

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

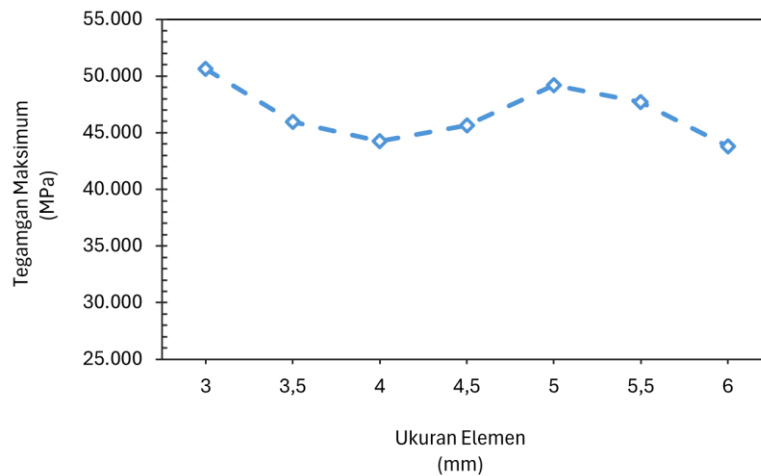
Bab ini menyajikan hasil simulasi dan pembahasan yang mencakup hasil uji grid independence, proses optimasi geometri rangka, hasil simulasi dinamis pada kondisi pengereman meliputi tegangan ekuivalen maksimum, deformasi maksimum, *safety factor* minimum, perbandingan berat antar rangka terhadap material,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

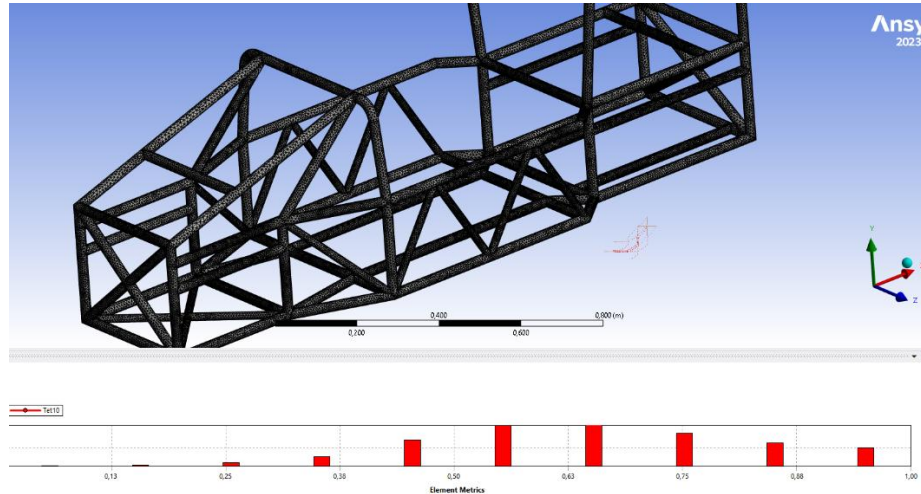
<i>Element Size</i> (mm)	<i>Skewness</i>	<i>Tegangan Maximum</i> (Mpa)	<i>Standart Error</i> %
6	0,740	43.788	-
5,5	0,732	47.678	-8
5	0,725	49.213	-3
4,5	0,699	45.631	8
4	0,651	44.237	3
3,5	0,633	45.939	-4
3	0,518	50.642	-9



Gambar 4.1 Hasil uji *grid independence*

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 ditunjukkan pada Gambar 4.2



Gambar 4.2 Hasil meshing dan rata-rata skewness

4.2 Simulasi Statis

Simulasi statis dilakukan pada kondisi rangka mobil KMLI dalam keadaan diam dengan pembebanan sesuai dengan parameter yang telah ditetapkan, meliputi beban pengemudi (55 kg), beban baterai (28 kg), beban motor (8 kg), beban sistem kemudi (6 kg), dan beban kursi (10 kg). Material yang digunakan adalah baja AISI 1020 dengan nilai yield point sebesar 305 MPa dan Young's Modulus sebesar 205 GPa. Analisis dilakukan untuk mengevaluasi distribusi tegangan ekuivalen (von Mises), deformasi total, dan safety factor pada tiga variasi desain kerangka sebelum dan sesudah proses optimasi.

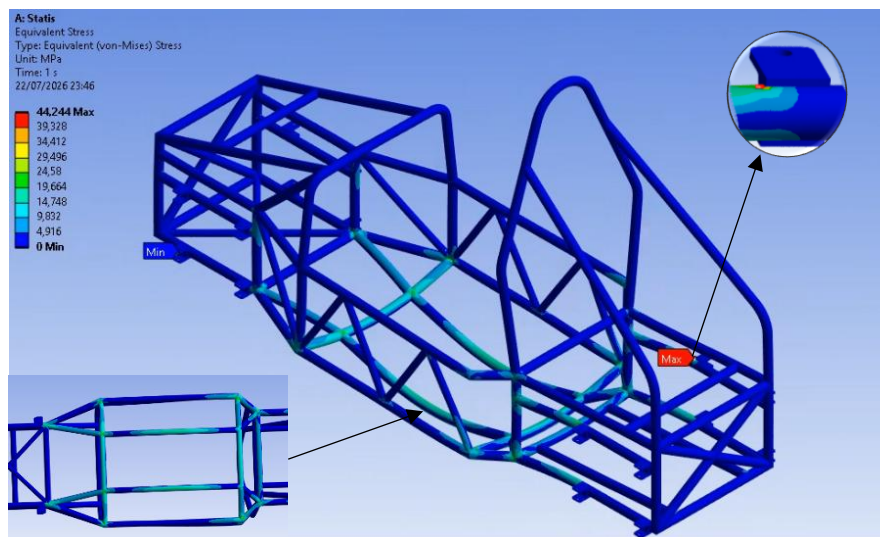
4.2.1 Tegangan Ekuivalen Maksimum

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:

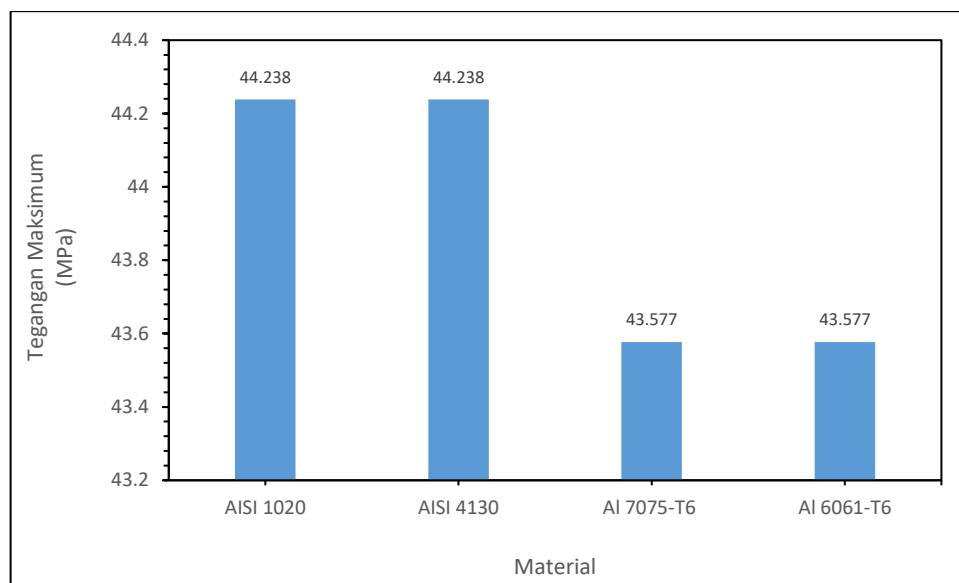
A. Desain awal

Berdasarkan hasil simulasi *equivalent stress* pada Desain awal dengan material AISI 1020, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 44,238 MPa terlokalisasi pada area sambungan rangka bagian tengah yang ditunjukkan oleh indikator *Max*, sedangkan tegangan minimum berada pada bagian ujung rangka yang ditunjukkan oleh indikator *Min*. Secara umum, distribusi tegangan didominasi oleh warna biru yang menunjukkan bahwa sebagian besar struktur mengalami tegangan relatif rendah, sehingga rangka masih mampu menahan beban kerja dengan baik. Konsentrasi tegangan pada area sambungan mengindikasikan bahwa bagian tersebut menjadi titik kritis akibat pertemuan beberapa elemen struktur dan transfer beban, namun nilai tegangan yang terjadi masih berada jauh di bawah kekuatan luluh material AISI 1020 sehingga desain dinyatakan aman untuk kondisi pembebanan yang dianalisis.



Gambar 4.3 Hasil tegangan ekuivalen desain awal material AISI 1020

Hasil simulasi pada Desain awal menunjukkan bahwa seluruh material menghasilkan nilai tegangan maksimum yang relatif serupa, yaitu 44,238 MPa pada AISI 1020 dan AISI 4130 serta 43,577 MPa pada Al 7075-T6 dan Al 6061-T6. Perbedaan tegangan yang sangat kecil menunjukkan bahwa geometri struktur, kondisi pembebanan, dan *boundary condition* lebih dominan memengaruhi distribusi tegangan dibandingkan sifat mekanik material. Meskipun baja memiliki modulus elastisitas lebih tinggi dibandingkan aluminium, pengaruhnya lebih terlihat pada deformasi daripada tegangan maksimum. Seluruh nilai tegangan masih berada jauh di bawah kekuatan luluh masing-masing material, sehingga Desain 1 dinyatakan aman secara struktural untuk seluruh material yang dianalisis.



Gambar 4.4 Grafik perbandingan tegangan ekuivalen maksimum desain awal terhadap material

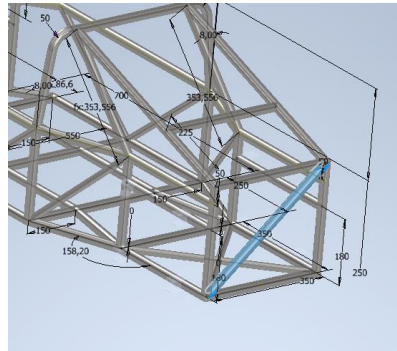
B. Desain Optimasi 1

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.



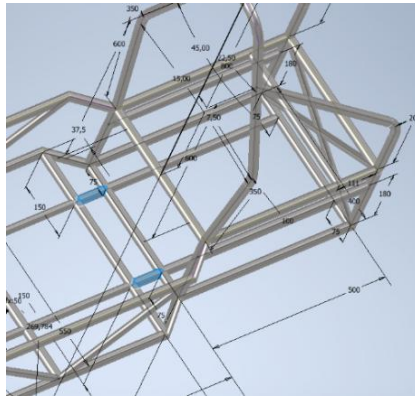
Gambar 4.5 Pengurangan geometri frontal depan

2. Konfigurasi area samping pada rangka.



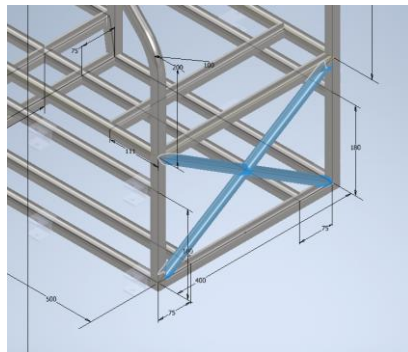
Gambar 4.6 Konfigurasi rangka area samping

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.



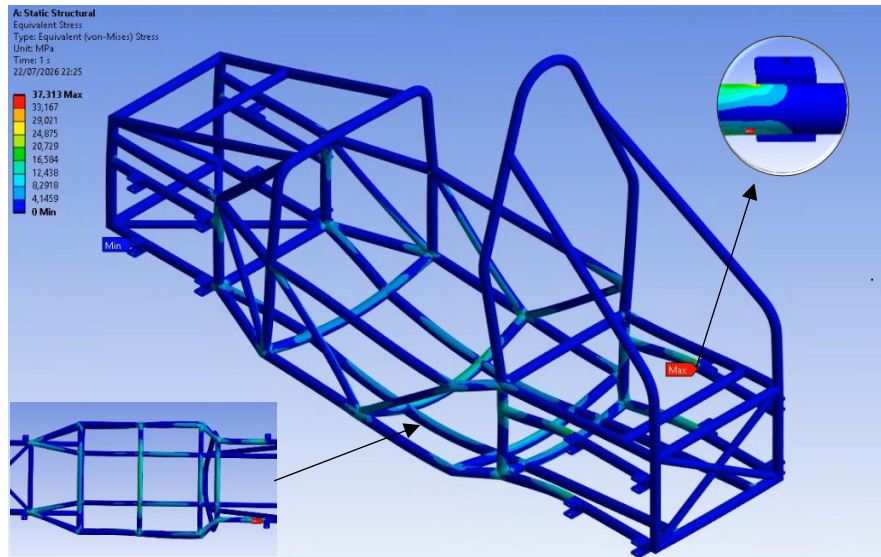
Gambar 4.8 Pengurangan diameter frontal belakang

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



Gambar 4.9 Penambahan pipa bagian tengah

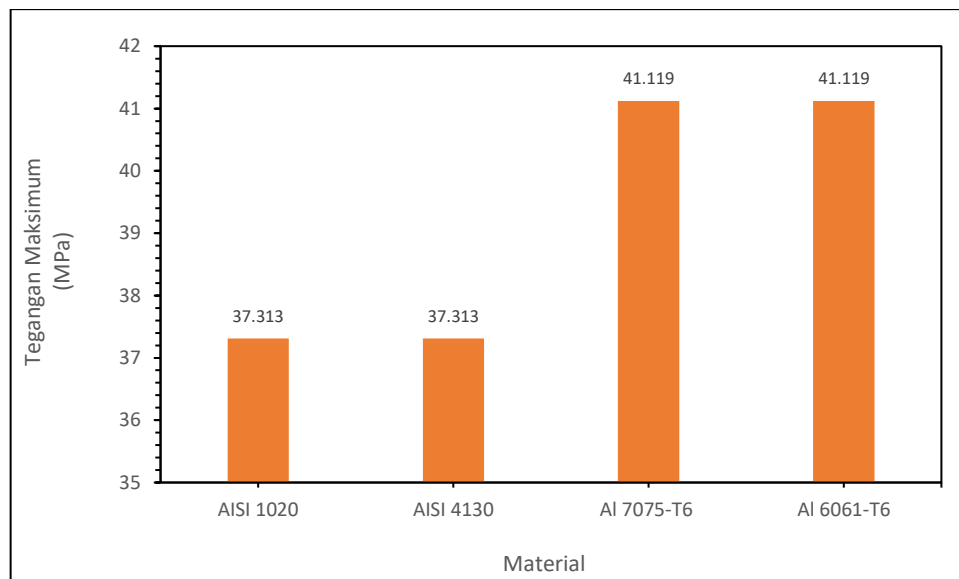
Dari hasil optimalisasi didapatkan desain optimasi 1, yang selanjutnya dilakukan proses simulasi statis dengan hasil tegangan ekuivalen pada Gambar 4.10



Gambar 4.10 Hasil tegangan ekuivalen desain optimasi 1 material AISI 1020

Berdasarkan hasil simulasi *equivalent stress* pada Desain optimasi 1 dengan material AISI 1020, tegangan maksimum yang terjadi sebesar 37,313 MPa terletak pada area sambungan rangka bagian atas yang ditunjukkan oleh indikator *Max*, sedangkan tegangan minimum berada pada bagian rangka depan yang ditunjukkan oleh indikator *Min*. Distribusi tegangan didominasi oleh warna biru dengan beberapa area berwarna hijau muda yang menunjukkan bahwa sebagian besar struktur mengalami tegangan relatif rendah dan penyebaran beban yang cukup merata. Nilai tegangan maksimum yang lebih rendah dibandingkan Desain 1 mengindikasikan bahwa geometri Desain optimasi 1 mampu mengurangi konsentrasi tegangan pada titik kritis, sehingga meningkatkan kinerja struktural rangka. Selain itu, tegangan yang terjadi masih jauh di bawah batas luluh material AISI 1020, sehingga desain ini dinyatakan aman untuk menahan beban pembebanan yang diberikan.

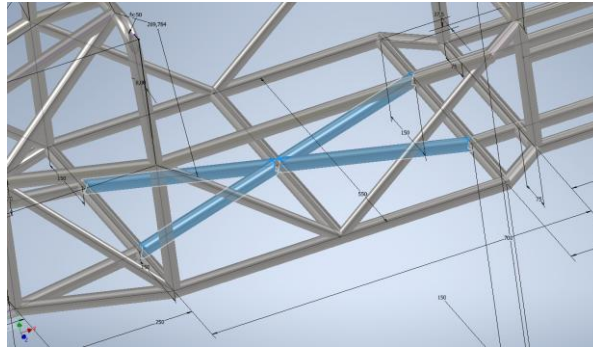
Hasil simulasi pada Desain optimasi 1 menunjukkan bahwa material AISI 1020 dan AISI 4130 menghasilkan tegangan maksimum sebesar 37,313 MPa, sedangkan Al 7075-T6 dan Al 6061-T6 menghasilkan tegangan maksimum sebesar 41,119 MPa. Perbedaan nilai tegangan ini menunjukkan bahwa material aluminium mengalami respons tegangan yang sedikit lebih tinggi dibandingkan baja akibat perbedaan karakteristik elastisitas material. Namun, distribusi tegangan tetap dipengaruhi secara dominan oleh geometri struktur dan kondisi pembebanan pada desain. Seluruh nilai tegangan maksimum masih berada di bawah batas kekuatan luluh masing-masing material, sehingga Desain optimasi 1 dapat dinyatakan aman secara struktural untuk seluruh material yang dianalisis.



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

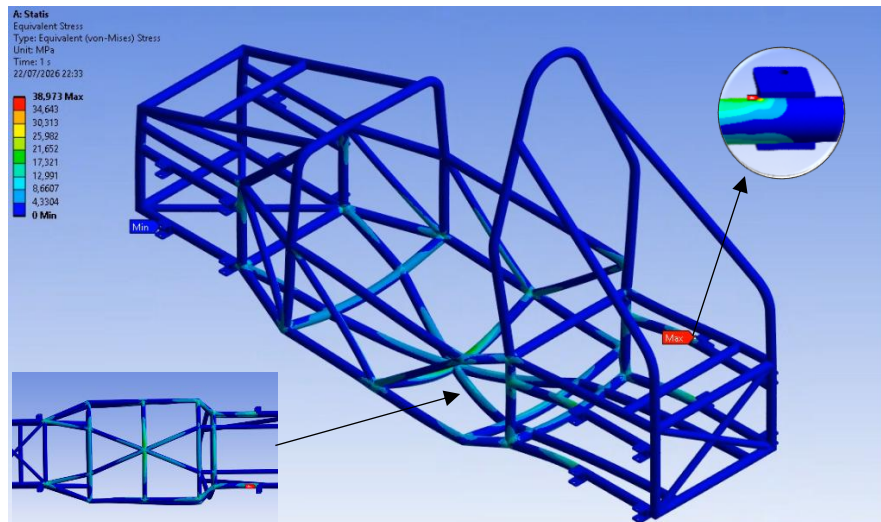
C. Desain optimasi 2

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



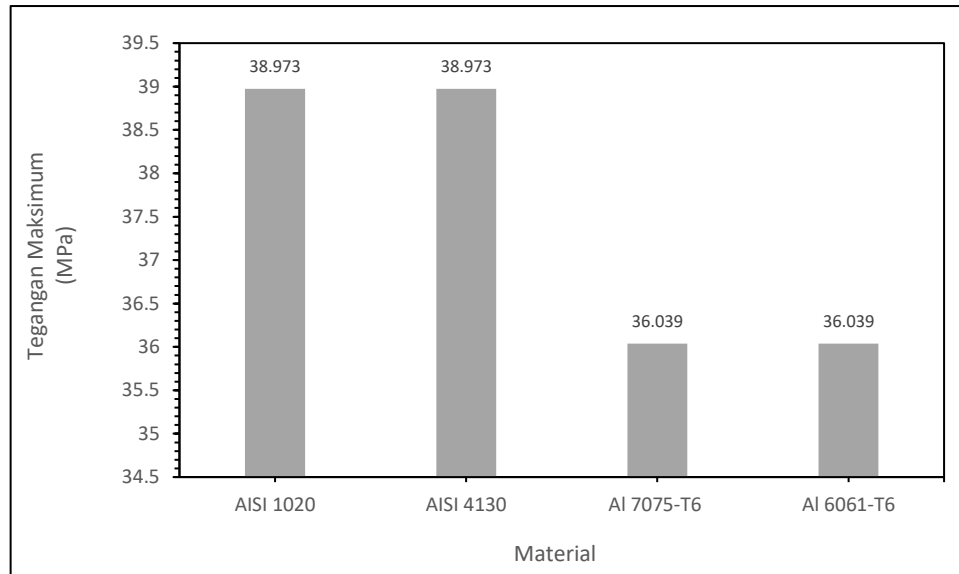
Gambar 4.12 Perubahan konfigurasi pipa tengah pada desain optimasi 2

Gambar distribusi tegangan ekuivalen pada Desain optimasi 2 memperlihatkan karakteristik penyebaran tegangan yang berbeda dibandingkan Desain awal dan Desain optimasi 1. Nilai tegangan maksimum sebesar 38,973 MPa pada material AISI 1020 menunjukkan peningkatan dibandingkan Desain optimasi 1, namun Desain optimasi 2 unggul pada material aluminium dengan tegangan maksimum terendah sebesar 36,039 MPa untuk Al 7075-T6. Pola kontur tegangan pada gambar mengindikasikan bahwa modifikasi geometri Desain optimasi 2 lebih optimal untuk karakteristik material aluminium, di mana distribusi beban pada elemen-elemen berbahan aluminium berlangsung lebih efisien. Area kritis yang masih memerlukan perhatian terlihat pada simpul-simpul pertemuan tiga atau lebih elemen rangka.



Gambar 4.13 Hasil tegangan desain optimasi 2 material AISI 1020

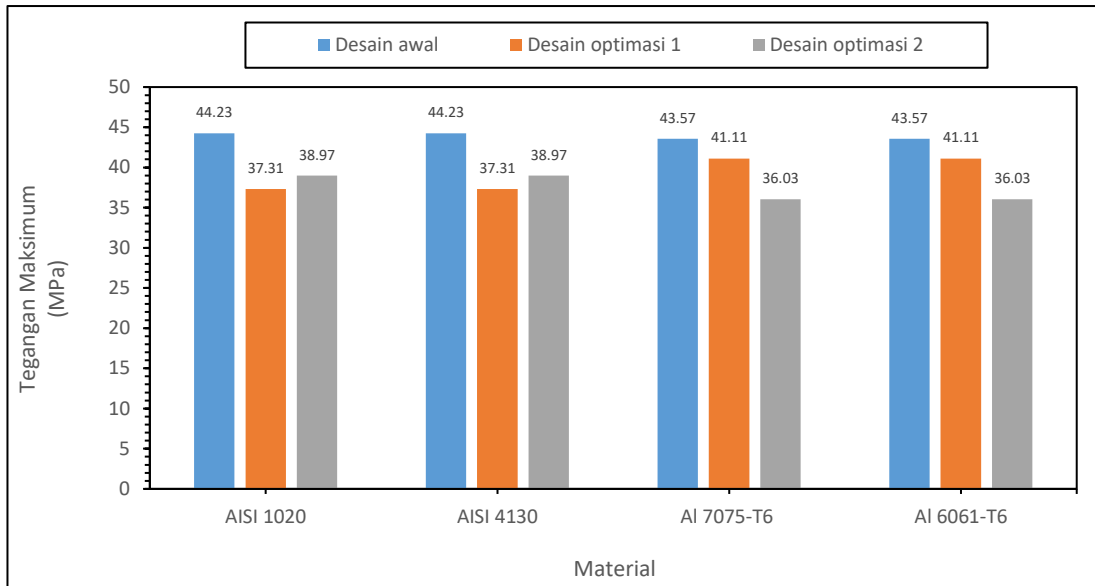
Pada Gambar 4.14 desain optimasi 2 menunjukkan bahwa material AISI 1020 dan AISI 4130 menghasilkan tegangan maksimum sebesar 38,973 MPa, sedangkan Al 7075-T6 dan Al 6061-T6 menghasilkan tegangan maksimum sebesar 36,039 MPa. Perbedaan nilai tegangan ini menunjukkan bahwa kelompok material baja mengalami tegangan sedikit lebih tinggi dibandingkan aluminium, namun distribusi tegangan tetap dipengaruhi secara dominan oleh geometri struktur dan kondisi pembebanan pada desain. Seluruh nilai tegangan maksimum masih berada jauh di bawah batas kekuatan luluh masing-masing material, sehingga Desain optimasi 2 dinyatakan aman secara struktural untuk seluruh material yang dianalisis.



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

D. Perbandingan Nilai Tegangan Ekuivalen Maksimum

Pada Gambar 4.15, hasil perbandingan tegangan maksimum pada ketiga desain menunjukkan bahwa setiap material mengalami respons tegangan yang berbeda terhadap perubahan geometri dan konfigurasi struktur. Pada material baja AISI 1020 dan AISI 4130, nilai tegangan maksimum tertinggi terjadi pada Desain 1 sebesar 44,238 MPa dan terendah pada Desain optimasi 1 sebesar 37,313 MPa. Sementara itu, pada material aluminium Al 7075-T6 dan Al 6061-T6, nilai tegangan maksimum tertinggi terjadi pada Desain 1 sebesar 43,577 MPa dan terendah pada Desain optimasi 2 sebesar 36,039 MPa. Perbedaan nilai tegangan ini menunjukkan bahwa variasi desain memiliki pengaruh signifikan terhadap distribusi tegangan struktur, sedangkan seluruh nilai tegangan maksimum masih berada di bawah batas kekuatan luluh masing-masing material sehingga seluruh desain dinyatakan aman secara struktural.



Gambar 4.15 Grafik perbandingan tegangan ekuivalen maksimum desain dengan material

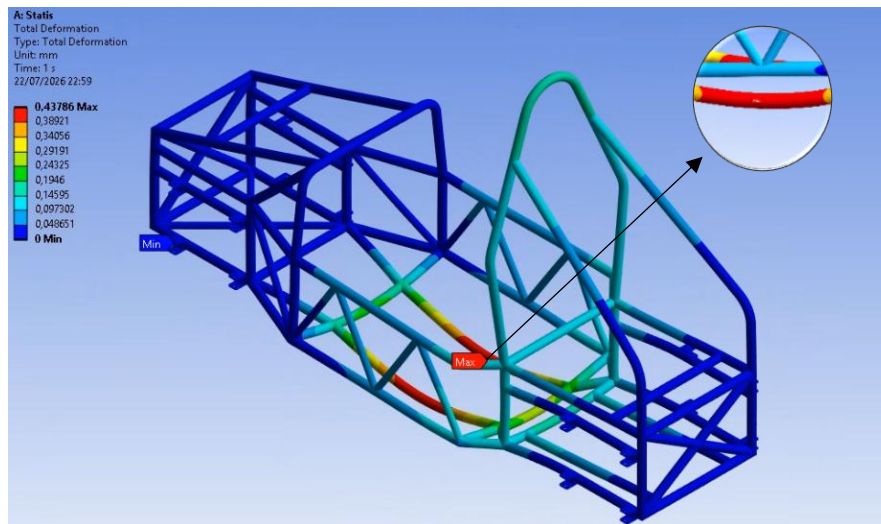
4.2.2 Deformasi

Analisis deformasi total pada simulasi statis dilakukan untuk mengetahui besarnya perpindahan maksimum yang terjadi pada rangka akibat pembebanan statik. Deformasi yang terjadi pada seluruh variasi kerangka masih berada dalam kondisi elastis, yang ditandai dengan tidak adanya deformasi permanen setelah beban dihilangkan. Berdasarkan batasan yang telah ditetapkan, nilai defleksi maksimal pada hasil optimasi diharapkan tidak lebih dari 0,9 mm.

A. Desain awal

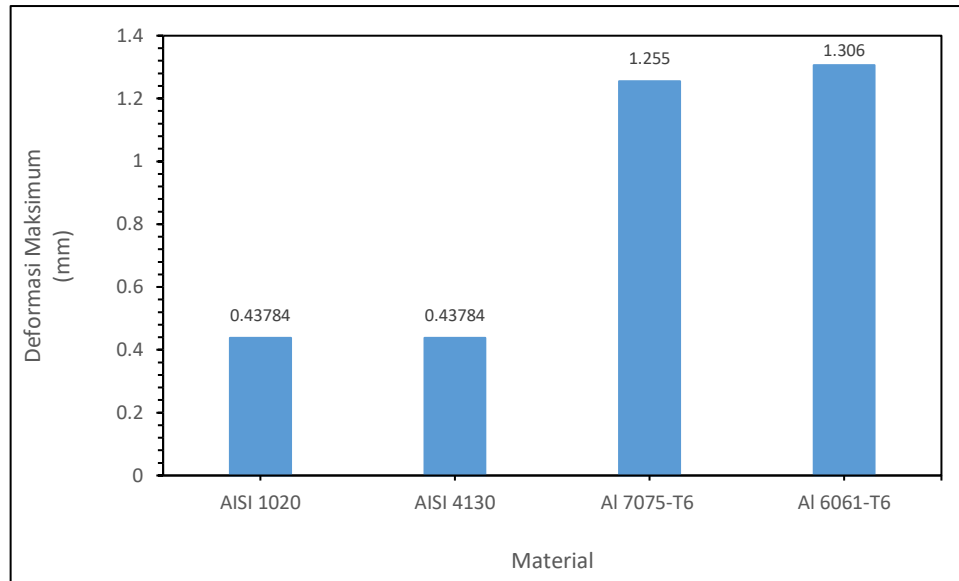
Dari Gambar 4.16 menampilkan kontur deformasi total yang terjadi pada Desain awal akibat pembebanan statis. Deformasi maksimum sebesar 0,43 mm terjadi pada material AISI 1020, dan teramati pada area tengah rangka yang merupakan titik pembebanan pengemudi dan komponen baterai. Skala warna dari biru (deformasi minimum) hingga merah (deformasi maksimum) memperlihatkan bahwa deformasi

terbesar terpusat di bagian lantai rangka yang menopang beban vertikal paling besar. Meskipun nilai deformasi ini relatif kecil, hasil visualisasi ini menjadi dasar pertimbangan dalam proses optimasi geometri untuk memperkaku area yang mengalami defleksi tertinggi.



Gambar 4.16 Hasil deformasi desain awal material AISI 1020

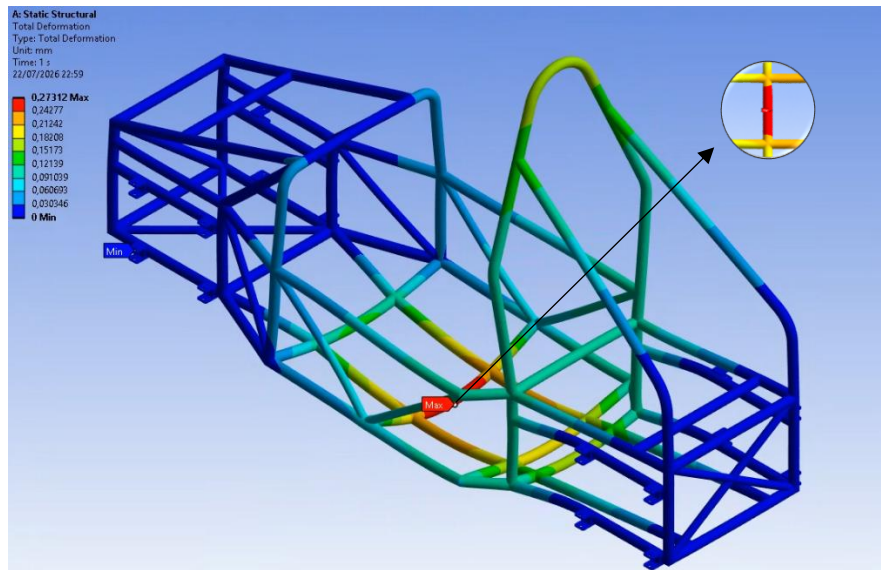
Pada Gambar 4.17 menunjukkan bahwa material AISI 1020 dan AISI 4130 menghasilkan deformasi terendah sebesar 0,43 mm, sedangkan Al 7075-T6 dan Al 6061-T6 menghasilkan deformasi yang lebih tinggi masing-masing sebesar 1,25 mm dan 1,30 mm. Perbedaan deformasi ini dipengaruhi oleh nilai modulus elastisitas material, di mana material baja memiliki kekakuan lebih tinggi dibandingkan aluminium sehingga mampu menahan perubahan bentuk dengan lebih baik. Hasil tersebut menunjukkan bahwa meskipun seluruh material masih berada dalam kondisi aman, material baja memberikan tingkat kekakuan struktur yang lebih baik pada Desain awal dibandingkan material aluminium.



Gambar 4.17 Grafik perbandingan deformasi maksimum desain awal terhadap material

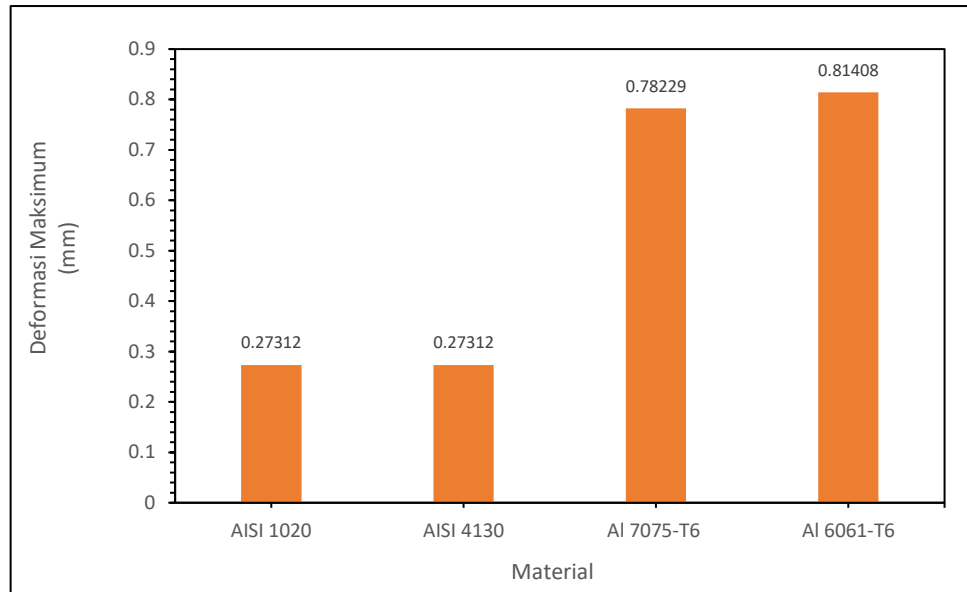
B. Desain optimasi 1

Pada Gambar 4.18 menunjukkan pengurangan yang nyata dibandingkan Desain awal, dengan nilai deformasi maksimum turun menjadi 0,27 mm pada material AISI 1020. Dari kontur deformasi pada gambar, terlihat bahwa lokasi deformasi maksimum masih berada di area tengah rangka, namun persebarannya lebih merata ke seluruh elemen. Hal ini mengindikasikan bahwa perubahan konfigurasi geometri pada Desain optimasi 1 berhasil meningkatkan kekakuan struktural rangka secara keseluruhan. Penambahan elemen penguat pada area kritis terbukti efektif dalam mengurangi defleksi lokal yang sebelumnya menjadi titik lemah pada Desain awal.



Gambar 4.18 Hasil deformasi desain optimasi 1 material AISI 1020

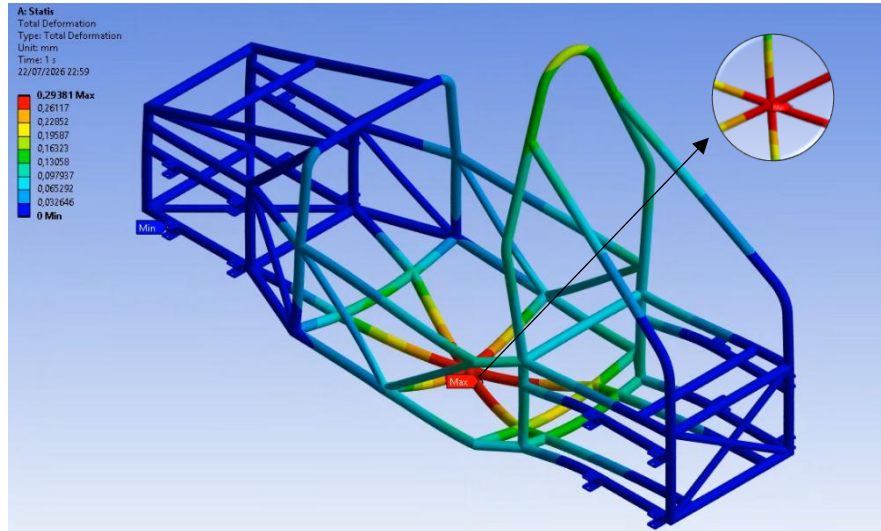
Dari Gambar 4.19 material AISI 1020 dan AISI 4130 menghasilkan deformasi maksimum sebesar 0,27 mm. Nilai tersebut menunjukkan penurunan sekitar 35% dibandingkan desain awal, yang mengindikasikan adanya peningkatan kekakuan struktur setelah dilakukan optimasi. Sementara itu, pada material aluminium, Aluminium 7075-T6 menghasilkan deformasi maksimum sebesar 0,78 mm, sedangkan Aluminium 6061-T6 sebesar 0,81 mm. Kedua material aluminium juga mengalami penurunan deformasi sekitar 37% dibandingkan desain awal. Penurunan deformasi yang terjadi secara konsisten pada seluruh variasi material menunjukkan bahwa penerapan penambahan pipa penguat pada bagian tengah serta konfigurasi rangka samping berpola V pada desain optimasi 1 mampu meningkatkan kekakuan keseluruhan struktur secara efektif, sehingga deformasi akibat pembebanan dapat dikurangi tanpa dipengaruhi secara signifikan oleh jenis material yang digunakan.



Gambar 4.19 Grafik perbandingan deformasi maksimum desain optimasi 1 terhadap material

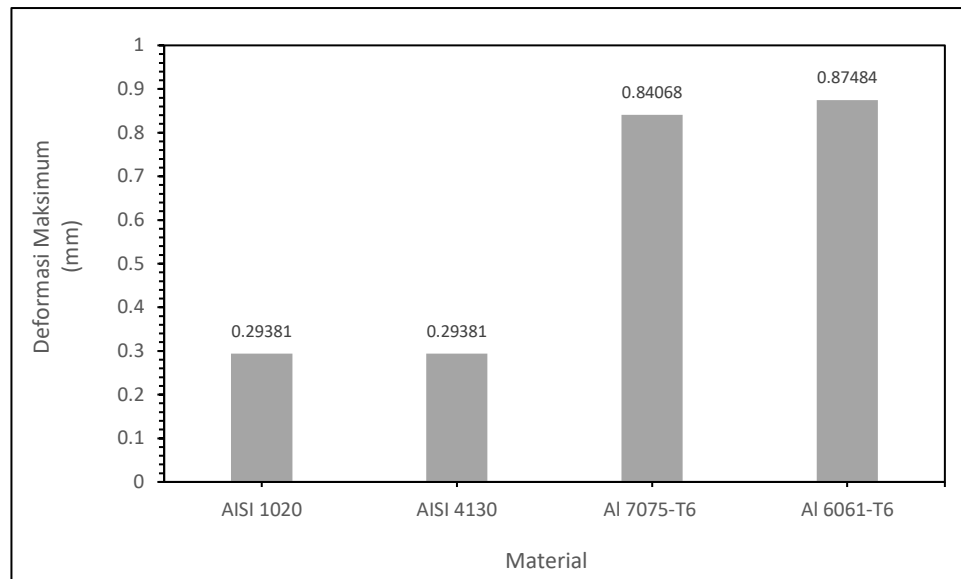
C. Desain optimasi 2

Pada Gambar 4.20 memperlihatkan nilai deformasi maksimum sebesar 0,29 mm untuk material AISI 1020, yang sedikit lebih tinggi dibandingkan Desain optimasi 1. Namun demikian, untuk material aluminium Al 7075-T6 dan Al 6061-T6, Desain optimasi 2 menunjukkan pola deformasi yang lebih terkontrol dengan nilai yang sebanding dengan Desain optimasi 1. Kontur warna pada gambar memperlihatkan gradasi deformasi yang lebih halus, yang mengindikasikan bahwa transisi tegangan antar elemen berlangsung lebih mulus. Karakteristik ini penting untuk mencegah konsentrasi regangan yang dapat memicu kegagalan struktur, terutama pada sambungan las yang menjadi titik kritis pada rangka tubular space frame.



Gambar 4.20 Hasil deformasi desain optimasi 2 material AISI 1020

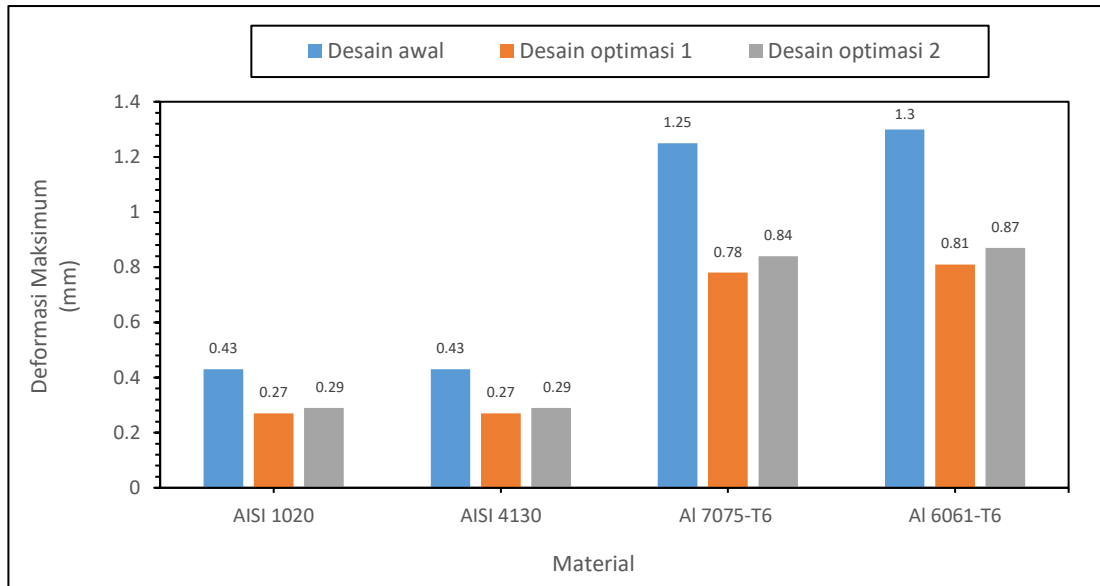
Pada Gambar 4.21 menunjukkan bahwa material AISI 1020 dan AISI 4130 menghasilkan deformasi sebesar 0,29 mm, sedangkan Al 7075-T6 dan Al 6061-T6 menghasilkan deformasi yang lebih tinggi masing-masing sebesar 0,84 mm dan 0,87 mm. Perbedaan ini menunjukkan bahwa material baja memiliki kekakuan yang lebih baik dibandingkan aluminium, sehingga mampu menahan deformasi lebih kecil di bawah kondisi pembebanan yang sama. Secara keseluruhan, Desain optimasi 2 memberikan nilai deformasi yang relatif rendah pada seluruh material, sehingga menunjukkan tingkat kekakuan dan stabilitas struktur yang baik.



Gambar 4.21 Grafik perbandingan deformasi maksimum desain optimasi 2 terhadap material

D. Perbandingan Nilai Deformasi

Dari Gambar 4.22, menunjukkan bahwa material baja AISI 1020 dan AISI 4130 secara konsisten menghasilkan deformasi yang lebih rendah dibandingkan material aluminium Al 7075-T6 dan Al 6061-T6. Nilai deformasi terendah diperoleh pada Desain optimasi 1, yaitu 0,27 mm untuk material baja dan 0,78 – 0,81 mm untuk material aluminium, sedangkan deformasi tertinggi terjadi pada Desain awal dengan nilai mencapai 1,3 mm pada Al 6061-T6. Perbedaan ini menunjukkan bahwa variasi desain dan kekakuan material berpengaruh terhadap kemampuan struktur dalam menahan perubahan bentuk, di mana material baja memberikan stabilitas yang lebih baik karena memiliki modulus elastisitas yang lebih tinggi. Secara keseluruhan, Desain optimasi 1 menunjukkan performa terbaik dalam meminimalkan deformasi pada seluruh material yang dianalisis.



Gambar 4.22 Grafik perbandingan deformasi maksimum desain dengan material

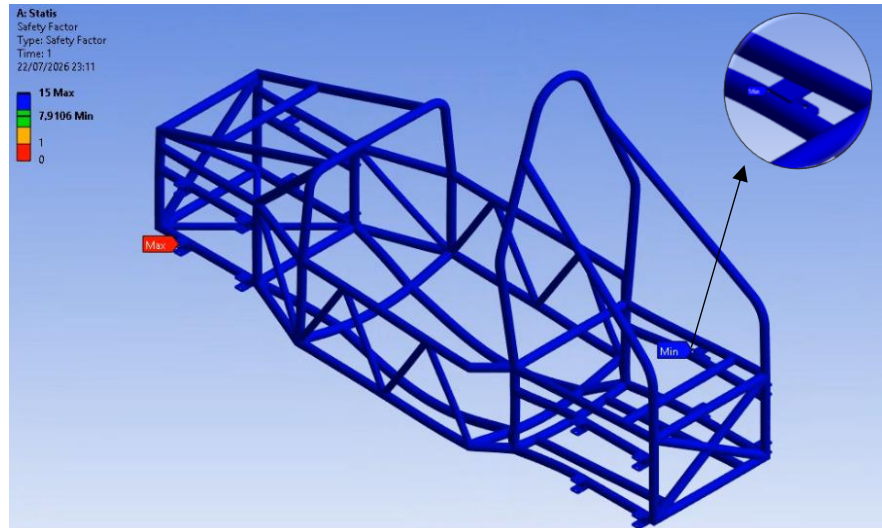
4.2.3 *Safety factor*

Evaluasi *safety factor* pada simulasi statis bertujuan untuk menilai tingkat keamanan struktural rangka terhadap tegangan luluh material. Berdasarkan kriteria yang ditetapkan, nilai *safety factor* minimum yang harus dipenuhi pada hasil optimasi adalah $SF \geq 4$. Analisis *safety factor* dilakukan menggunakan persamaan $sf = \sigma_y / \sigma_{actual}$ dengan tegangan luluh material AISI 1020 sebesar 305 MPa.

A. Desain awal

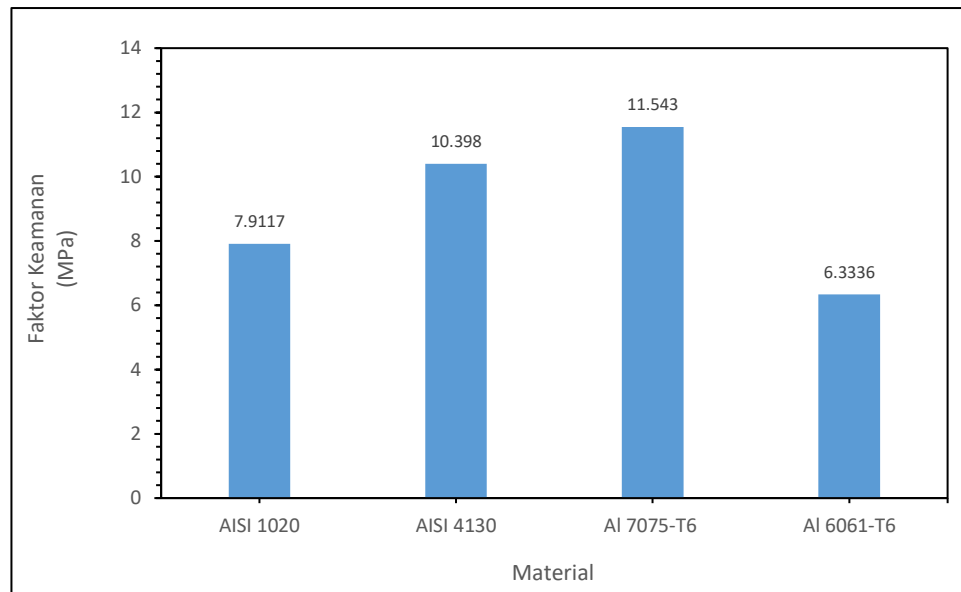
Pada Gambar 4.23 menampilkan distribusi nilai faktor keamanan di seluruh elemen rangka. Area berwarna biru menunjukkan zona dengan *safety factor* tertinggi (daerah over-design) yang berpotensi dikurangi materialnya, sementara area merah atau oranye mengindikasikan zona dengan *safety factor* terkecil yang memerlukan perhatian khusus. Nilai *safety factor* minimum sebesar 7,91 pada material AISI 1020 menunjukkan bahwa seluruh elemen rangka Desain awal masih jauh melampaui batas

minimum yang ditetapkan ($SF \geq 4$). Informasi distribusi safety factor ini menjadi panduan utama dalam menentukan area mana yang dapat dioptimasi dengan pengurangan dimensi profil tanpa mengorbankan keamanan struktural.



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

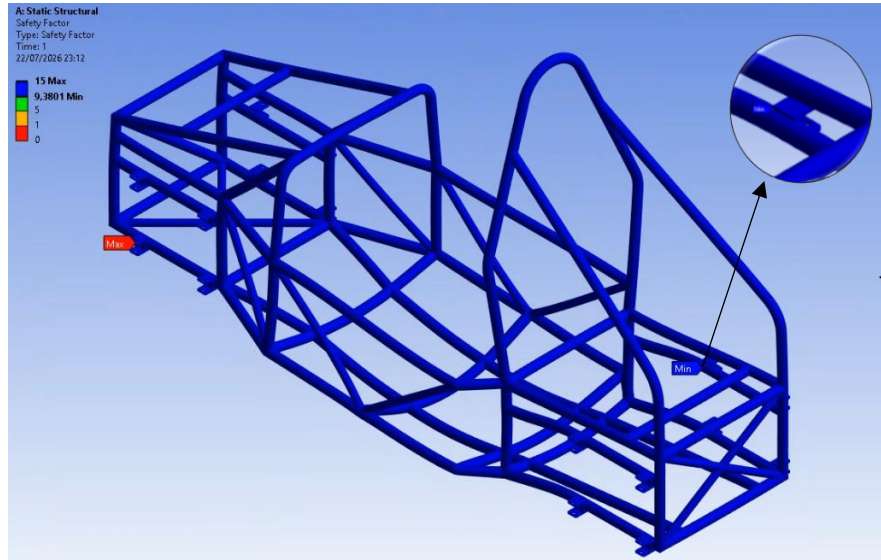
Pada Gambar 4.24 menunjukkan bahwa seluruh material memiliki nilai faktor keamanan yang jauh di atas batas minimum yang umumnya digunakan dalam perancangan struktur, sehingga seluruh material berada dalam kondisi aman terhadap kegagalan akibat pembebanan yang diberikan. Nilai *safety factor* tertinggi diperoleh pada Al 7075-T6 sebesar 11,54, diikuti AISI 4130 sebesar 10,39, AISI 1020 sebesar 7,91, dan Al 6061-T6 sebesar 6,33. Perbedaan nilai faktor keamanan ini dipengaruhi oleh kombinasi antara tegangan kerja yang terjadi dan kekuatan luluh masing-masing material. Secara keseluruhan, hasil tersebut menunjukkan bahwa Desain 1 memiliki tingkat keamanan struktural yang baik untuk seluruh material yang dianalisis, dengan Al 7075-T6 memberikan margin keamanan terbesar.



Gambar 4.24 Grafik perbandingan safety factor minimum desain awal terhadap material

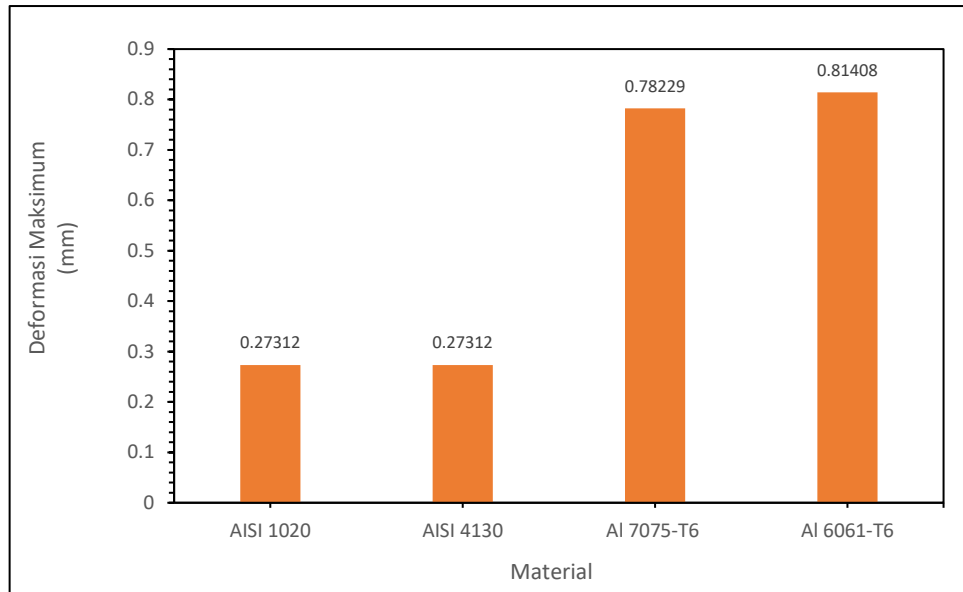
B. Desain optimasi 1

Pada simulasi dinamis desain optimasi 1 yang ditunjukkan pada Gambar 4.25, menunjukkan peningkatan nilai minimum dibandingkan Desain awal, dengan nilai SF minimum sebesar 9,38 pada material AISI 1020. Distribusi kontur pada gambar memperlihatkan pemerataan nilai safety factor yang lebih baik di seluruh struktur rangka, yang berarti bahwa tidak ada elemen yang mengalami pembebanan berlebih secara signifikan dibandingkan elemen lainnya. Area dengan safety factor tinggi (warna biru) yang tersisa pada Desain optimasi 1 masih dapat dipertimbangkan untuk optimasi lebih lanjut, khususnya pada elemen-elemen dengan SF jauh di atas nilai minimum. Peningkatan safety factor ini seiring dengan penurunan tegangan, membuktikan bahwa Desain optimasi 1 memberikan performa struktural yang lebih baik pada material baja.



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

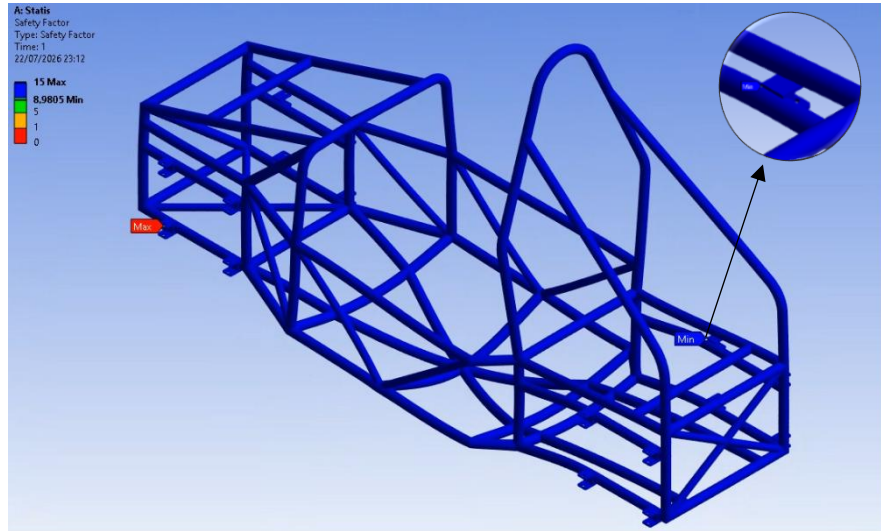
Pada Gambar 4.26 desain optimasi 1 menunjukkan bahwa seluruh material memiliki nilai faktor keamanan yang tinggi dan berada jauh di atas batas minimum desain, sehingga struktur dinyatakan aman terhadap kegagalan akibat pembebanan yang diberikan. Nilai *safety factor* tertinggi diperoleh pada AISI 4130 sebesar 12,32, diikuti Al 7075-T6 sebesar 12,23, AISI 1020 sebesar 9,38, dan Al 6061-T6 sebesar 6,71. Perbedaan nilai faktor keamanan ini dipengaruhi oleh kombinasi antara tegangan maksimum yang terjadi dan kekuatan luluh masing-masing material. Secara keseluruhan, Desain optimasi 1 menunjukkan tingkat keamanan struktural yang sangat baik untuk seluruh material yang dianalisis, dengan AISI 4130 memberikan margin keamanan terbesar.



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

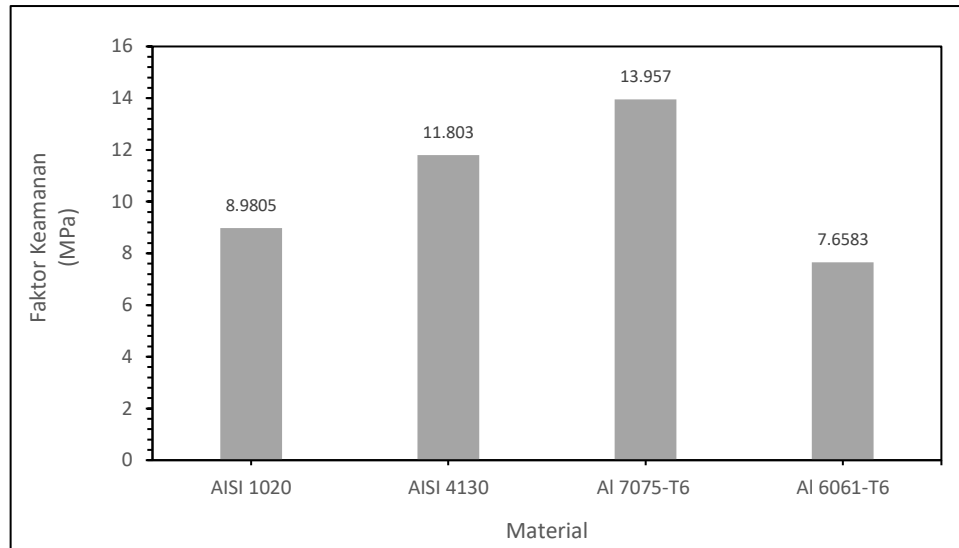
C. Desain optimasi 2

Hasil simulasi *safety factor* minimum pada Gambar 4.27 menampilkan nilai minimum sebesar 8,98 untuk material AISI 1020 dan nilai tertinggi sebesar 13,95 untuk material Al 7075-T6. Kontur pada gambar menunjukkan distribusi faktor keamanan yang relatif seragam di sepanjang elemen rangka utama, mengindikasikan bahwa Desain optimasi 2 berhasil menciptakan struktur yang lebih seimbang antara kekuatan dan bobot. Area-area dengan *safety factor* sangat tinggi pada Desain optimasi 2 masih dapat dijadikan target optimasi pada tahap selanjutnya, terutama jika mempertimbangkan penggunaan material aluminium yang memiliki nilai SF lebih tinggi. Secara keseluruhan, distribusi *safety factor* Desain optimasi 2 dengan material Al 7075-T6 merupakan kombinasi terbaik dari segi efisiensi material, menghasilkan bobot paling ringan dengan tetap mempertahankan keamanan struktural di atas batas minimum yang dipersyaratkan.



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

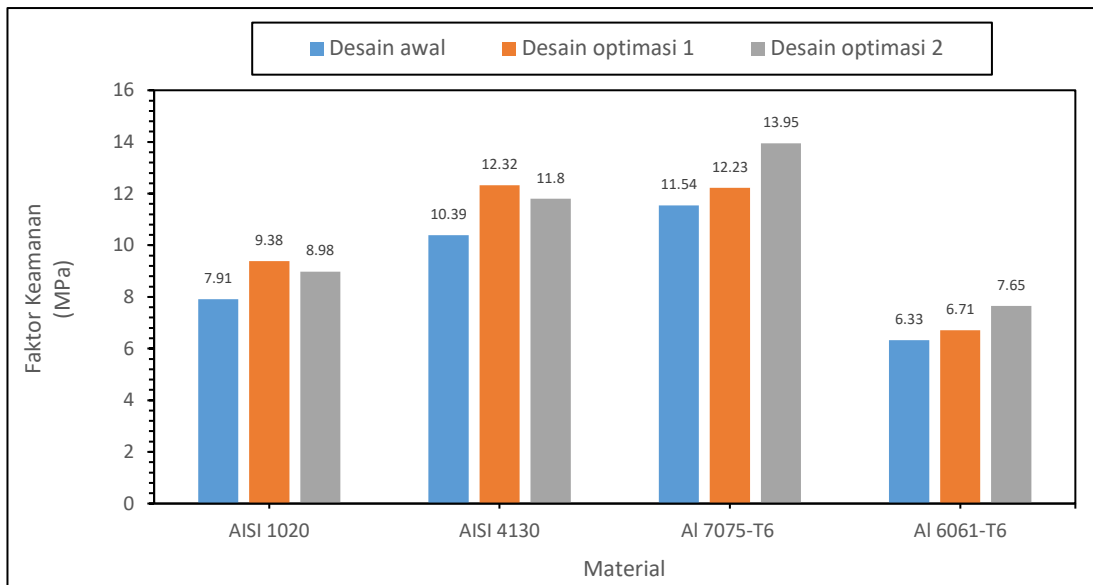
Gambar 4.28 menunjukkan bahwa seluruh material memiliki nilai faktor keamanan yang tinggi dan berada jauh di atas batas minimum yang dipersyaratkan, sehingga struktur dapat dinyatakan aman terhadap kegagalan akibat pembebanan yang diberikan. Nilai *safety factor* tertinggi diperoleh pada Al 7075-T6 sebesar 13,95, diikuti AISI 4130 sebesar 11,8, AISI 1020 sebesar 8,98, dan Al 6061-T6 sebesar 7,65. Perbedaan nilai faktor keamanan ini dipengaruhi oleh kombinasi antara tegangan kerja yang terjadi dan kekuatan luluh masing-masing material. Secara keseluruhan, Desain optimasi 2 menunjukkan tingkat keamanan struktural yang sangat baik untuk seluruh material yang dianalisis, dengan Al 7075-T6 memberikan margin keamanan terbesar.



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

D. Perbandingan Nilai *Safety Factor* Minimum

Dari Gambar 4.29 menunjukkan bahwa baik variasi desain maupun jenis material memberikan pengaruh terhadap nilai *safety factor* rangka kendaraan listrik. Secara umum, Desain optimasi 2 menghasilkan nilai *safety factor* tertinggi pada sebagian besar material, yang mengindikasikan distribusi tegangan yang lebih baik dibandingkan desain lainnya. Dari sisi material, Al 7075-T6 memberikan performa terbaik dengan nilai *safety factor* maksimum sebesar 13,95 karena memiliki *yield strength* yang tinggi serta rasio kekuatan terhadap berat yang unggul. Sementara itu, nilai terendah diperoleh pada Al 6061-T6 Desain awal sebesar 6,33, namun masih berada di atas batas keamanan yang direkomendasikan. Dengan demikian, seluruh kombinasi desain dan material dinyatakan aman untuk digunakan, sedangkan kombinasi Desain optimasi 2 dan Al 7075-T6 merupakan pilihan paling optimal karena mampu memberikan tingkat keamanan struktural tertinggi sekaligus mendukung pengembangan kendaraan listrik yang ringan dan efisien.



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

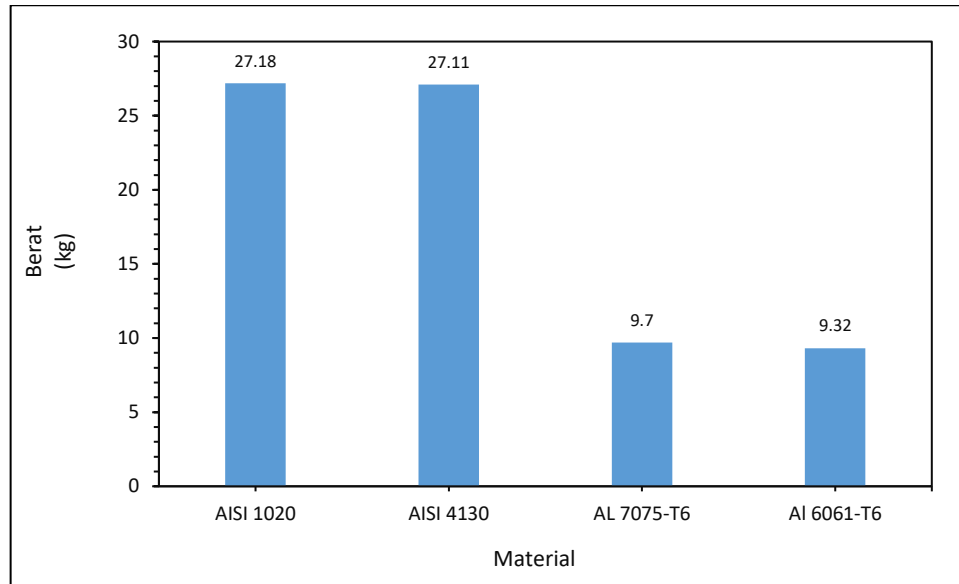
4.3 Massa Total Rangka

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

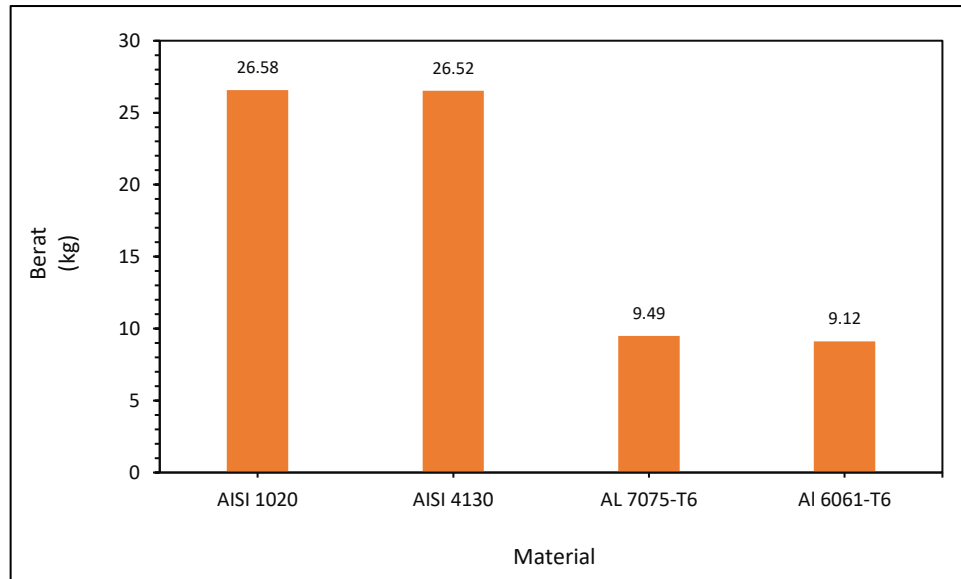
material tersebut, di mana densitas aluminium berkisar $2,7 \text{ g/cm}^3$ jauh lebih rendah dibandingkan baja yang sekitar $7,85 \text{ g/cm}^3$.



Gambar 4.30 Grafik perbandingan massa desain awal terhadap material

B. Desain optimasi 1

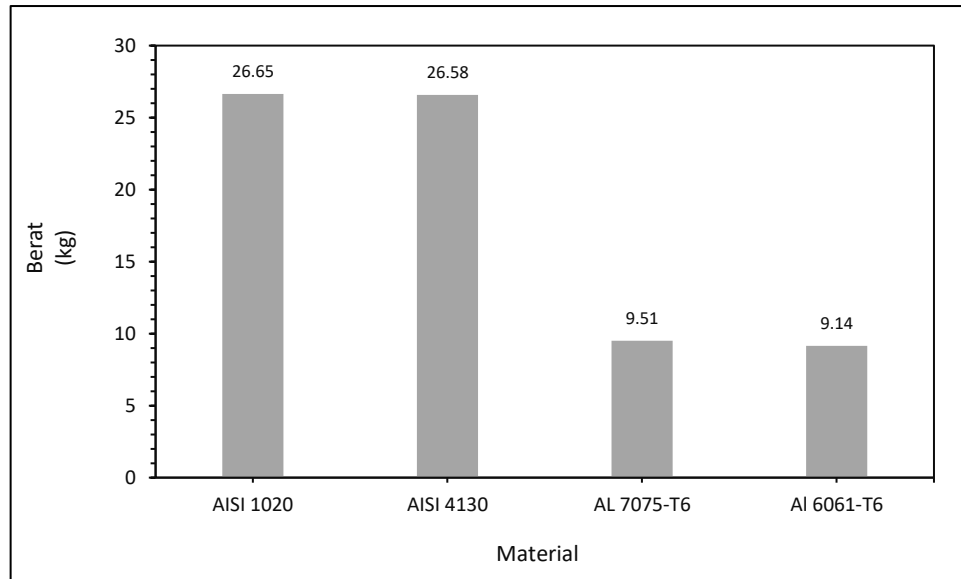
Pada Gambar 4.31 desain optimasi 1 massa rangka berhasil diturunkan untuk semua jenis material, Pada desain optimasi 1, massa rangka berhasil diturunkan menjadi 26,58 kg untuk AISI 1020 dan 26,52 kg untuk AISI 4130, yang masing-masing menunjukkan penurunan sebesar 0,60 kg yaitu, sekitar 2,2% dibandingkan 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

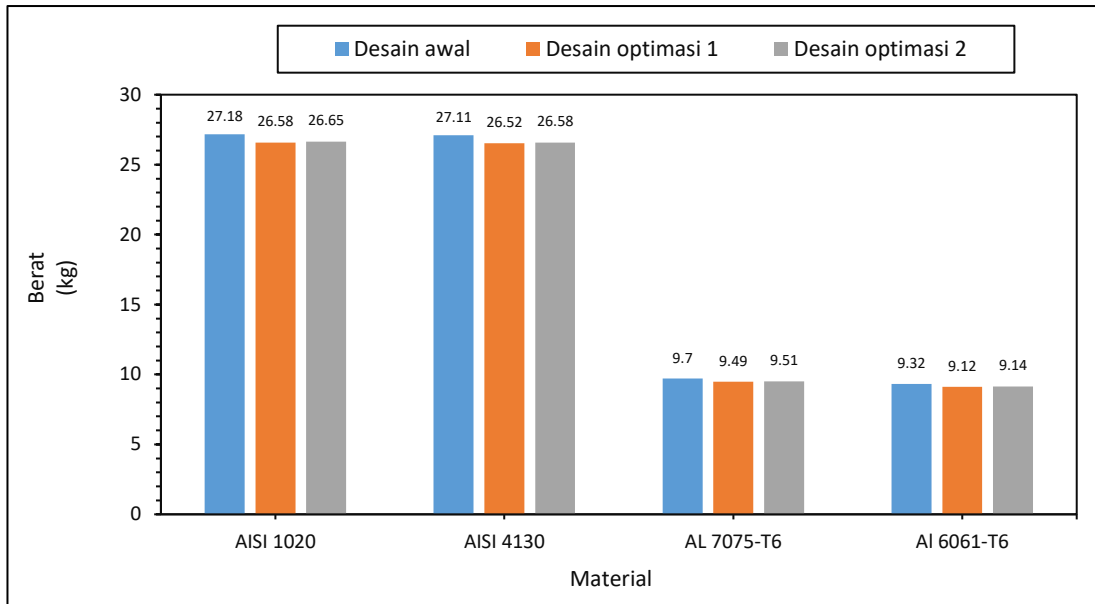
Dari Gambar 4.32 desain optimasi 2 menghasilkan massa yang sedikit lebih tinggi dibandingkan desain optimasi 1, yaitu 26,65 kg untuk AISI 1020 dan 26,58 kg untuk AISI 4130. Perbedaan massa antara desain optimasi 1 dan desain optimasi 2 sangat kecil, hanya berkisar 0,07 kg, yang mengindikasikan bahwa 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

<i>Material</i>	<i>Densitas (g/m³)</i>	<i>Kekuatan Spesifik Tarik (kN.m/kg)</i>	<i>Kekuatan Spesifik Luluh (kN.m/kg)</i>
<i>AISI 1020</i>	7,86	53,4	38,8
<i>AISI 4130</i>	7,86	71,2	58,5
<i>Al 7075-T6</i>	2,81	203,6	179,0
<i>Al 6061-T6</i>	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 statis yang telah dilakukan terhadap tiga varian desain dengan empat jenis material, seluruh kombinasi desain dan material memenuhi batasan *safety factor* minimum ≥ 4 dan nilai defleksi tidak melebihi desain awal sehingga seluruhnya dinyatakan aman secara struktural. Dari sisi kekakuan, material

baja AISI 1020 dan AISI 4130 menghasilkan deformasi lebih rendah dibandingkan aluminium karena memiliki modulus elastisitas yang lebih tinggi, sedangkan material aluminium Al 7075-T6 dan Al 6061-T6 menghasilkan massa rangka yang jauh lebih ringan, yakni sekitar 64% lebih ringan dibandingkan material baja. Proses optimasi geometri yang diterapkan pada Desain optimasi 1 dan Desain optimasi 2 terbukti efektif dalam meningkatkan kinerja struktural sekaligus menurunkan massa rangka dibandingkan Desain 1 sebagai desain awal.

Apabila kemudahan proses manufaktur menjadi prioritas, Desain optimasi 1 dengan material AISI 1020 merupakan pilihan yang paling direkomendasikan karena menghasilkan tegangan maksimum terendah sebesar 37,313 MPa, deformasi paling kecil sebesar 0,27312 mm, dan *safety factor* terbaik sebesar 9,3801 di antara seluruh material baja dengan massa 26,58 kg. Apabila efisiensi bobot menjadi prioritas utama, Desain optimasi 2 dengan material Al 7075-T6 menjadi pilihan terbaik karena menghasilkan *safety factor* tertinggi sebesar 13,957, tegangan terendah sebesar 36,039 MPa, dan massa rangka hanya 9,51 kg di antara seluruh kombinasi yang dianalisis.