimasi geometri berhasil meningkatkan kekakuan struktural rangka secara keseluruhan.

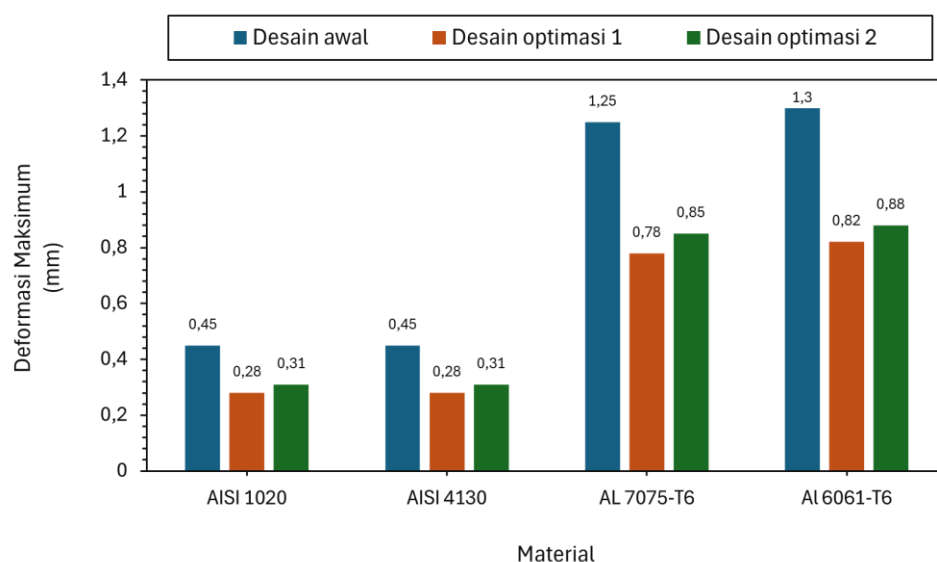


Gambar 4.21 Grafik perbandingan deformasi maksimum desain optimasi 2 terhadap material

D. Perbandingan Nilai Deformasi

Dari Gambar 4.22, desain awal menghasilkan nilai deformasi total maksimum sebesar 0,45 mm pada material AISI 1020 dan AISI 4130. Konsentrasi deformasi terlokalisasi pada bagian tengah-bawah rangka, yaitu pada struktur pipa melintang yang menerima beban kursi, pengemudi, dan gaya inersia akibat pengereman. Pada

desain optimasi 1 berhasil mereduksi deformasi secara signifikan. Material AISI 1020 dan AISI 4130 menghasilkan deformasi sebesar 0,28 mm, turun sekitar 35,6% dibandingkan desain awal. Penurunan yang konsisten juga terlihat pada material aluminium, di mana AL 7075-T6 menurun menjadi 0,78 dan Al 6061-T6 menghasilkan deformasi 0,82 mm, turun sekitar 37% dari desain awal. Penurunan yang proporsional pada semua material ini membuktikan bahwa penambahan pipa penguat berpola-V dan konfigurasi samping yang dimodifikasi pada desain optimasi 1 secara efektif meningkatkan kekakuan keseluruhan struktur, terlepas dari jenis material yang digunakan. Desain optimasi 2 menghasilkan deformasi sebesar 0,31 mm untuk material baja. Pada material aluminium, AL 7075-T6 menghasilkan deformasi 0,78 mm dan Al 6061-T6 sebesar 0,88 mm. Pada desain awal, material aluminium menghasilkan deformasi hampir tiga kali lipat dibandingkan material baja. AL 7075-T6 menghasilkan deformasi 1,25 mm dan Al 6061-T6 sebesar 1,3 mm, sedangkan AISI 1020 dan AISI 4130 hanya 0,45 mm.



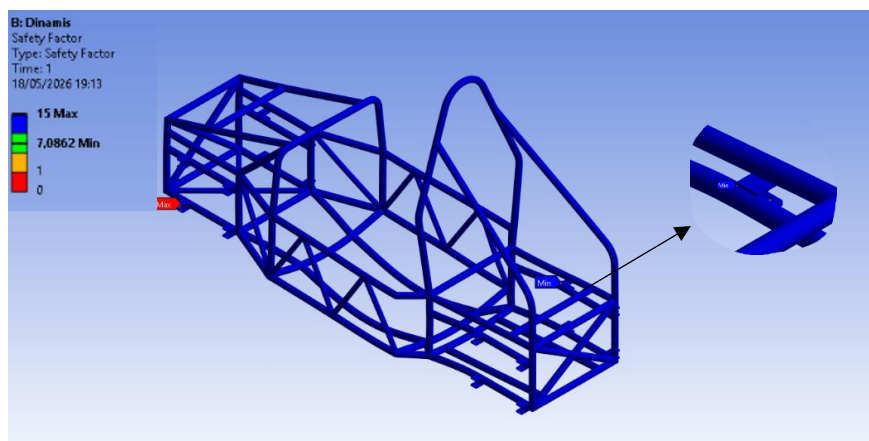
Gambar 4.22 Grafik perbandingan deformasi maksimum desain dengan material

4.2.3 *Safety factor*

Safety factor dihitung untuk memastikan bahwa rangka mobil KMLI tidak mengalami kegagalan struktur pada kondisi operasional. Nilai *safety factor* minimum yang lebih besar dari 2 menunjukkan bahwa rangka masih mampu menahan beban yang diberikan, sedangkan nilai di bawah 2 mengindikasikan potensi kegagalan. Hasil simulasi *safety factor* minimum pada kondisi pengereman untuk masing-masing desain ditampilkan berikut ini:

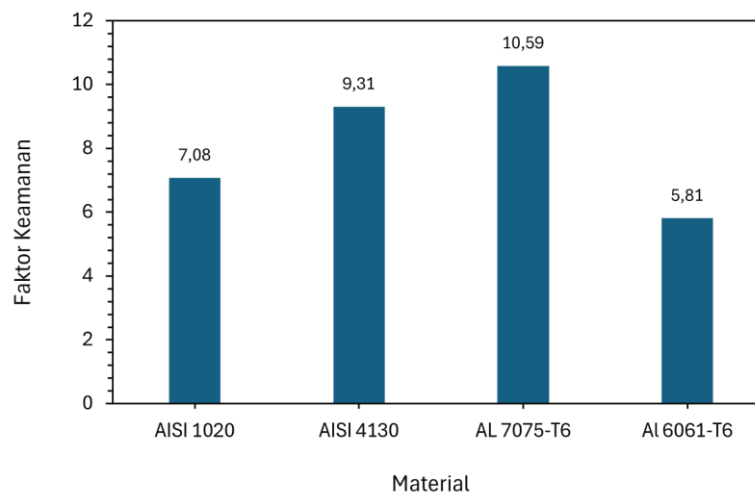
A. Desain awal

Pada Gambar 4.23 *safety factor* pada kondisi dinamis untuk desain awal menunjukkan nilai minimum sebesar 7,08 yang menandakan bahwa nilai *safety factor* minimum di semua bagian struktur berada jauh di atas nilai ambang batas minimum yang disyaratkan ($SF > 2$). Titik dengan nilai *safety factor* minimum berada pada area samping-depan rangka, yang konsisten dengan lokasi konsentrasi tegangan tertinggi pada hasil simulasi tegangan maksimum.



Gambar 4.23 Hasil *safety factor* minimum desain awal material AISI 1020

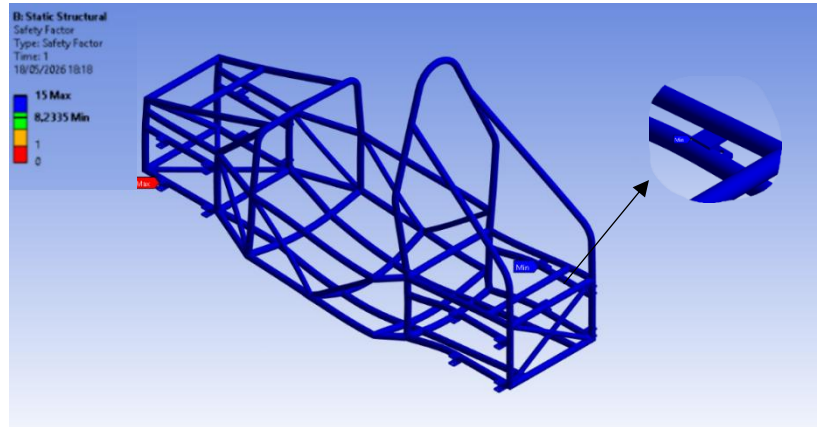
Pada Gambar 4.24 menunjukkan nilai *safety factor* minimum sebesar 7,08 pada material AISI 1020. Terlihat bahwa material AL 7075-T6 menghasilkan *safety factor* minimum tertinggi sebesar 10,59 diikuti AISI 4130 sebesar 9,22. Material Al 6061-T6 menghasilkan *safety factor* minimum terendah sebesar 5,81, namun masih jauh melampaui nilai minimum yang disyaratkan ($SF > 2$).



Gambar 4.24 Grafik perbandingan *safety factor* minimum desain awal terhadap material

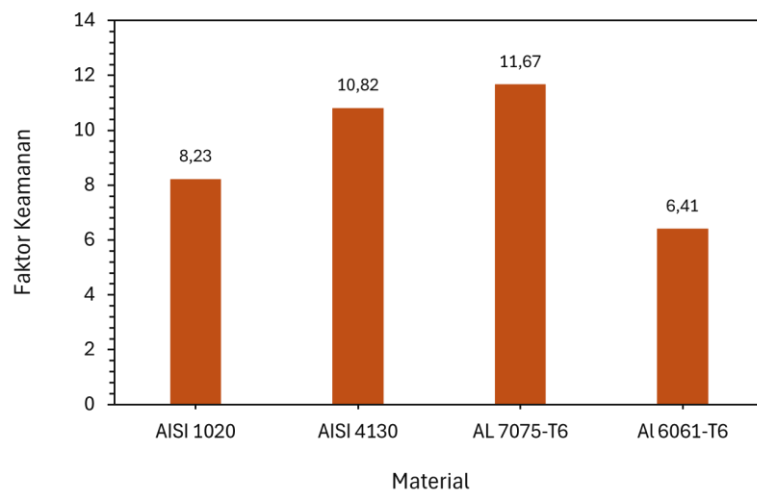
B. Desain optimasi 1

Pada simulasi dinamis desain optimasi 1 yang ditunjukkan pada Gambar 4.25, nilai *safety factor* minimum yang diperoleh AISI 1020 adalah 8,23. Nilai minimum terletak pada bagian samping kanan tengah rangka, sedangkan nilai maksimum berada pada bagian ujung depan bawah. Nilai SF minimum yang lebih tinggi dibandingkan desain awal menunjukkan bahwa modifikasi geometri pada desain optimasi 1 berhasil mendistribusikan tegangan lebih merata, sehingga konsentrasi beban pada titik kritis dapat dikurangi.



Gambar 4.25 Hasil *safety factor* minimum optimasi 1 material AISI 1020

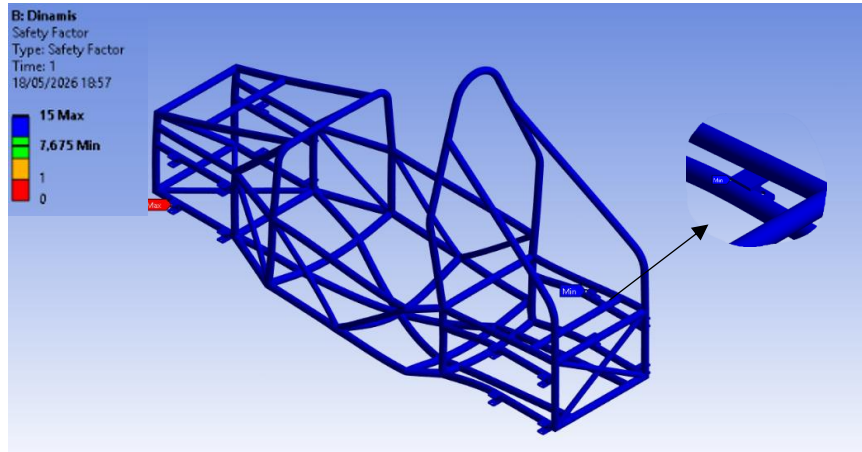
Pada Gambar 4.26 desain optimasi 1 peningkatan nilai *safety factor* minimum dibandingkan desain awal untuk semua material. AISI 1020 menghasilkan SF minimum 8,23, AISI 4130 sebesar 10,82, AL 7075-T6 sebesar 11,67 dan Al 6061-T6 sebesar 6,41. Peningkatan nilai SF pada desain optimasi 1 memvalidasi bahwa pengurangan massa melalui reduksi diameter pipa pada area tegangan rendah, disertai distribusi tegangan yang lebih merata justru menghasilkan *safety factor* minimum yang lebih baik. Hal ini memvalidasi bahwa optimasi pada desain optimasi 1 tidak hanya efisien secara material, tetapi juga meningkatkan keandalan struktural secara keseluruhan.



Gambar 4.26 Grafik perbandingan nilai *safety factor* minimum desain optimasi 1 terhadap material

C. Desain optimasi 2

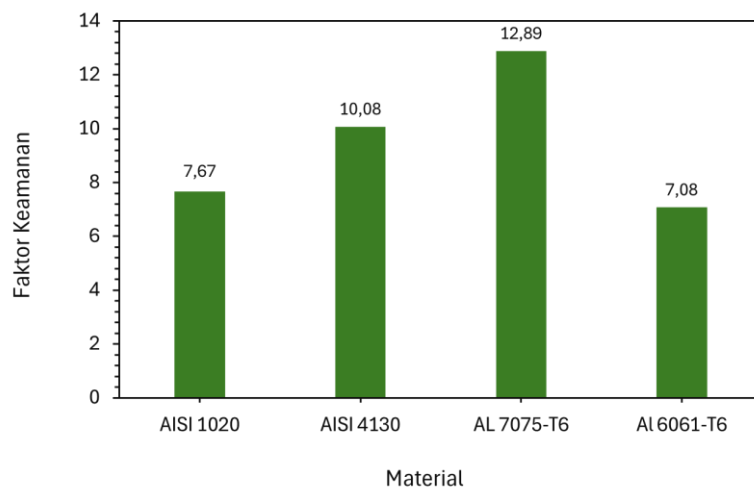
Hasil simulasi *safety factor* minimum pada Gambar 4.27 dalam kondisi dinamis untuk desain optimasi 2 menunjukkan nilai sebesar 7,67. Distribusi warna biru yang merata pada seluruh rangka mengonfirmasi bahwa tidak ada bagian dari struktur yang mengalami kondisi kritis atau mendekati batas kegagalan. Titik dengan nilai *safety factor* minimum berada pada area tengah rangka bagian dalam, yang bersesuaian dengan area konsentrasi tegangan pada simulasi tegangan maksimum.



Gambar 4.27 Hasil *safety factor* minimum desain optimasi 2 material AISI 1020

Gambar 4.28 menunjukkan variasi nilai *safety factor* minimum yang cukup signifikan antar material. Nilai tertinggi dimiliki oleh AL 7075-T6 sebesar 12,89, yang sekaligus merupakan nilai *safety factor* minimum tertinggi di antara seluruh konfigurasi desain. Hal ini konsisten karena AL 7075-T6 juga menghasilkan nilai tegangan maksimum terendah pada desain optimasi 2, artinya desain optimasi 2 sangat kompatibel dengan karakteristik material aluminium 7075-T6.

AISI 4130 memiliki yield strength lebih tinggi dari AISI 1020, sehingga menghasilkan SF lebih besar meski tegangan aktualnya hampir sama. Demikian pula AL 7075-T6 yang memiliki yield strength lebih tinggi dari Al 6061-T6, menghasilkan SF yang secara konsisten lebih tinggi. Seluruh nilai SF desain optimasi 2 berada jauh di atas batas minimum yang disyaratkan ($SF > 4$), sehingga rangka dinilai aman.



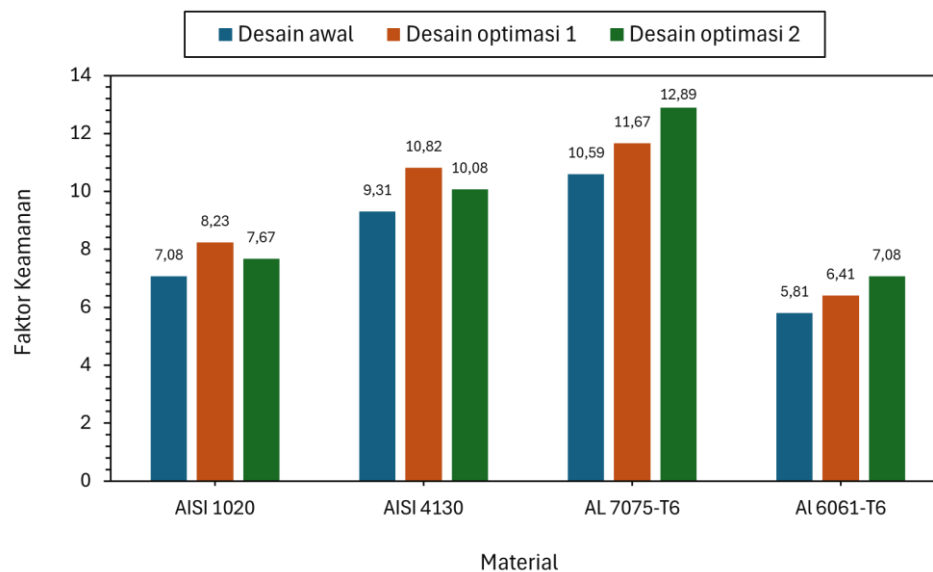
Gambar 4.28 Grafik perbandingan nilai *safety factor* minimum desain optimasi 2 terhadap material

D. Perbandingan Nilai *Safety Factor* Minimum

Dari Gambar 4.29 desain awal menghasilkan *safety factor* minimum sebesar 7,08 untuk material AISI 1020. Desain optimasi 1 menunjukkan peningkatan nilai *safety factor* minimum dibandingkan desain awal pada seluruh material. Peningkatan nilai *safety factor* ini membuktikan bahwa meskipun massa rangka dikurangi melalui pengurangan diameter pipa pada area tegangan rendah, distribusi tegangan yang lebih merata justru menghasilkan margin keamanan yang lebih baik. Hasil ini memvalidasi bahwa optimasi pada desain optimasi 1 tidak hanya efisien secara material, tetapi juga meningkatkan keandalan struktural secara keseluruhan. Pada desain optimasi 2 menghasilkan *safety factor* minimum sebesar 7,67 untuk material AISI 1020. Namun, desain optimasi 2 mencatatkan nilai *safety factor* minimum tertinggi secara keseluruhan untuk material AL 7075-T6, yaitu sebesar 12,89. Hal ini konsisten dengan nilai tegangan maksimum terendah yang juga dicapai oleh material tersebut pada desain optimasi 2, sehingga mengonfirmasi bahwa geometri desain optimasi 2 sangat

kompatibel dengan karakteristik material aluminium paduan seri 7075-T6.

Nilai *safety factor* minimum berbeda-beda antar material karena dipengaruhi oleh yield strength masing-masing material. AISI 4130 memiliki yield strength yang lebih tinggi dibandingkan AISI 1020, sehingga menghasilkan *safety factor* minimum yang lebih besar meskipun nilai tegangan maksimum keduanya hampir identik. Pada AL 7075-T6 yang memiliki yield strength lebih tinggi dari Al 6061-T6, sehingga menghasilkan *safety factor* minimum yang secara konsisten lebih tinggi pada semua varian desain. Nilai *safety factor* minimum terendah terdapat pada Al 6061-T6 desain awal sebesar 5,81, meskipun merupakan yang terendah di antara seluruh konfigurasi, nilai SF masi di atas batas minimum yang disyaratkan.



Gambar 4.29 Grafik perbandingan *safety factor* minimum desain dengan material

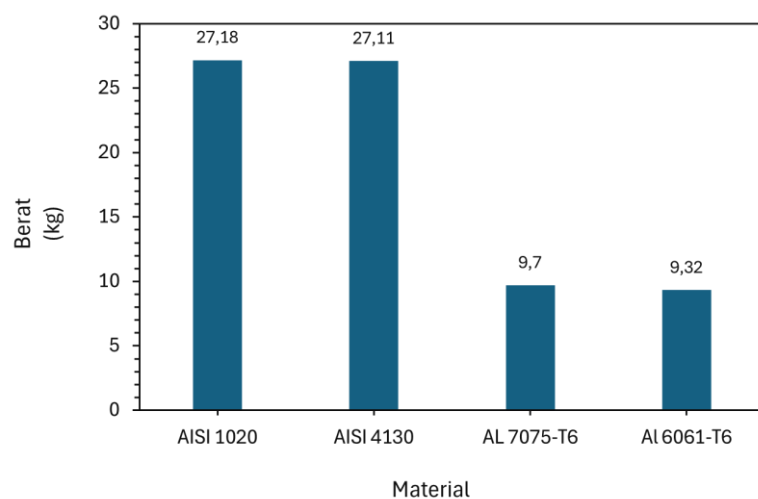
4.3 Massa Total Rangka

Analisis massa total dilakukan untuk mengevaluasi efektivitas proses optimasi

desain rangka untuk mengurangi massa rangka tanpa mengorbankan integritas struktur.

A. Desain awal

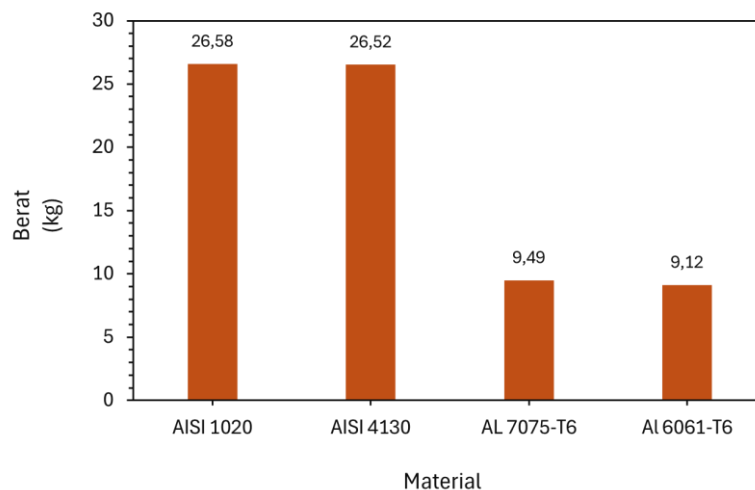
Berdasarkan hasil analisis massa total rangka pada ketiga varian desain yang ditunjukkan Gambar 4.30 dapat dilihat bahwa proses optimasi berhasil menurunkan massa rangka secara konsisten pada seluruh jenis material yang diuji. Desain awal sebagai dasar dari optimasi menghasilkan massa rangka paling besar, yaitu 27,18 kg untuk material AISI 1020 dan 27,11 kg untuk AISI 4130. Sementara itu, material aluminium menghasilkan massa yang jauh lebih ringan, yaitu AL 7075-T6 sebesar 9,7 kg dan Al 6061-T6 sebesar 9,32 kg. Perbedaan massa yang sangat signifikan antara material baja dan aluminium ini disebabkan oleh perbedaan densitas kedua kelompok material tersebut, di mana densitas aluminium berkisar $2,7 \text{ g/cm}^3$ jauh lebih rendah dibandingkan baja yang sekitar $7,85 \text{ g/cm}^3$



Gambar 4.30 Grafik perbandingan massa desain awal terhadap material

B. Desain optimasi 1

Pada Gambar 4.31 desain optimasi 1 massa rangka berhasil diturunkan untuk semua jenis material, Pada desain optimasi 1, massa rangka berhasil diturunkan menjadi 26,58 kg untuk AISI 1020 dan 26,52 kg untuk AISI 4130, yang masing-masing menunjukkan penurunan sebesar 0,60 kg yaitu, sekitar 2,2% dibandingkan desain awal. Penurunan massa ini merupakan hasil dari pengurangan diameter pipa pada area frontal belakang dari ukuran semula menjadi 19,5 mm, serta perubahan konfigurasi pipa samping menjadi pola-V yang lebih efisien secara material. Meskipun terdapat penambahan pipa penguat di bagian tengah, pengurangan diameter pipa di bagian lain memberikan kontribusi berupa penurunan massa keseluruhan rangka. Pada material aluminium, massa desain optimasi 1 turut mengalami penurunan, yaitu AL 7075-T6 menjadi 9,49 kg dan Al 6061-T6 menjadi 9,12 kg.

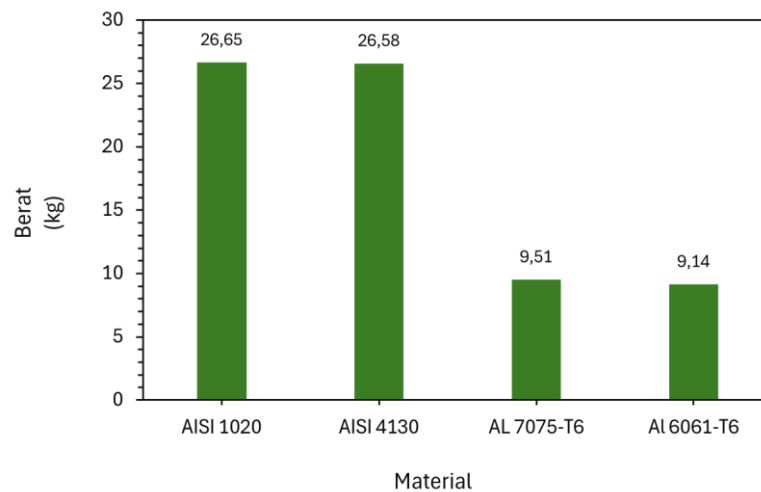


Gambar 4.31 Grafik perbandingan massa desain optimasi 1 terhadap material

C. Desain optimasi 2

Dari Gambar 4.32 desain optimasi 2 menghasilkan massa yang sedikit lebih tinggi dibandingkan desain optimasi 1, yaitu 26,65 kg untuk AISI 1020 dan 26,58 kg

untuk AISI 4130. Perbedaan massa antara desain optimasi 1 dan desain optimasi 2 sangat kecil, hanya berkisar 0,07 kg, yang mengindikasikan bahwa perubahan konfigurasi pipa bagian tengah pada desain optimasi 2 tidak memberikan pengaruh signifikan terhadap massa total rangka. Pada material aluminium, desain optimasi 2 menghasilkan massa AL 7075-T6 sebesar 9,51 kg dan Al 6061-T6 sebesar 9,14 kg, yang juga sangat mendekati nilai pada desain optimasi 1.

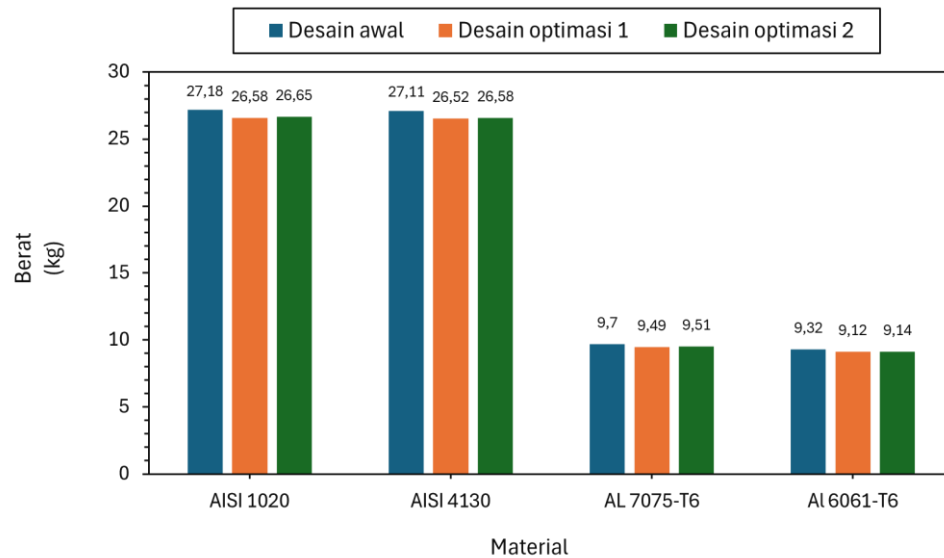


Gambar 4.32 Grafik perbandingan massa desain optimasi 2

D. Perubahan nilai massa total rangka

Dari Gambar 4.33 hasil analisis massa menunjukkan bahwa desain optimasi 1 merupakan varian desain yang paling efisien dalam hal reduksi massa untuk material baja, dengan penurunan sebesar 2,2% dibandingkan desain awal. Sementara itu, apabila ditinjau dari sisi performa struktural yang meliputi tegangan, deformasi, dan *safety factor*, desain optimasi 1 juga unggul untuk material baja sedangkan desain optimasi 2 unggul untuk material aluminium. Dengan demikian, pemilihan desain optimal perlu mempertimbangkan kombinasi antara pengurangan massa, kekuatan struktural, dan jenis material yang akan digunakan dalam proses manufaktur rangka

mobil KMLI.



Gambar 4.33 Grafik perbandingan massa antar desain

4.4 Analisis Kekuatan Spesifik Material

Pemilihan material rangka mobil KMLI yang tepat perlu mempertimbangkan kekuatan spesifik, yaitu rasio antara kekuatan material terhadap massa jenisnya (σ/ρ). Parameter ini merepresentasikan seberapa besar kekuatan yang dapat diperoleh per satuan berat material, sehingga menjadi indikator yang relevan untuk rangka mobil KMLI yang diminta kuat namun juga ringan. Berdasarkan data *material properties* pada Tabel 3.1 hingga Tabel 3.4, dilakukan perhitungan kekuatan spesifik tarik, kekuatan spesifik luluh menggunakan Persamaan 3.1 untuk keempat material yang digunakan dalam simulasi, dengan hasil disajikan pada Tabel 4.2

Tabel 4.2 Kekuatan spesifik antar material

Material	Densitas (g/m^3)	Kekuatan Spesifik Tarik ($kN \cdot m/kg$)	Kekuatan Spesifik Luluh ($kN \cdot m/kg$)
AISI 1020	7,86	53,4	38,8
AISI 4130	7,86	71,2	58,5
Al 7075-T6	2,81	203,6	179,0
Al 6061-T6	2,70	114,9	102,3

Dari Tabel 4.2 material aluminium Al 7075-T6 memiliki kekuatan spesifik tarik tertinggi sebesar 203,6 kN.m/kg, hampir 4 kali lipat dibanding baja AISI 1020 dan hampir 3 kali lipat dari baja paduan AISI 4140 sebesar 71,2 kN.m/kg, hal ini menjelaskan mengapa aluminium 7075-T6 yang sering disebut *aircraft-grade* aluminium yang digunakan sebagai struktur utama pesawat terbang. Sedangkan Al 6061-T6 memiliki kekuatan spesifik tarik sebesar 114,9 kN.m/kg yang lebih rendah dibandingkan Al 7075-T6, tetapi masih jauh lebih tinggi dibandingkan material AISI 1020 dan AISI 4130. Kekuatan spesifik luluh Al 7075-T6 sebesar 179,0 kN.m/kg, unggul signifikan dibandingkan AISI 4130 sebesar 53,4 kN.m/kg dan AISI 4130 sebesar 38,8 kN.m/kg. Sedangkan Al 6061-T6 memiliki kekuatan spesifik luluh sebesar 102,3 kN.m/kg yang lebih rendah dibandingkan Al 7075-T6. Perbedaan besar ini disebabkan oleh densitas Al 7075-T6 yang hanya sekitar sepertiga densitas baja.

4.5 Rekomendasi Desain Rangka Mobil KMLI

Berdasarkan hasil simulasi semua desain terhadap parameter tegangan ekuivalen maksimum, deformasi maksimum, *safety factor* minimum dan massa total rangka dengan empat jenis material, dapat direkomendasikan desain dan material yang sesuai dengan kebutuhan rangka mobil KMLI. Desain optimasi 2 memiliki nilai *equivalent*

stress 39,017 Mpa, deformasi maksimum 0,85 mm, *safety factor* minimum 12,89. Massa desain optimasi 2 dengan Al 7075-T6 hanya 9,51 kg yang berkurang 65% dibanding desain yang sama dengan material AISI 1020.

Konfigurasi pada desain optimasi 2 terbukti sangat kompatibel dengan karakteristik kekakuan material aluminium, menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata dibandingkan desain awal dengan pada material yang sama. Meskipun nilai deformasi maksimum desain optimasi 2 dengan Al 7075-T6 sebesar 0,85 mm, nilai tersebut masih berada dalam batas yang dapat diterima dan lebih baik dari desain awal dengan material aluminium.