

BAB IV

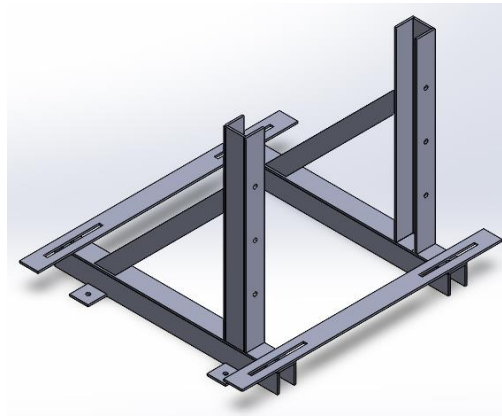
HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil dan pembahasan menyajikan hasil yang diperoleh dari proses perancangan dan analisis, serta pembahasan yang berkaitan dengan tujuan penelitian. Hasil yang ditampilkan berupa data simulasi yang telah dilakukan menggunakan metode FEA (*Finite Element Analysis*), sehingga dapat diperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai kinerja serta kelayakan desain *bracket* yang diusulkan.

4.1 Hasil Optimalisasi Ketebalan Berdasarkan *Trial and Error*

Proses *trial and error* pada optimalisasi ketebalan setiap material dilakukan berdasarkan acuan nilai faktor keamanan minimum sebesar 4 pada kondisi pembebanan dinamis akibat gaya tembakan. Apabila hasil simulasi menunjukkan nilai faktor keamanan kurang dari 4 atau jauh melebihi 4, maka ketebalan material disesuaikan hingga mendekati nilai faktor keamanan minimum tersebut.

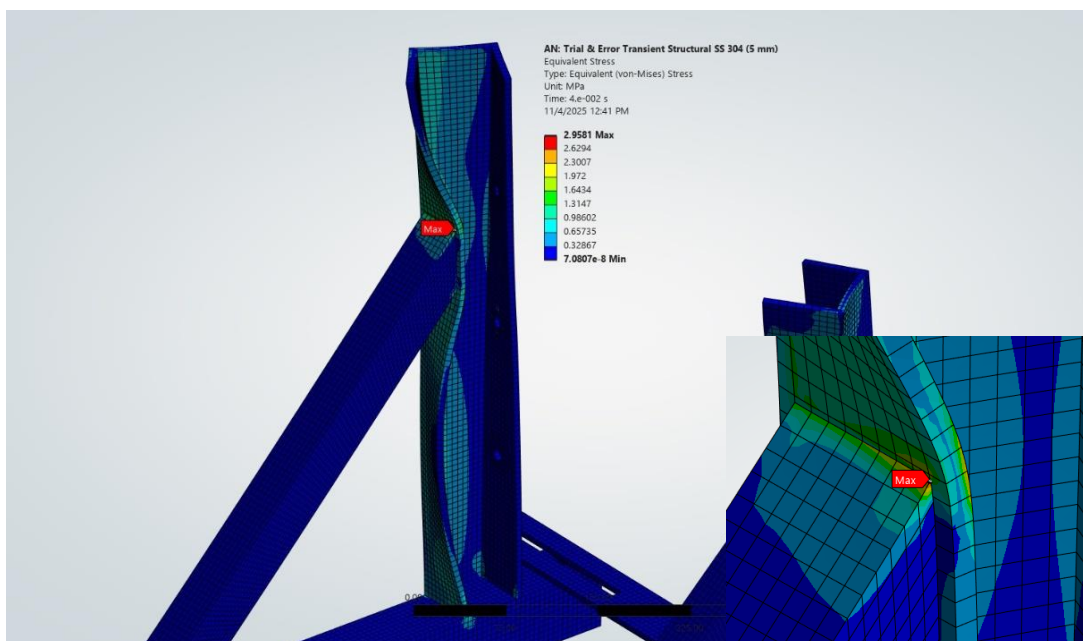
Percobaan diawali dengan menetapkan ketebalan awal sebesar 5 mm pada seluruh bagian komponen untuk setiap material. Selanjutnya, simulasi dilakukan untuk memperoleh distribusi tegangan dan nilai faktor keamanan pada kondisi pembebanan dinamis menggunakan modul *Transient Structural* pada perangkat lunak numerik pada perangkat lunak numerik berbasis metode elemen hingga (FEA).



Gambar 4.1 *Trial and Error* Ketebalan 5 mm

4.1.1 Material Stainless Steel 304

Pada material Stainless Steel 304, dilakukan percobaan dengan ukuran ketebalan awal 5 mm pada seluruh bagian komponen. Model seperti Gambar 4.1 tersebut kemudian disimulasikan untuk mengetahui distribusi tegangan yang terjadi dan nilai faktor keamanannya pada kondisi pembebanan dinamis.

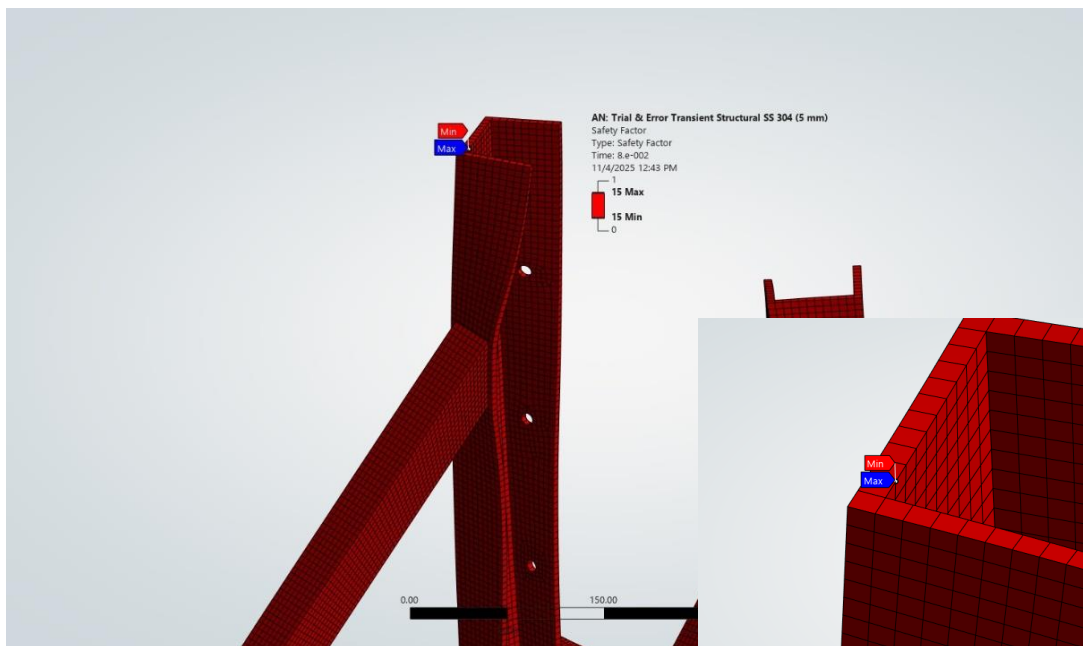


Gambar 4.2 *Trial and Error Equivalent Stress Max.* SS 304 (5 mm)

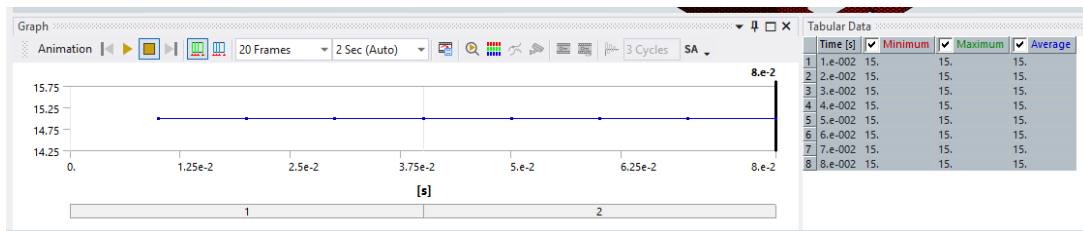


Gambar 4.3 Trial and Error Time Equivalent Stress Max. SS 304 (5 mm)

Gambar 4.2 dan Gambar 4.3 menampilkan hasil distribusi tegangan ekuivalen maksimum (*Von Mises*) pada *bracket* berbahan Stainless Steel 304 dengan ukuran ketebalan 5 mm pada seluruh komponennya. Dari hasil simulasi terlihat bahwa tegangan tertinggi terjadi pada area sambungan antara tumpuan dan dudukan kaca, namun nilai tegangan maksimum sebesar 2,95 MPa pada detik ke 0,04, sehingga masih jauh berada di bawah batas luluh material sehingga aman terhadap kegagalan plastis. Namun yang menjadi acuan tetap pada hasil nilai faktor keamanan yang telah ditetapkan.



Gambar 4.4 Trial and Error Safety factor SS 304 (5 mm)

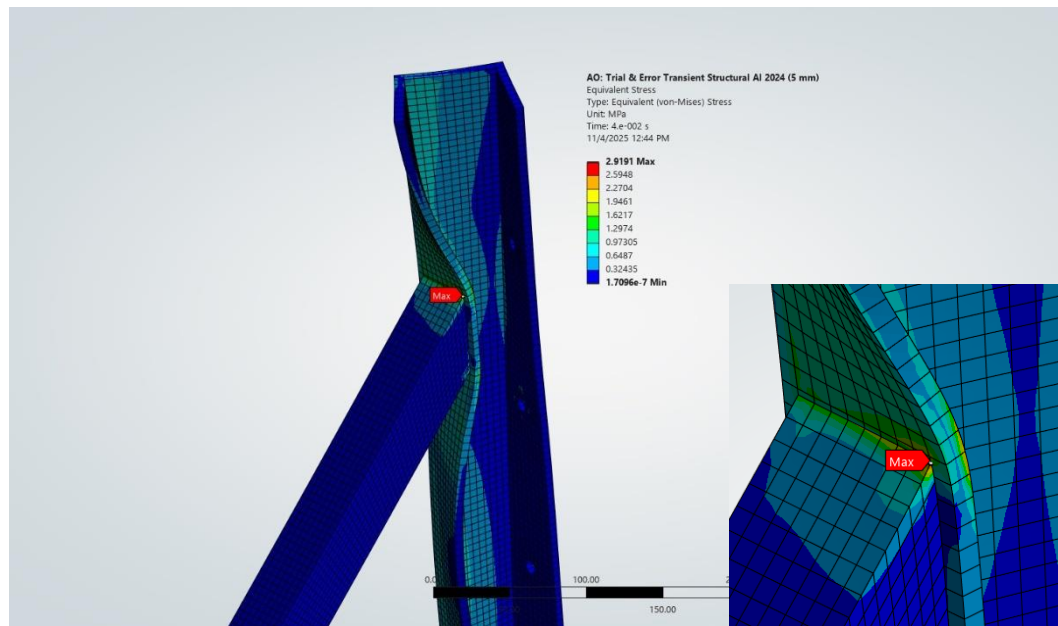


Gambar 4.5 *Trial and Error Time Safety factor* SS 304 (5 mm)

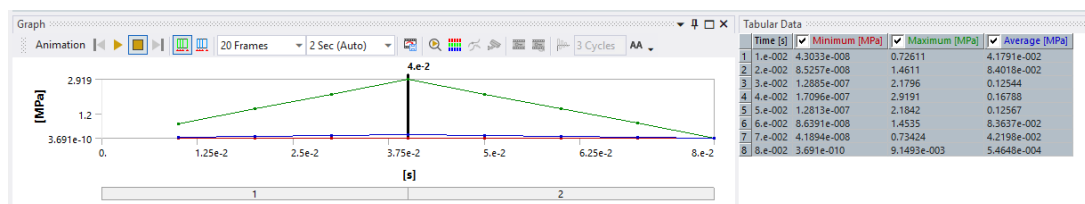
Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 menunjukkan nilai faktor keamanan maksimum sebesar 15, karena perangkat lunak numerik membatasi tampilan nilai maksimum hingga angka tersebut. Namun, apabila dihitung secara manual menggunakan persamaan faktor keamanan, yaitu perbandingan antara tegangan luluh (*yield strength*) material dengan tegangan aktual, maka diperoleh sebesar 69,4 ($205 \text{ MPa} \div 2,95 \text{ MPa}$). Hal ini menunjukkan bahwa dengan ketebalan 5 mm, nilai faktor keamanan yang dihasilkan masih jauh di atas batas minimum yang ditetapkan. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengurangan ketebalan material agar nilai faktor keamanan mendekati 4.

4.1.2 Material Aluminium 2024

Untuk material Aluminium 2024, digunakan ukuran ketebalan awal sebesar 5 mm yang diterapkan merata pada seluruh bagian komponen. Model seperti Gambar 4.1 yang kemudian dianalisis melalui simulasi guna memperoleh distribusi tegangan yang terjadi serta nilai faktor keamanan pada kondisi pembebanan dinamis, seperti pada Gambar 4.6 hingga Gambar 4.9.

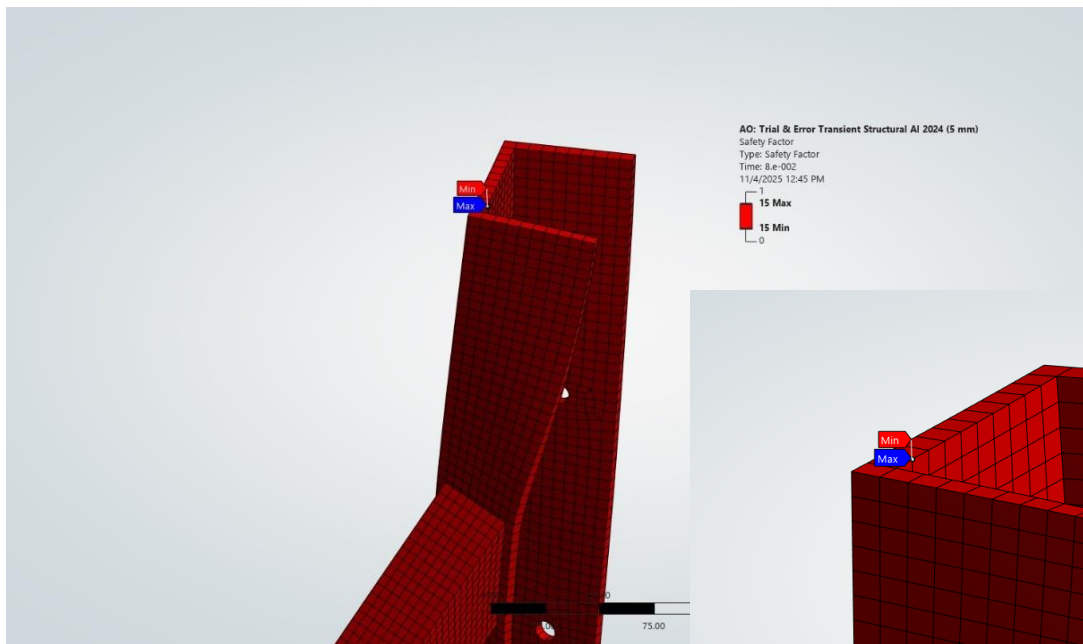


Gambar 4.6 Trial and Error Equivalent Stress Max. Al 2024 (5 mm)

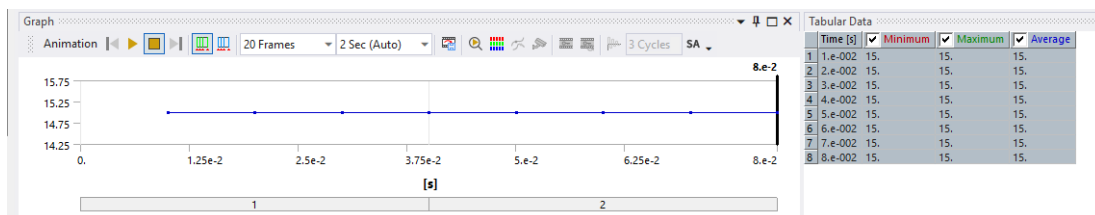


Gambar 4.7 Trial and Error Time Equivalent Stress Max. Al 2024 (5 mm)

Gambar 4.6 dan Gambar 4.7 menunjukkan hasil distribusi tegangan ekuivalen maksimum (*Von Mises*) pada *bracket* dengan material Aluminium 2024 ukuran ketebalan 5 mm pada seluruh komponennya. Hasil simulasi memperlihatkan bahwa area sambungan antara tumpuan dan dudukan kaca mengalami tegangan tertinggi dibandingkan bagian lainnya. Nilai maksimum tegangan yang dihasilkan sebesar 2,91 MPa pada detik ke 0,04, sehingga masih jauh lebih rendah dari batas luluh material, sehingga struktur dinyatakan sangat aman. Namun evaluasi utama tetap mengacu pada nilai faktor keamanan yang telah menjadi dasar penilaian desain.



Gambar 4.8 *Trial and Error Safety factor AI 2024 (5 mm)*

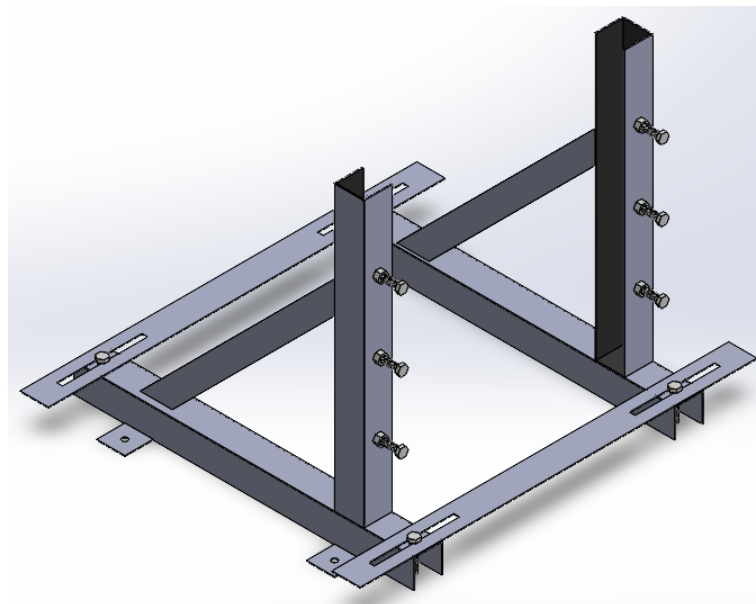


Gambar 4.9 *Trial and Error Time Safety factor AI 2024 (5 mm)*

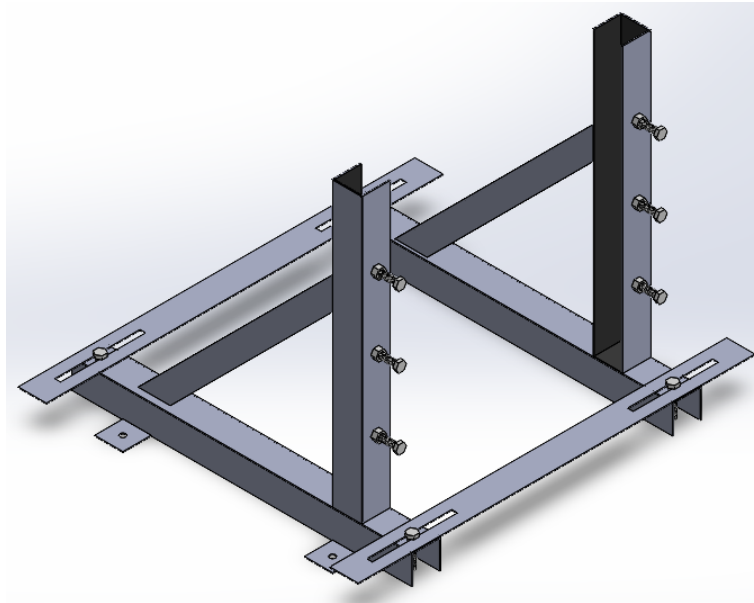
Gambar 4.8 dan Gambar 4.9 menampilkan hasil analisis nilai faktor keamanan dari perangkat lunak numerik menampilkan nilai faktor keamanan maksimum sebesar 15, karena terdapat batas tampilan maksimum pada program tersebut. Namun, perhitungan manual menggunakan rasio antara tegangan luluh (*yield strength*) dan tegangan aktual menghasilkan nilai sebesar 99 ($290 \text{ MPa} \div 2,91 \text{ MPa}$). Nilai ini mengindikasikan bahwa pada ketebalan 5 mm, faktor keamanan masih jauh di atas batas minimum yang ditetapkan. Oleh karena itu, direkomendasikan pengurangan ketebalan material agar faktor keamanan mendekati 4, sesuai kriteria desain.

4.2 Hasil Ketebalan Optimal dan Validitas *Mesh*

Berdasarkan hasil *trial and error* pada kondisi pembebanan dinamis dengan acuan nilai faktor keamanan minimum sebesar 4, diperoleh ukuran ketebalan optimal untuk masing-masing material. Perbedaan ukuran ketebalan disesuaikan dengan sifat mekanik dan kekakuan setiap material terhadap beban yang sama. Aluminium 2024 memiliki kekuatan luluh tinggi sehingga ukuran ketebalan 1,2 mm dianggap efisien, Stainless Steel 304 memiliki kekuatan sedikit lebih rendah sehingga digunakan ukuran ketebalan 1,5 mm agar tetap aman menahan beban dengan nilai faktor keamanan minimum yang ditetapkan pada kondisi pembebanan dinamis. Penentuan ukuran ketebalan juga mempertimbangkan efisiensi material serta kemudahan proses manufaktur sesuai ketersediaan di pasaran. Hasil desain tersebut divisualisasikan pada Gambar 4.10 dan Gambar 4.11.



Gambar 4.10 Geometri 1 (Stainless Steel 304 Tebal 1,5 mm)

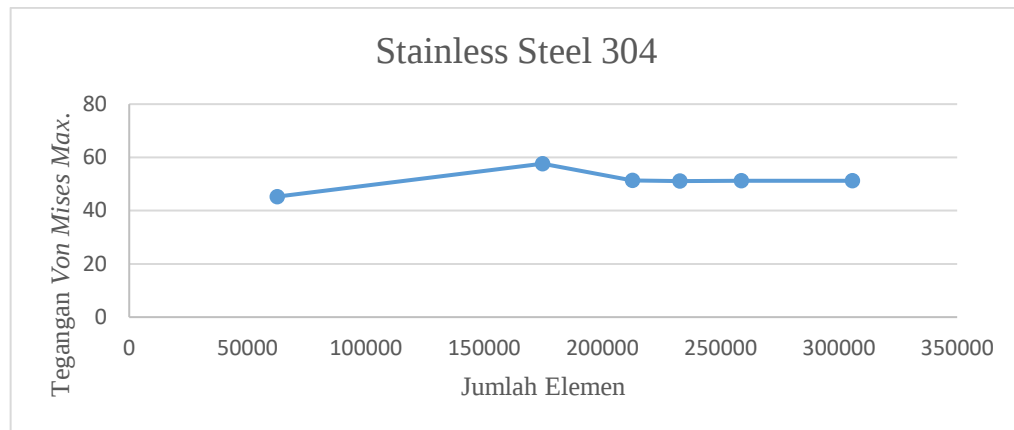


Gambar 4.11 Geometri 2 (Aluminium 2024 Tebal 1,2 mm)

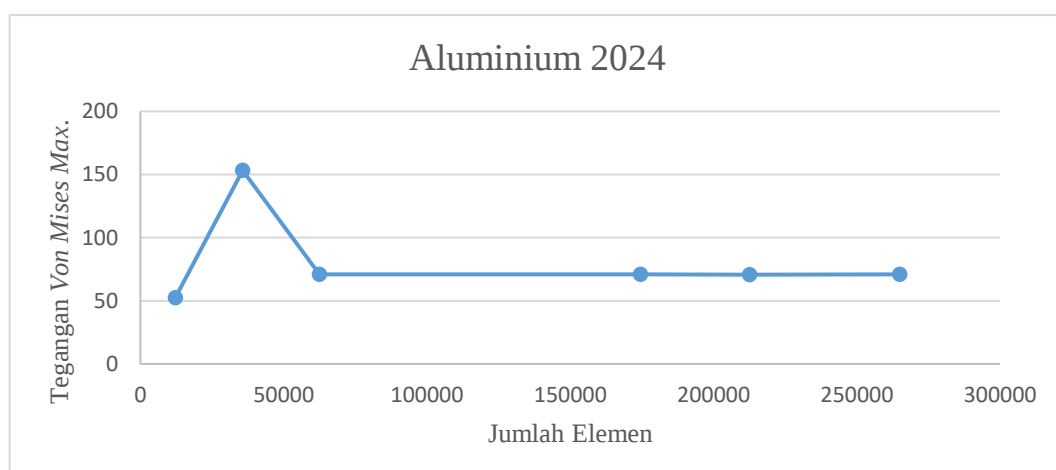
Hasil ketiga desain yang telah dianalisis merupakan keluaran setelah dilakukan proses uji *meshing* pada masing-masing model dengan kondisi pembebanan dinamis melalui modul *Transient Structural*. Proses uji *meshing* tersebut bertujuan untuk memastikan bahwa kualitas *mesh* memenuhi standar analisis numerik sehingga hasil perhitungan tegangan dan faktor keamanan yang diperoleh dapat dipercaya. Data hasil uji *meshing* untuk ketiga material tersebut disajikan pada Tabel 4. 1 dan Tabel 4. 2 berikut sebagai dasar evaluasi konvergensi nilai tegangan serta stabilitas hasil.

Tabel 4. 1 Hasil Uji Meshing SS 304

Material	<i>Skewness Max.</i>	Jumlah Elemen	Tegangan Von Mises Max. (MPa)	<i>Safety factor</i>
Stainless Steel 304 (Tebal 1,5 mm)	0,6	62448	45,26	4,52
	0,6	174645	57,63	3,55
	0,6	212651	51,33	4
	0,6	232755	51,15	4
	0,6	258755	51,17	4
	0,6	305629	51,16	4

Gambar 4.12 Grafik Hasil Uji *Meshing* SS 304Tabel 4. 2 Hasil Uji *Meshing* Aluminium 2024

Material	<i>Skewness Max.</i>	Jumlah Elemen	Tegangan Von Mises Max. (MPa)	<i>Safety factor</i>
Aluminium 2024 (Tebal 1,2 mm)	0,79	12204	52,51	5,5
	0,67	35678	153,2	1,89
	0,6	62447	70,8	4,09
	0,6	174550	70,9	4,09
	0,6	212674	70,7	4,09
	0,6	265027	70,8	4,09

Gambar 4.13 Grafik Hasil Uji *Meshing* Al 2024

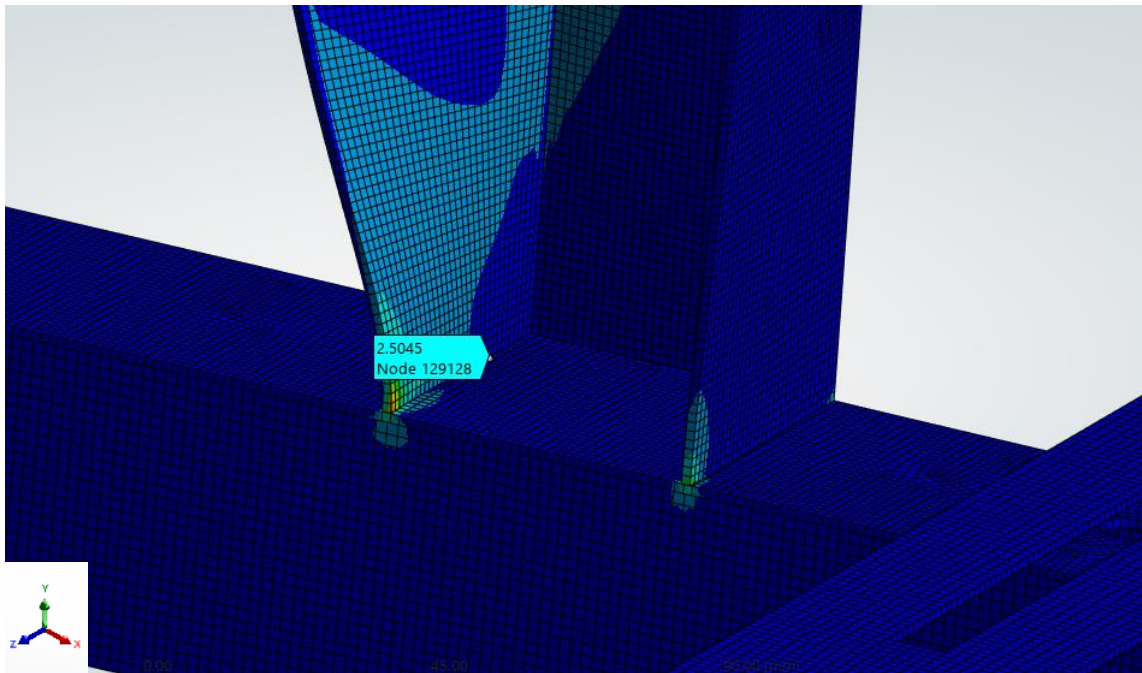
Hasil uji *meshing* ketiga material menunjukkan adanya konvergensi nilai tegangan *Von Mises* dan *safety factor* pada analisis *Transient Structural* ketika jumlah elemen mencapai batas tertentu. Setelah titik tersebut, penambahan elemen tidak lagi memengaruhi hasil secara signifikan. Data diatas menunjukkan kurva tegangan dan *safety factor* awalnya berubah cukup besar pada *mesh* kasar, kemudian melandai dan stabil pada *mesh* yang lebih halus. Stainless Steel 304 mencapai kestabilan pada sekitar 200.000 elemen dan Aluminium 2024 pada sekitar 60.000 elemen. Dengan demikian, memperlihatkan bahwa hasil analisis menjadi konsisten setelah titik konvergensi, menandakan *mesh* sudah cukup representatif untuk analisis dinamis.

4.3 Validasi Simulasi Pada Pembebanan Dinamis

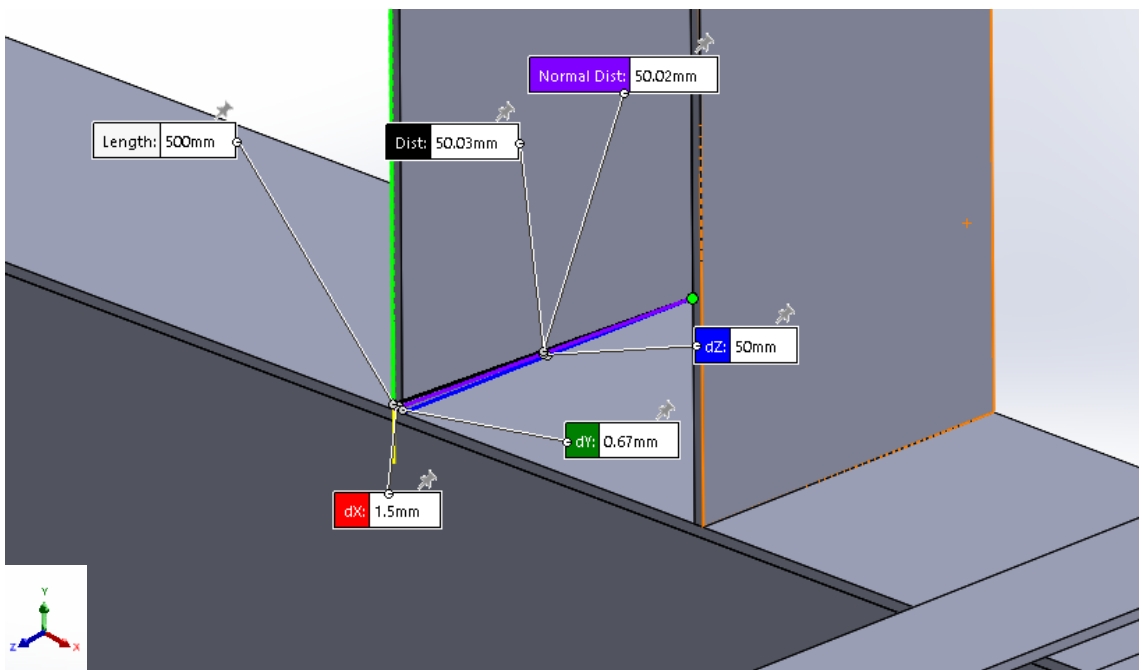
Validasi hasil simulasi pada pembebanan dinamis yang dilakukan untuk memastikan kesesuaian antara hasil simulasi numerik dengan pendekatan analitik serta prinsip mekanika yang berlaku. Ini bertujuan untuk menilai tingkat keandalan simulasi dalam merepresentasikan respon struktur terhadap beban dinamis yang bekerja.

4.3.1 Material Stainless Steel 304

Gambar 4.14 dan Gambar 4.15 menunjukkan lokasi hasil simulasi pembebanan dinamis pada *bracket* kaca tahan peluru dengan material Stainless Steel 304 yang selanjutnya dibandingkan dengan hasil perhitungan analitik pada titik yang sama. Perbandingan tersebut dilakukan untuk mengevaluasi tingkat ketelitian metode simulasi yang digunakan, baik pada pembebanan dinamis maupun statis.



Gambar 4.14 Letak *node* SS 304



Gambar 4.15 Jarak *node* SS 304 ke titik pusat gaya

Diketahui:

- Panjang permukaan (tinggi) atau *length* sebesar 500 mm.
- Pusat gaya terletak pada setengah dari tinggi permukaan pada salah satu sisi *bracket*.
- Panjang permukaan penampang (h) atau dZ sebesar 50 mm.
- Ketebalan penampang (b) atau dX sebesar 1,5 mm.
- Gaya total yang bekerja sebesar 238,41 N dan terdistribusi merata pada dua sisi *bracket*, sehingga masing-masing sisi menerima sebesar 119,205 N.

Ditanyakan: $\sigma_{max,min} = ?$

Jawaban:

- **Momen Gaya**

$$\begin{aligned}
 M &= F \cdot L \\
 &= F \cdot \frac{1}{2} L \\
 &= 119,205 \cdot \frac{1}{2} 0,5 \\
 &= 29,8 \text{ N.m}
 \end{aligned}$$

- **Tegangan Normal**

$$\begin{aligned}
 \sigma_y &= \frac{M \cdot c}{I} \\
 &= \frac{M \cdot \frac{1}{2} b}{\frac{1}{12} b h^3} \\
 &= \frac{29,8 \cdot \frac{1}{2} 0,0015}{\frac{1}{12} 0,0015 \cdot 0,05^3} \\
 &= 1,43 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

- **Tegangan Geser**

$$\begin{aligned}\tau_{yz} &= \frac{F}{A} \\ &= \frac{119,205}{0,0015 \cdot 0,05} \\ &= 1,58 \text{ MPa}\end{aligned}$$

- **Tegangan Prinsipal**

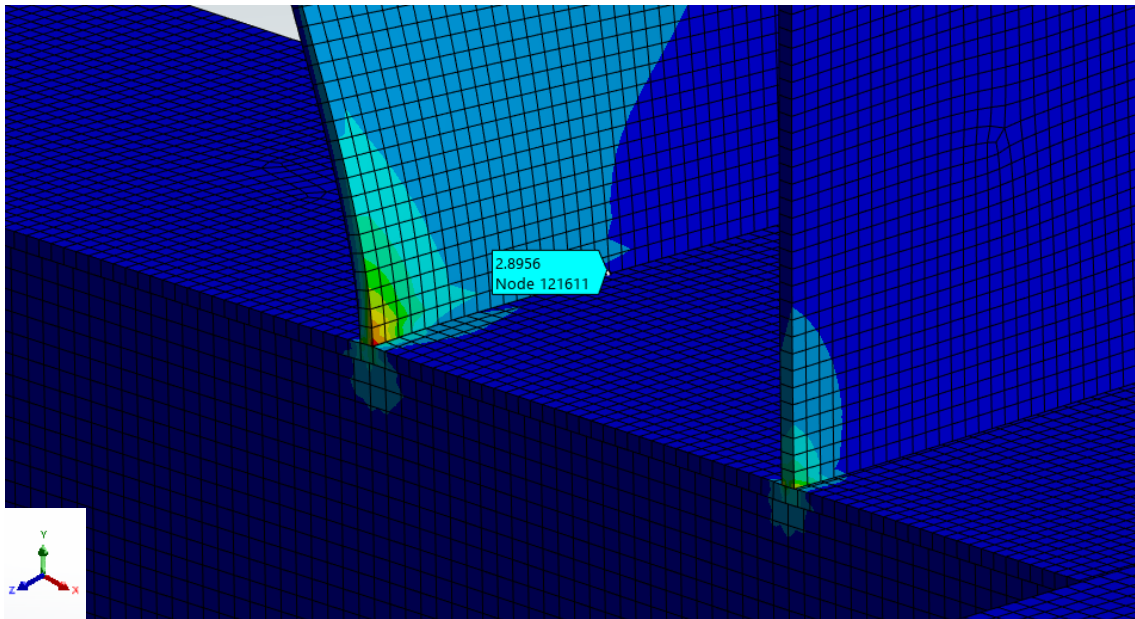
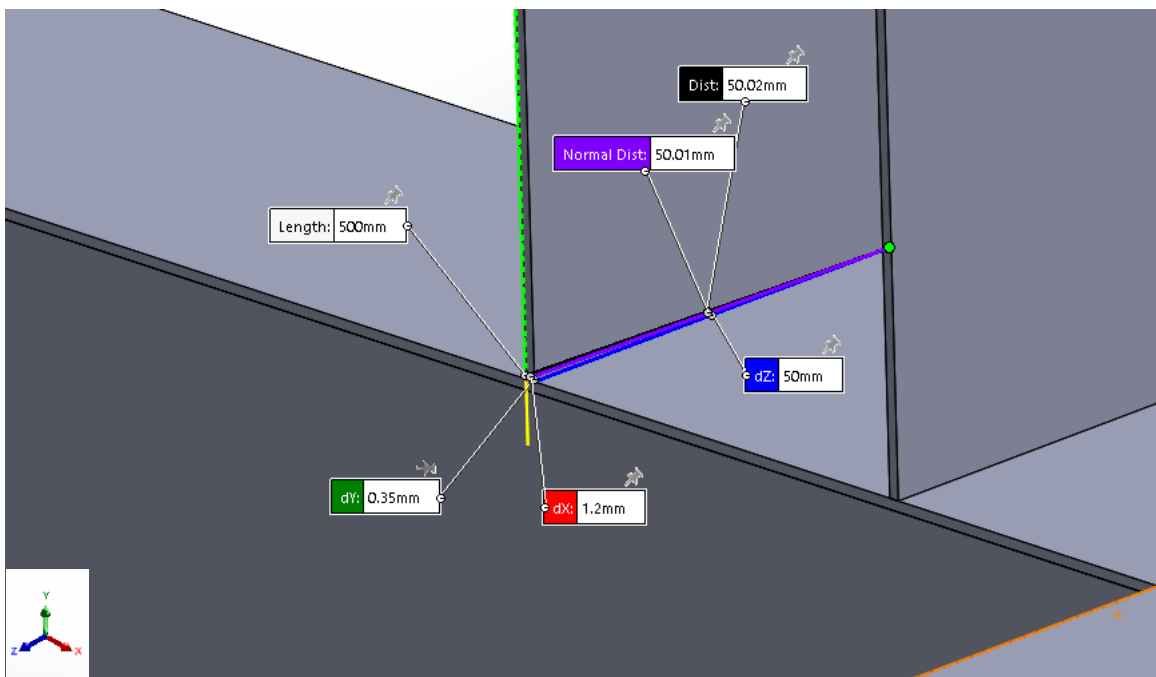
$$\begin{aligned}\sigma_{\max, \min} &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \\ \sigma_{\max, \min} &= \frac{0 + 1,43}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{0 - 1,43}{2}\right)^2 + 1,58^2} \\ \sigma_{\max} &= 2,44 \text{ MPa} \\ \sigma_{\min} &= -1,01 \text{ MPa}\end{aligned}$$

- **Perbandingan Hasil**

$$\begin{aligned}\% \text{ Error} &= \frac{(H_{\text{simulasi}} - H_{\text{analitik}})}{H_{\text{analitik}}} \cdot 100 \\ &= \frac{(2,5 - 2,44)}{2,44} \cdot 100 \\ &= 2,4 \%\end{aligned}$$

4.3.2 Material Aluminium 2024

Gambar 4.16 dan Gambar 4.17 memperlihatkan titik pengambilan hasil simulasi pembebanan dinamis pada *bracket* kaca tahan peluru berbahan Aluminium 2024. Nilai hasil simulasi pada titik tersebut kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan analitik yang bersesuaian guna menilai tingkat akurasi metode simulasi yang diterapkan pada kondisi pembebanan dinamis dan statis.

Gambar 4.16 Letak *node* Al 2024Gambar 4.17 Jarak *node* Al 2024 ke titik pusat gaya

Diketahui:

- Panjang permukaan (tinggi) atau *length* sebesar 500 mm.
- Pusat gaya terletak pada setengah dari tinggi permukaan pada salah satu sisi *bracket*.
- Panjang permukaan penampang (h) atau dZ sebesar 50 mm.
- Ketebalan penampang (b) atau dX sebesar 1,2 mm.
- Gaya total yang bekerja sebesar 238,41 N dan terdistribusi merata pada dua sisi *bracket*, sehingga masing-masing sisi menerima sebesar 119,205 N.

Ditanyakan: $\sigma_{max,min} = ?$

Jawaban:

- **Momen Gaya**

$$\begin{aligned}
 M &= F \cdot L \\
 &= F \cdot \frac{1}{2} L \\
 &= 119,205 \cdot \frac{1}{2} 0,5 \\
 &= 29,8 \text{ N.m}
 \end{aligned}$$

- **Tegangan Normal**

$$\begin{aligned}
 \sigma_y &= \frac{M \cdot c}{I} \\
 &= \frac{M \cdot \frac{1}{2} b}{\frac{1}{12} b h^3} \\
 &= \frac{29,8 \cdot \frac{1}{2} 0,0012}{\frac{1}{12} 0,0012 \cdot 0,05^3} \\
 &= 1,43 \text{ MPa}
 \end{aligned}$$

- **Tegangan Geser**

$$\begin{aligned}\tau_{yz} &= \frac{F}{A} \\ &= \frac{119,205}{0,0012 \cdot 0,05} \\ &= 1,98 \text{ MPa}\end{aligned}$$

- **Tegangan Prinsipal**

$$\begin{aligned}\sigma_{\max, \min} &= \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2} \\ \sigma_{\max, \min} &= \frac{0 + 1,43}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{0 - 1,43}{2}\right)^2 + 1,98^2} \\ \sigma_{\max} &= 2,82 \text{ MPa} \\ \sigma_{\min} &= -1,39 \text{ MPa}\end{aligned}$$

- **Perbandingan Hasil**

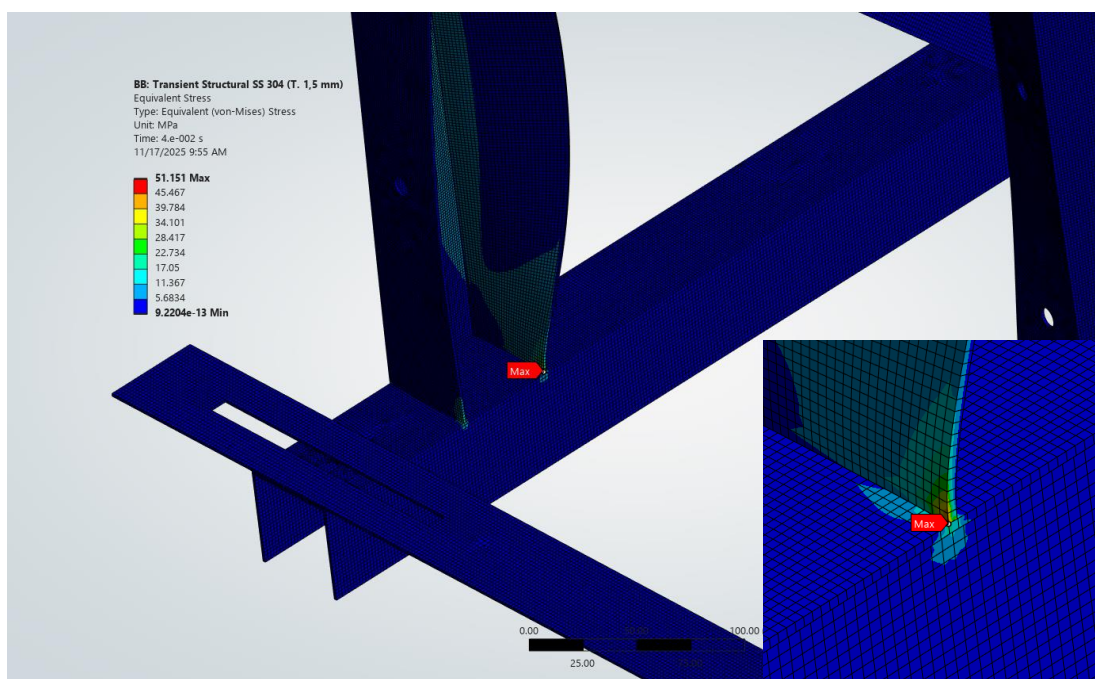
$$\begin{aligned}\% \text{ Error} &= \frac{(H_{\text{simulasi}} - H_{\text{analitik}})}{H_{\text{analitik}}} \cdot 100 \\ &= \frac{(2,89 - 2,82)}{2,82} \cdot 100 \\ &= 2,4 \%\end{aligned}$$

4.4 Hasil Simulasi Material Stainless Steel 304

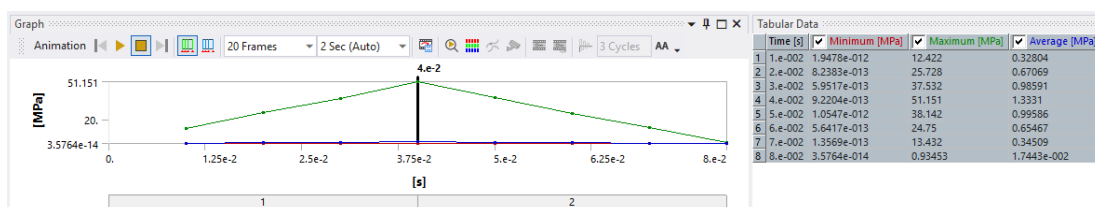
Bracket dengan material Stainless Steel 304 dirancang menggunakan ukuran ketebalan sebesar 1,5 mm pada seluruh bagiannya. Penerapan ketebalan yang seragam dipilih agar proses pembuatan lebih sederhana sekaligus menekan biaya penggunaan material. Hasil simulasi FEA untuk material Stainless Steel 304 atau Geometri 1 dapat dilihat Gambar 4.10 yang merupakan hasil simulasi tipe dinamis dan statis.

4.4.1 Tipe Dinamis SS 304

Simulasi pembebanan dinamis dilakukan pada *bracket* dengan variasi ketebalan sesuai material yang digunakan untuk mengetahui karakteristik respon strukturnya. Analisis difokuskan pada distribusi tegangan yang terjadi, serta nilai faktor keamanan guna menggambarkan perilaku struktur terhadap gaya tembakan yang mengenai kaca dan selanjutnya terdistribusi pada *bracket*.

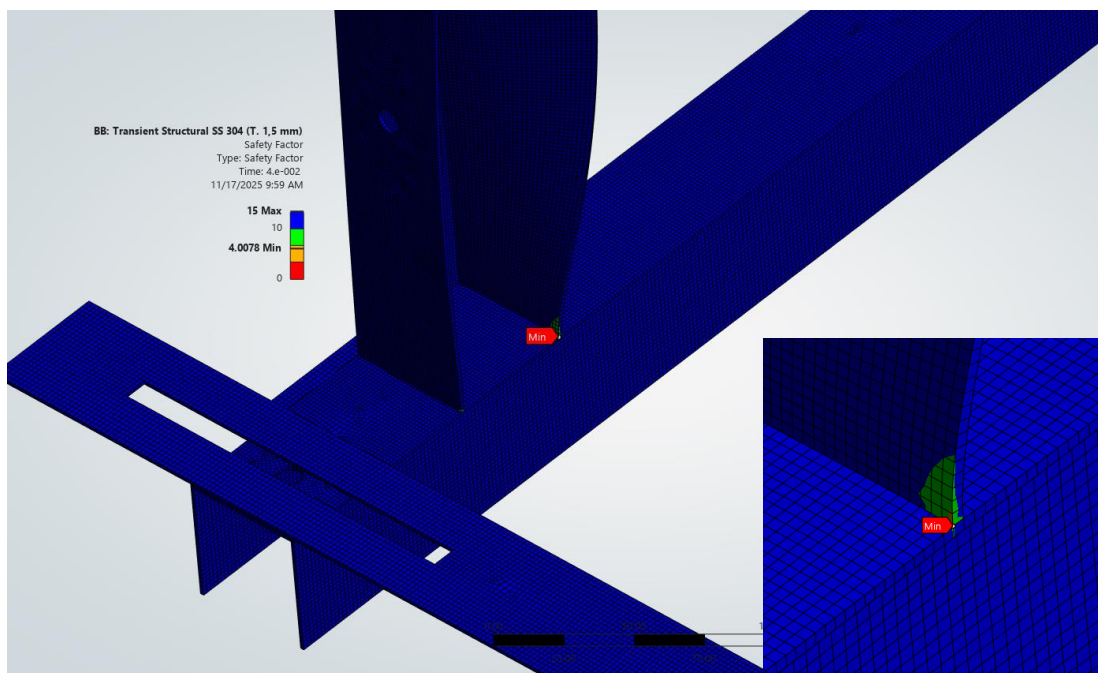


Gambar 4.18 *Equivalent Stress Max. SS 304 Dinamis*

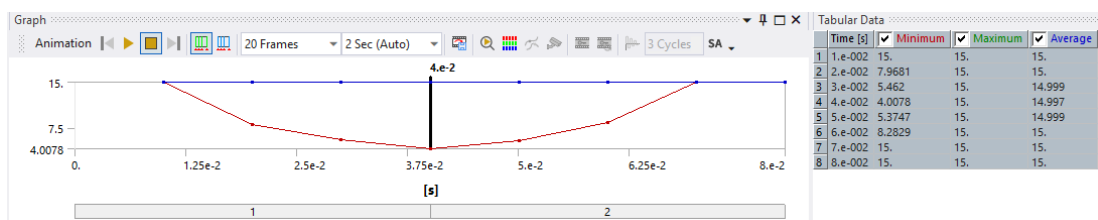


Gambar 4.19 *Time Equivalent Stress Max. SS 304 Dinamis*

Gambar 4.18 dan Gambar 4.19 menampilkan hasil distribusi tegangan ekuivalen maksimum sebesar 51,15 MPa pada waktu 0,04 detik pada *bracket* berbahan Stainless Steel 304 saat mengalami pembebanan dinamis. Tegangan tertinggi teridentifikasi pada area sambungan antara pelat utama dan lengan penahan, sebagai titik awal penyebaran gaya akibat tumbukan. Nilai hasil tegangan masih berada di bawah batas luluh material, sehingga tetap dalam kondisi aman.

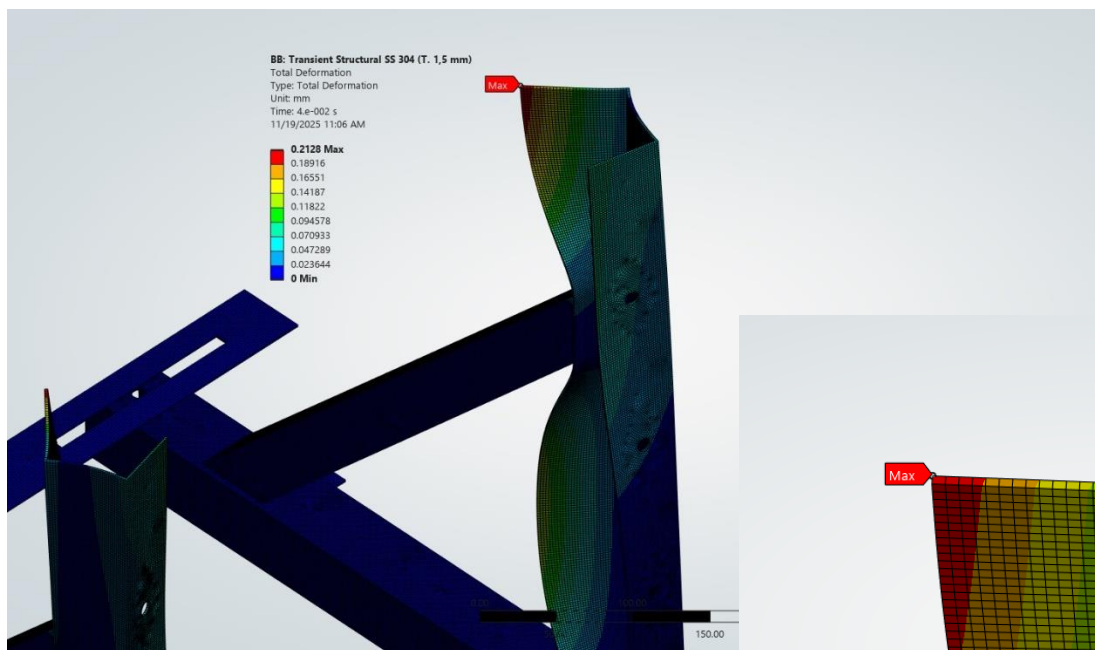


Gambar 4.20 *Safety factor* SS 304 Dinamis

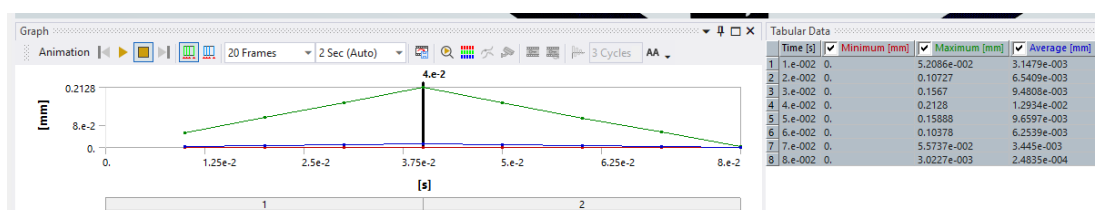


Gambar 4.21 *Time Safety factor* SS 304 Dinamis

Gambar 4.20 dan Gambar 4.21 memperlihatkan distribusi nilai faktor keamanan sebesar 4,00 pada waktu 0,04 detik hasil simulasi pembebanan dinamis. Nilai tertinggi pada area sambungan antara pelat utama dan lengan penahan. *Bracket* menunjukkan nilai faktor keamanan berada pada batas minimum yang telah ditetapkan, yaitu sebesar 4, yang menandakan bahwa desain telah mencapai kondisi optimal dan efisien. Adapun faktor keamanan yang digunakan sebagai acuan pada perangkat lunak numerik merupakan nilai minimum yang menggambarkan kondisi paling kritis.

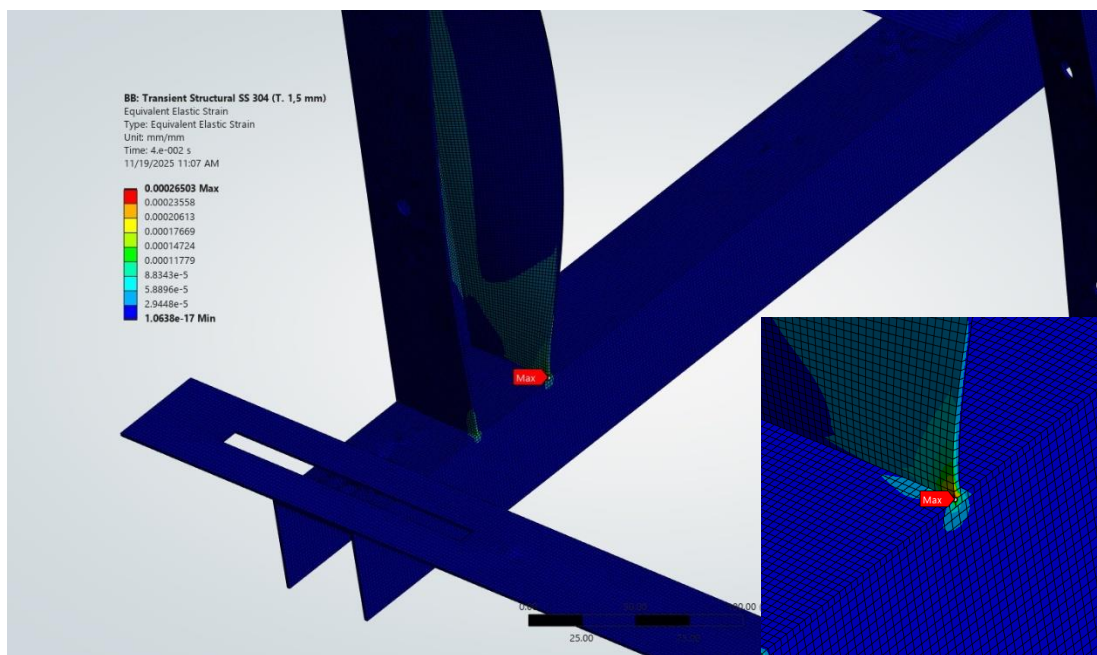


Gambar 4.22 *Total Deformation Max. SS 304 Dinamis*

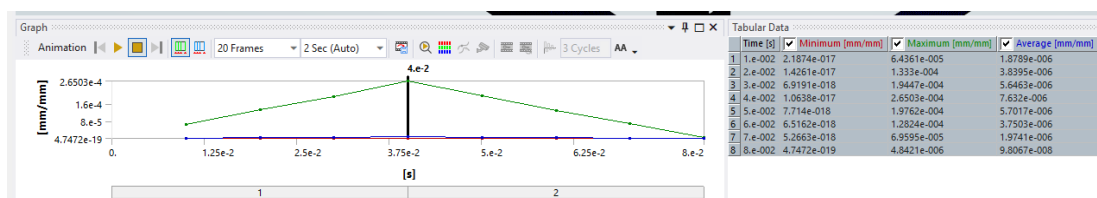


Gambar 4.23 *Time Total Deformation Max. SS 304 Dinamis*

Gambar 4.22 dan Gambar 4.23 menunjukkan hasil simulasi pada deformasi total maksimum sebesar 0,212 mm pada waktu 0,04 detik, yang terjadi akibat gaya dinamis dari impak tembakan peluru yang mengenai kaca dan selanjutnya terdistribusi pada *bracket*. Deformasi tertinggi teridentifikasi pada ujung lengan penahan, namun besarnya masih berada dalam batas aman, sehingga tidak menimbulkan perubahan permanen pada struktur.

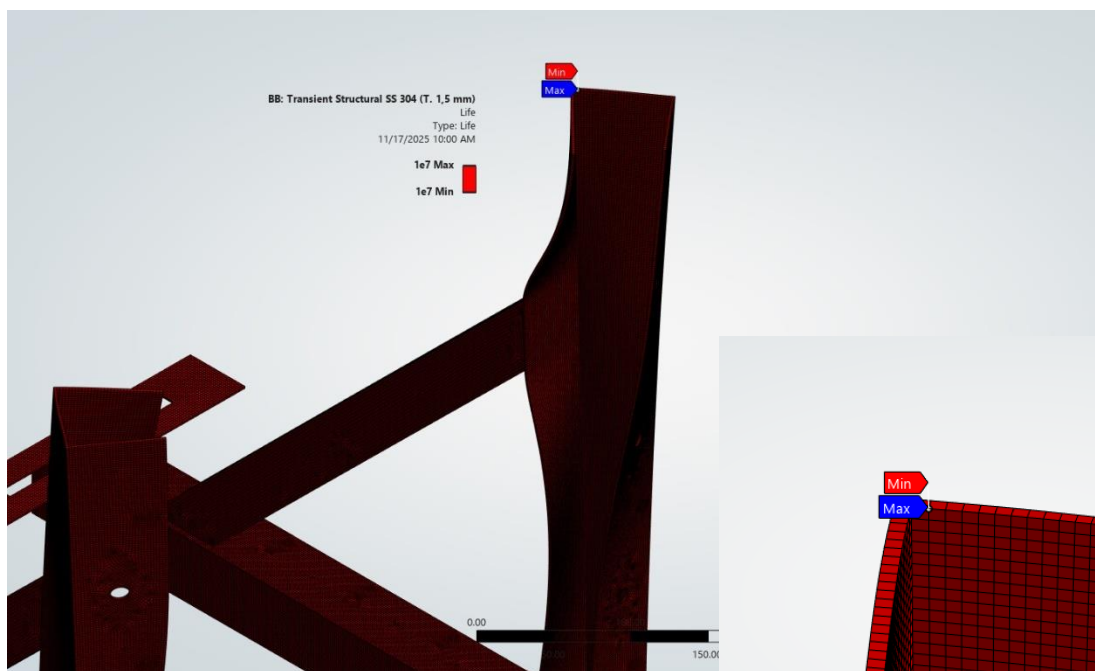


Gambar 4.24 *Equivalent Elastic Strain Max. SS 304 Dinamis*



Gambar 4.25 *Time Equivalent Elastic Strain Max. SS 304 Dinamis*

Gambar 4.24 dan Gambar 4.25 menunjukkan distribusi regangan elastis ekuivalen maksimum sebesar 0,00026 mm/mm pada waktu 0,04 detik pada material Stainless Steel 304. Daerah dengan regangan tertinggi berimpit dengan lokasi tegangan maksimum, namun nilainya masih berada dalam batas elastis material. Hal ini menandakan bahwa deformasi yang terjadi bersifat sementara dan dapat kembali ke bentuk semula setelah gaya dinamis berhenti bekerja.

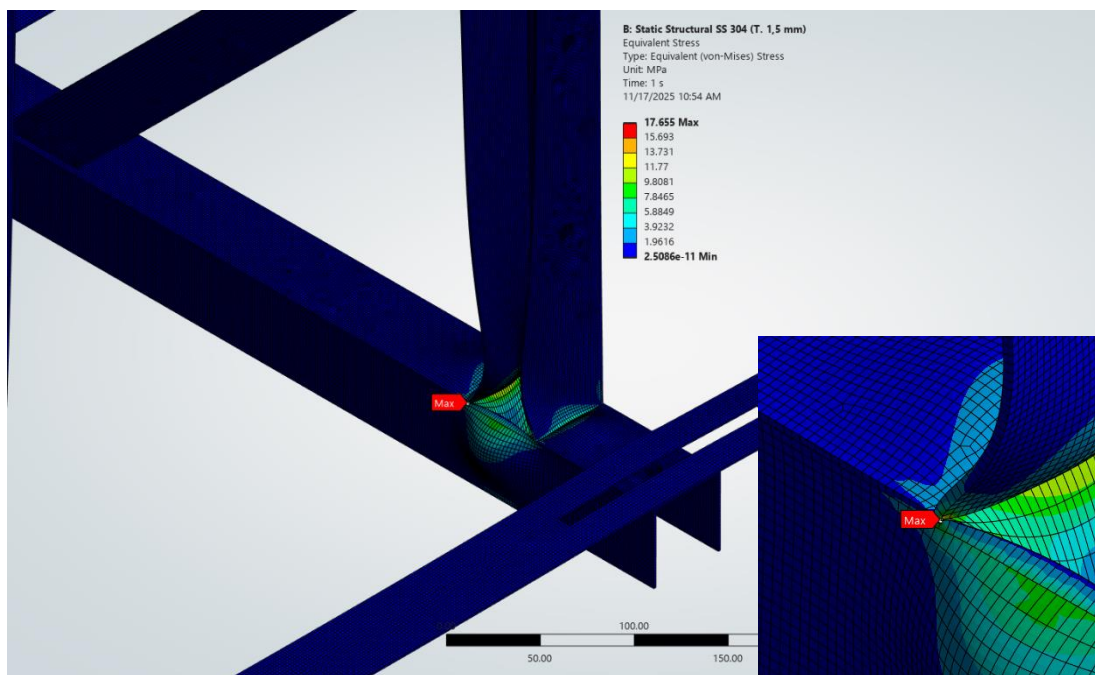


Gambar 4.26 *Fatigue Life* SS 304 Dinamis

Gambar 4.26 menunjukkan hasil analisis umur kelelahan (*fatigue life*) pada material Stainless Steel 304 kondisi pembebanan dinamis akibat gaya tembakan peluru. Dari hasil simulasi diperoleh nilai umur kelelahan maksimum mencapai 10.000.000 siklus (*cycles*), yang menunjukkan bahwa material memiliki ketahanan tinggi terhadap beban berulang berintensitas tinggi, serta mampu mempertahankan integritas strukturnya meskipun mengalami beban impak secara berulang.

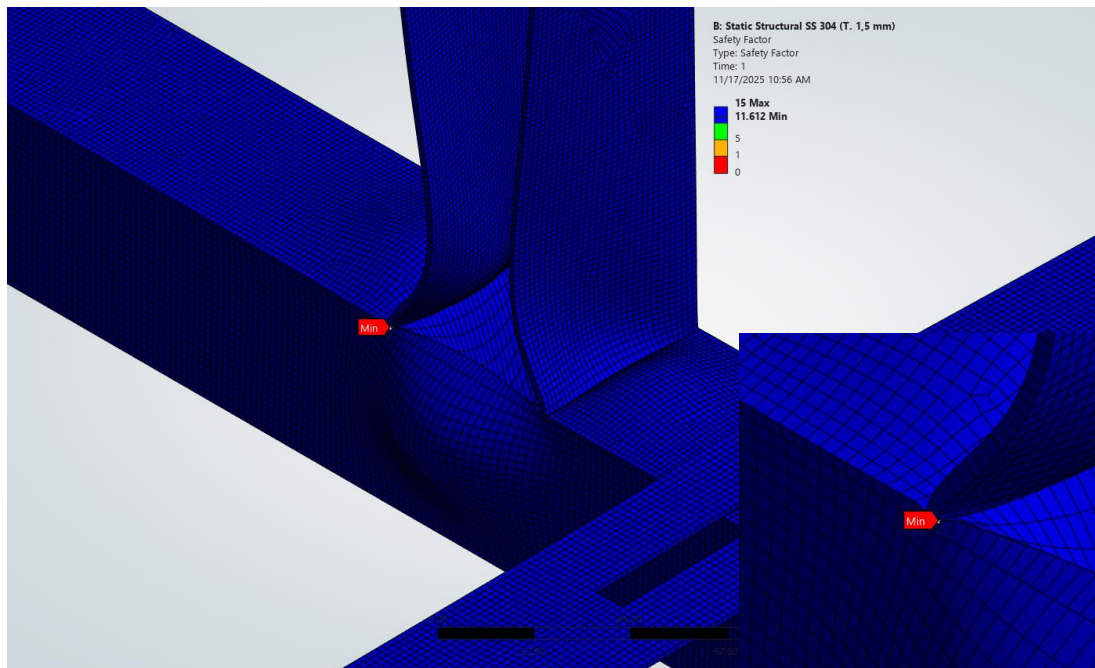
4.4.2 Tipe Statis SS 304

Hasil simulasi pada kondisi pembebanan statis ditampilkan berdasarkan jenis material yang digunakan pada *bracket*. Analisis dilakukan untuk mengetahui distribusi tegangan yang terjadi, serta respon struktur terhadap beban gravitasi kaca tahan peluru selama pengujian tembak berlangsung.



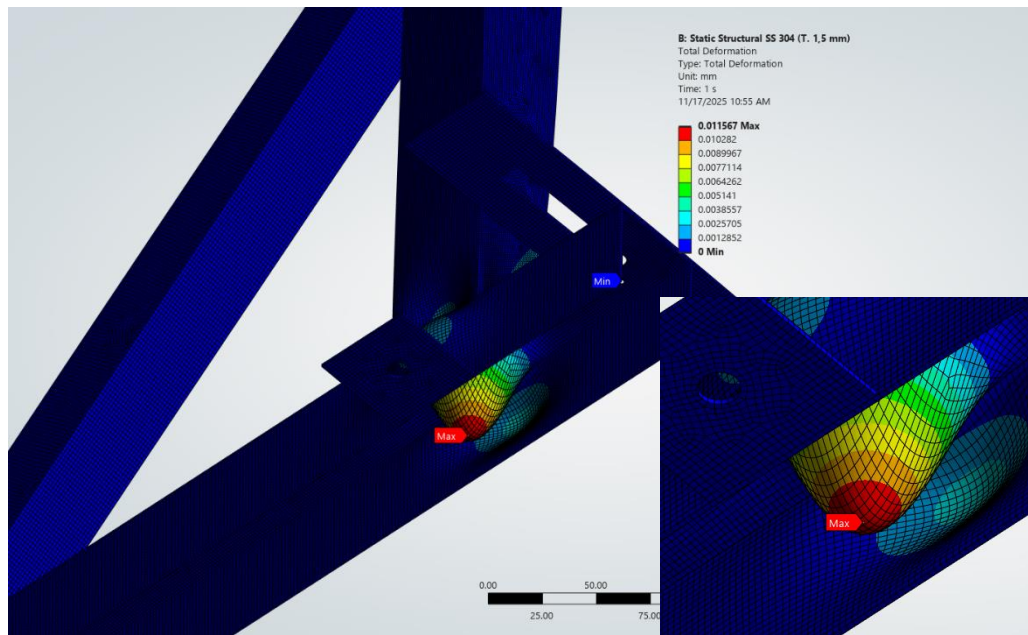
Gambar 4.27 *Equivalent Stress Max. SS 304 Statis*

Gambar 4.27 menunjukkan distribusi tegangan ekuivalen maksimum pada *bracket* berbahan Stainless Steel 304 dengan ukuran ketebalan 1,5 mm pada pembebanan statis. Nilai tegangan tertinggi sebesar 17,65 MPa terletak pada area sambungan antara penopang utama dan dudukan kaca, yang menjadi titik kritis terhadap potensi kegagalan struktur. Tegangan yang terjadi masih dibawah tegangan luluh material, sehingga sangat aman pada pembebanan statis.



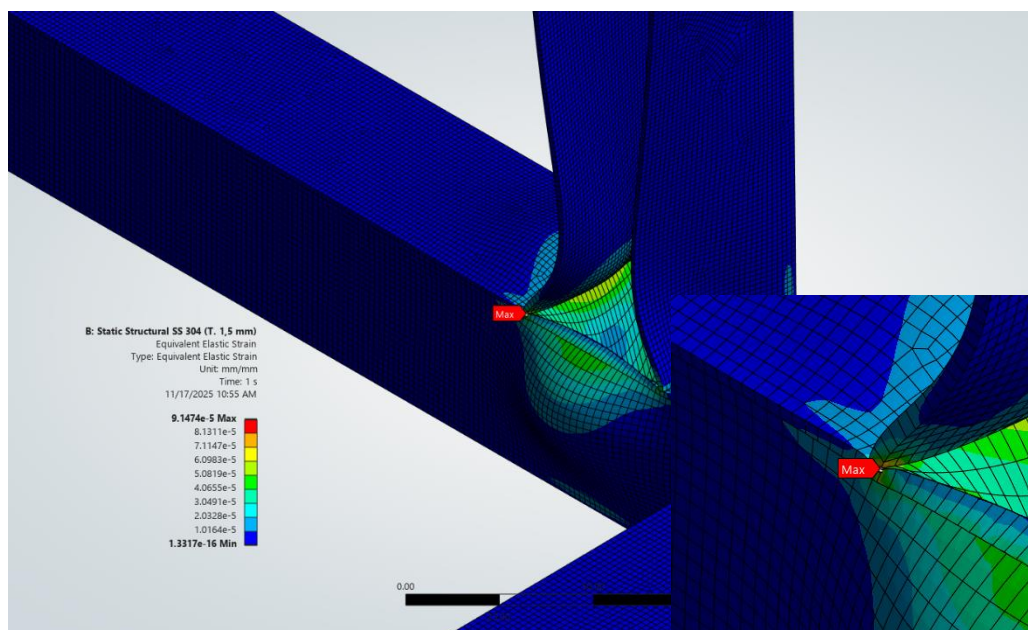
Gambar 4.28 *Safety factor* SS 304 Statis

Gambar 4.28 memperlihatkan distribusi nilai hasil simulasi faktor keamanan sebesar 11,61. Berdasarkan gambar tersebut, seluruh bagian *bracket* berada dalam kondisi aman karena nilai faktor keamanannya lebih besar dari batas minimum yang disyaratkan. Pada perangkat lunak numerik, nilai maksimum faktor keamanan dibatasi hingga 15. Adapun faktor keamanan yang digunakan sebagai acuan pada perangkat lunak numerik merupakan nilai minimum yang menggambarkan kondisi paling kritis dari struktur terhadap pembebanan yang terjadi.



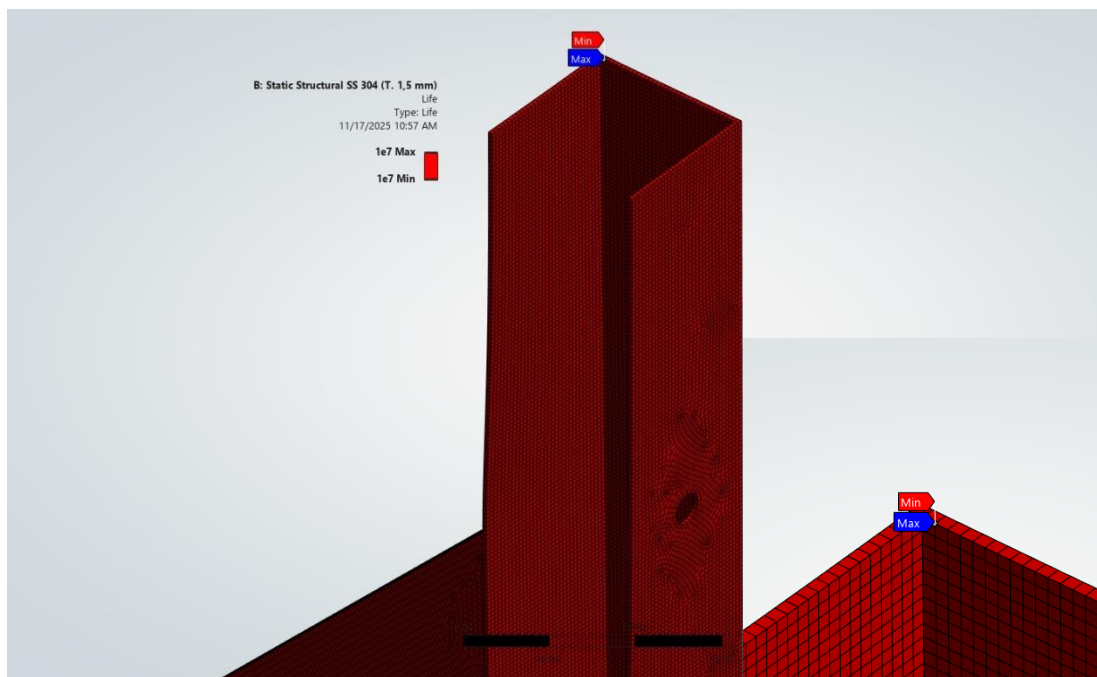
Gambar 4.29 *Total Deformation Max. SS 304 Statis*

Gambar 4.29 menampilkan deformasi total maksimum sebesar 0,0115 mm yang terjadi akibat beban gravitasi kaca tahan peluru. Deformasi ini bersifat elastis dengan nilai yang relatif kecil, sehingga tidak memengaruhi kestabilan keseluruhan.



Gambar 4.30 *Equivalent Elastic Strain Max. SS 304 Statis*

Gambar 4.30 menunjukkan distribusi regangan elastis ekuivalen maksimum sebesar 0,000091 mm/mm pada material Stainless Steel 304. Regangan tertinggi terjadi pada area yang sama dengan tegangan maksimum, namun masih berada dalam batas elastis material, menandakan bahwa *bracket* mampu menahan beban tanpa mengalami deformasi permanen.



Gambar 4.31 *Fatigue Life* SS 304 Statis

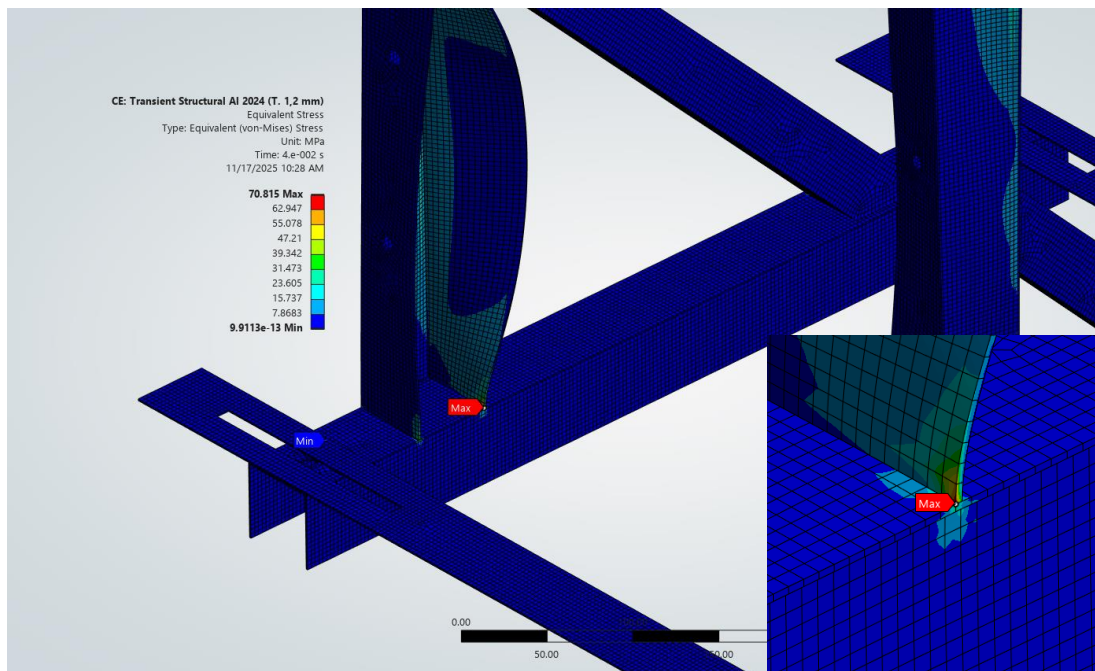
Gambar 4.31 menunjukkan hasil analisis umur kelelahan (*fatigue life*) pada material Stainless Steel 304 di bawah kondisi pembebanan statis akibat berat kaca tahan peluru yang bersifat konstan. Dari hasil simulasi diperoleh nilai umur kelelahan sebesar 10.000.000 siklus (*cycles*), yang mengindikasikan bahwa material memiliki ketahanan tinggi terhadap beban berulang sebelum mengalami kegagalan akibat kelelahan.

4.5 Hasil Simulasi Material Aluminium 2024

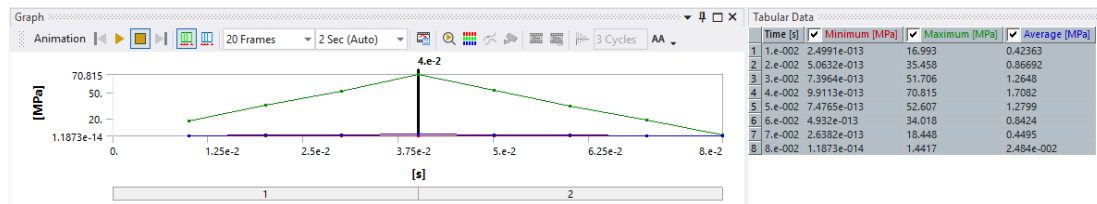
Material Aluminium 2024 digunakan pada *Bracket* dengan ukuran ketebalan sebesar 1,2 mm pada seluruh komponennya. Ketebalan yang seragam diterapkan pada setiap bagian *bracket* dengan tujuan mempermudah proses fabrikasi sekaligus mempertimbangkan efisiensi biaya pembelian material. Hasil simulasi FEA pada material Aluminium 2024 atau Geometri 2 ditunjukkan pada Gambar 4.11.

4.5.1 Tipe Dinamis Al 2024

Analisis pembebanan dinamis dilakukan pada *bracket* dengan beberapa variasi ketebalan material untuk memperoleh gambaran mengenai respon struktur terhadap beban yang bekerja. Kajian ini berfokus pada pola distribusi tegangan serta nilai faktor keamanan yang menggambarkan perilaku struktur akibat gaya tembakan yang mengenai kaca dan kemudian terpindahkan ke bagian *bracket*.

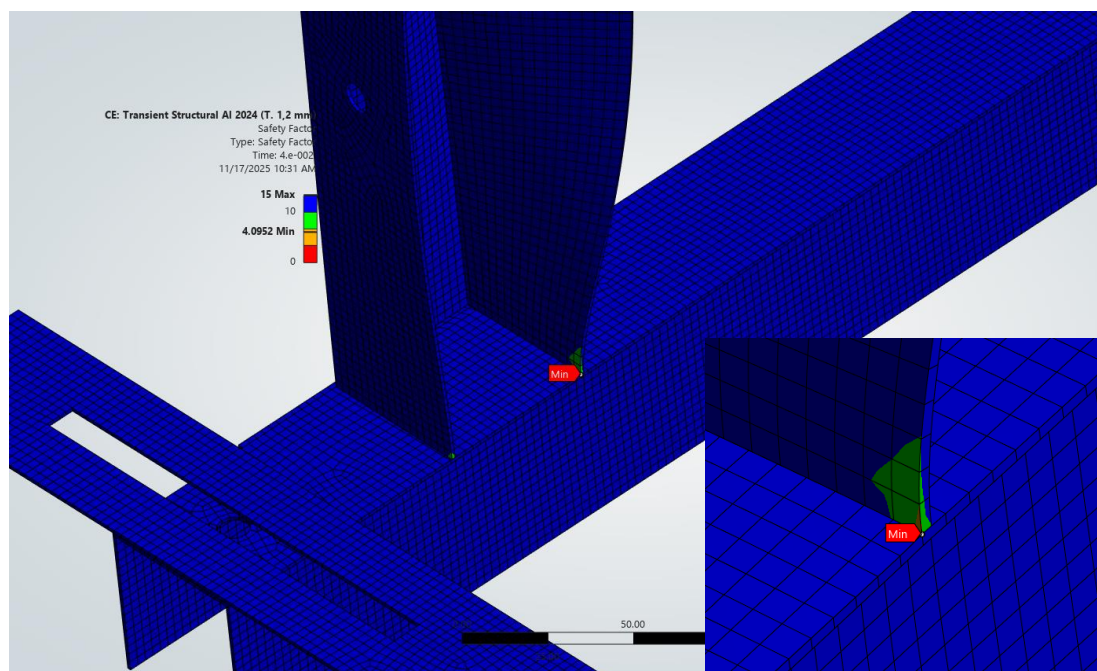


Gambar 4.32 *Equivalent Stress Max. Al 2024 Dinamis*

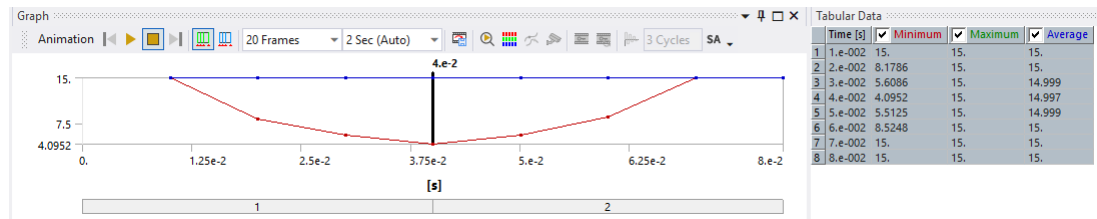


Gambar 4.33 *Time Equivalent Stress Max.* Al 2024 Dinamis

Gambar 4.32 dan Gambar 4.33 menampilkan hasil distribusi tegangan ekuivalen maksimum sebesar 70,81 MPa pada waktu 0,04 detik pada Aluminium 2024 dalam kondisi pembebanan dinamis. Tegangan tertinggi terletak pada area sambungan antara pelat utama dan lengan penahan, yang merupakan titik konsentrasi beban akibat gaya tumbukan. Nilai tegangan yang dihasilkan masih berada di bawah batas kekuatan luluh material, sehingga struktur tetap aman dari risiko kegagalan.

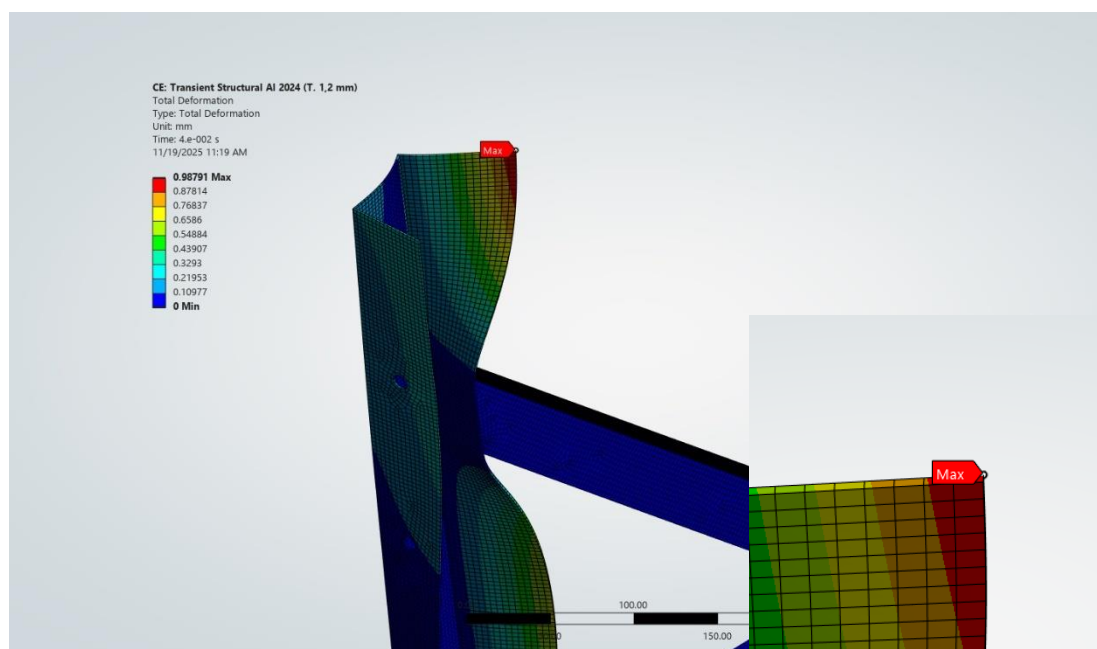


Gambar 4.34 *Safety factor* Al 2024 Dinamis

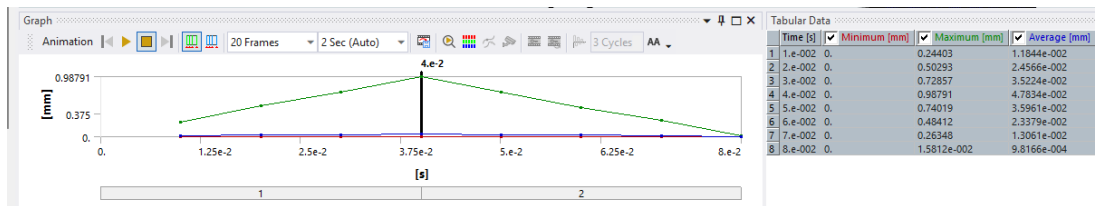


Gambar 4.35 *Time Safety factor* AI 2024 Dinamis

Gambar 4.34 dan Gambar 4.35 memperlihatkan sebaran nilai faktor keamanan sebesar 4,09 pada waktu 0,04 detik dari hasil simulasi dinamis. Seluruh area pada *bracket* menunjukkan nilai faktor keamanan di atas dan mendekati batas minimum yang ditetapkan sebesar 4, menandakan desain mampu menahan beban dinamis dengan baik. Adapun faktor keamanan yang digunakan sebagai acuan pada perangkat lunak numerik merupakan nilai minimum yang menggambarkan kondisi paling kritis.

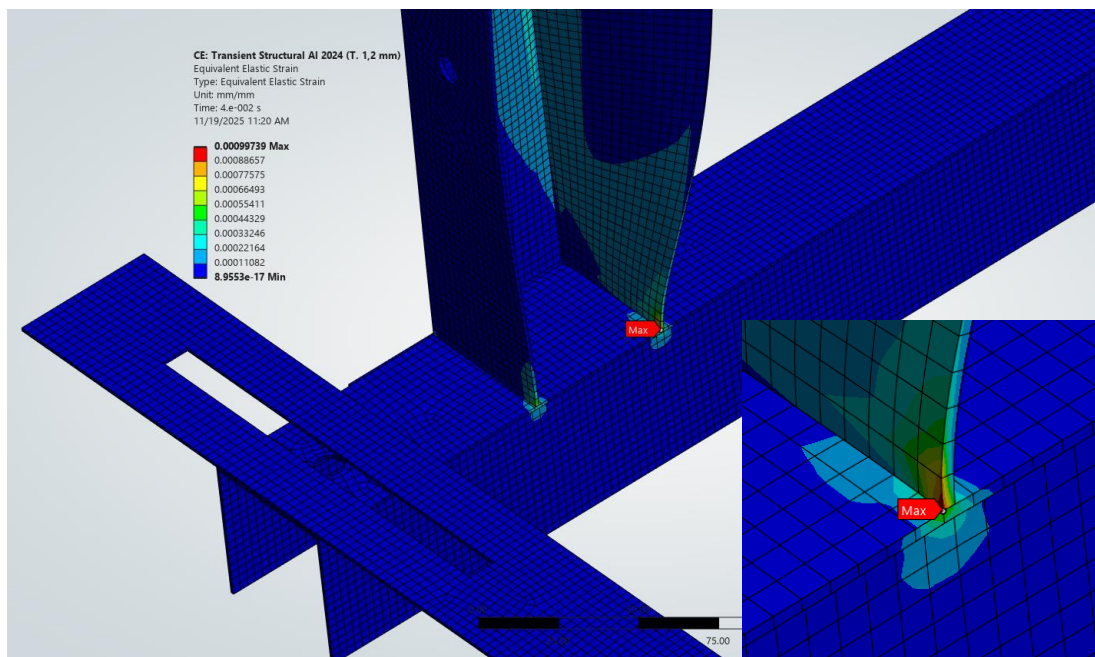


Gambar 4.36 *Total Deformation Max.* AI 2024 Dinamis

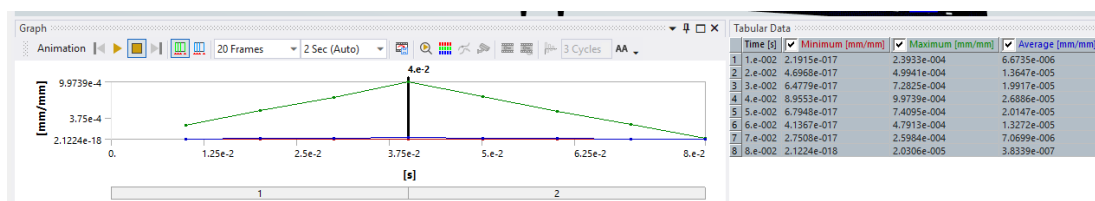


Gambar 4.37 Time *Total Deformation Max.* Al 2024 Dinamis

Gambar 4.36 dan Gambar 4.37 menunjukkan deformasi total maksimum sebesar 0,987 mm pada waktu 0,04 detik. Deformasi terbesar terletak di bagian ujung lengan *bracket* yang menerima gaya paling besar, namun deformasi masih tergolong kecil.

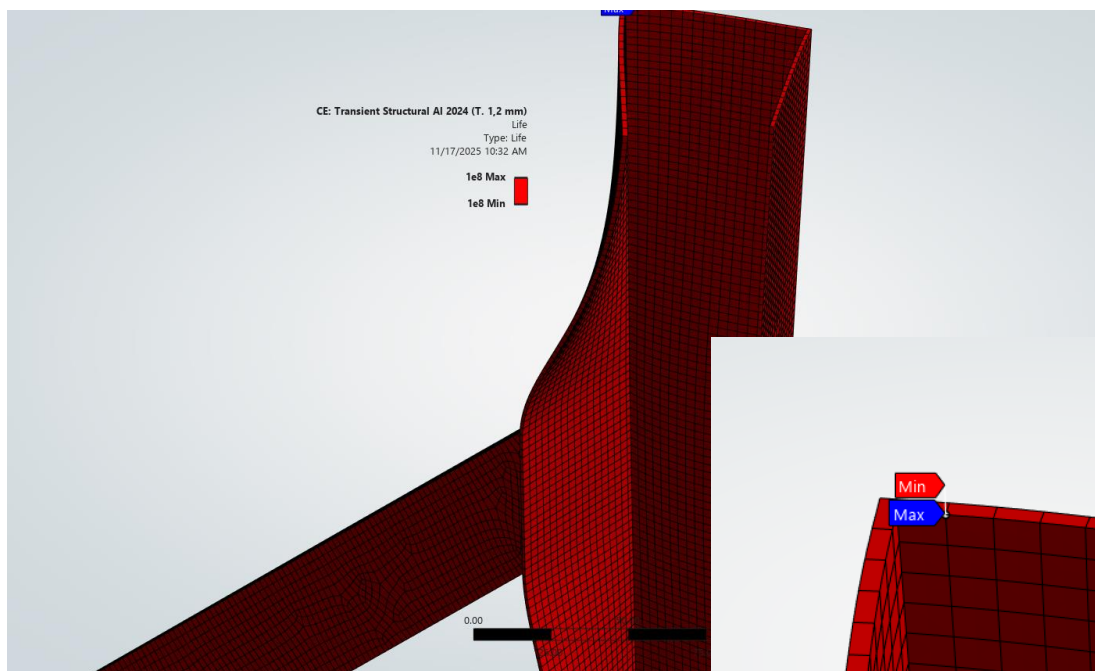


Gambar 4.38 *Equivalent Elastic Strain Max.* Al 2024 Dinamis



Gambar 4.39 Time *Equivalent Elastic Strain Max.* Al 2024 Dinamis

Gambar 4.38 dan Gambar 4.39 menggambarkan distribusi regangan elastis ekuivalen maksimum sebesar 0,00099 mm/mm pada waktu 0,04 detik pada material Aluminium 2024. Regangan tertinggi terjadi pada area dengan tegangan maksimum, tetapi nilainya tetap berada dalam batas elastisitas material. Hal ini menandakan bahwa deformasi yang muncul bersifat sementara dan struktur akan kembali ke bentuk semula setelah beban dinamis berhenti.

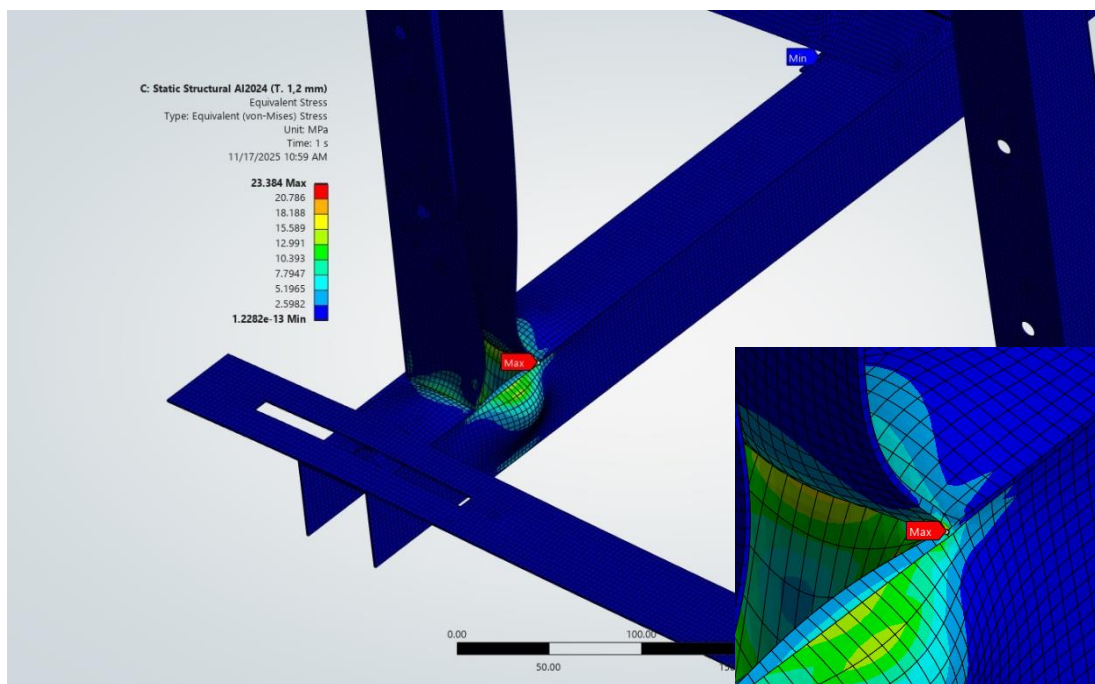


Gambar 4.40 *Fatigue Life* Al 2024 Dinamis

Gambar 4.40 menampilkan hasil analisis umur kelelahan (*fatigue life*) pada material Aluminium 2024 yang mengalami pembebanan dinamis akibat gaya tembakan. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh umur kelelahan maksimum mencapai 100.000.000 siklus (*cycles*), yang mengindikasikan kemampuan material untuk bertahan terhadap beban berulang dalam jangka panjang sebelum mengalami kegagalan akibat kelelahan.

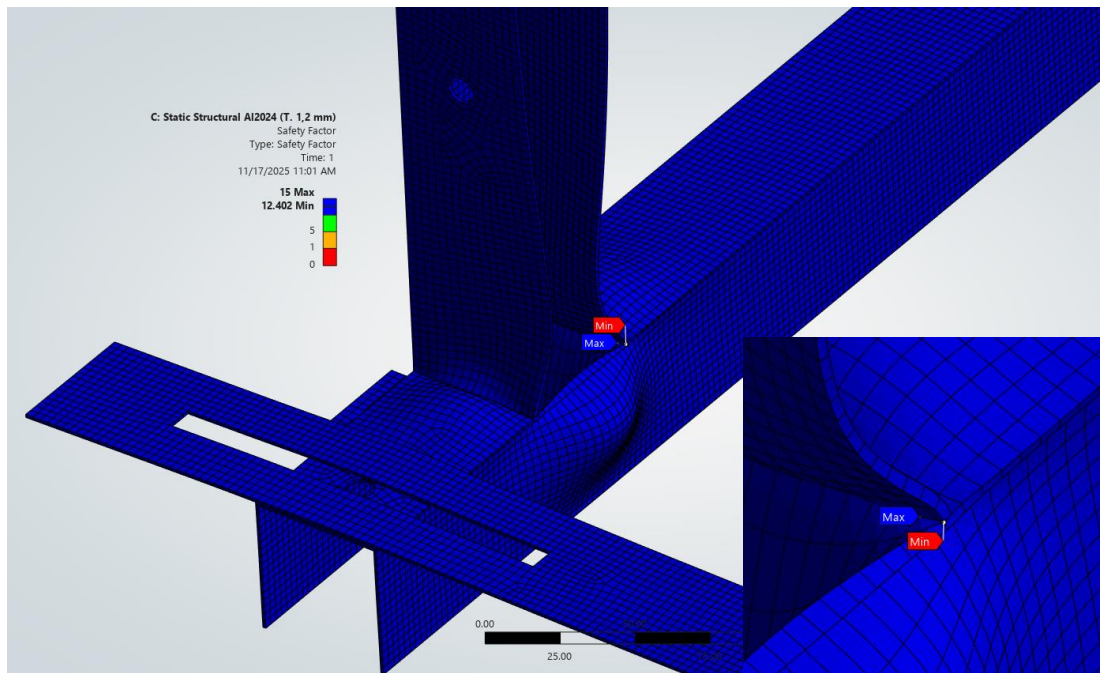
4.5.2 Tipe Statis Al 2024

Hasil simulasi pada kondisi pembebanan statis disajikan berdasarkan variasi material yang digunakan pada *bracket*. Analisis ini dilakukan untuk mengetahui distribusi tegangan yang timbul serta respon struktur terhadap beban gravitasi dari kaca tahan peluru.



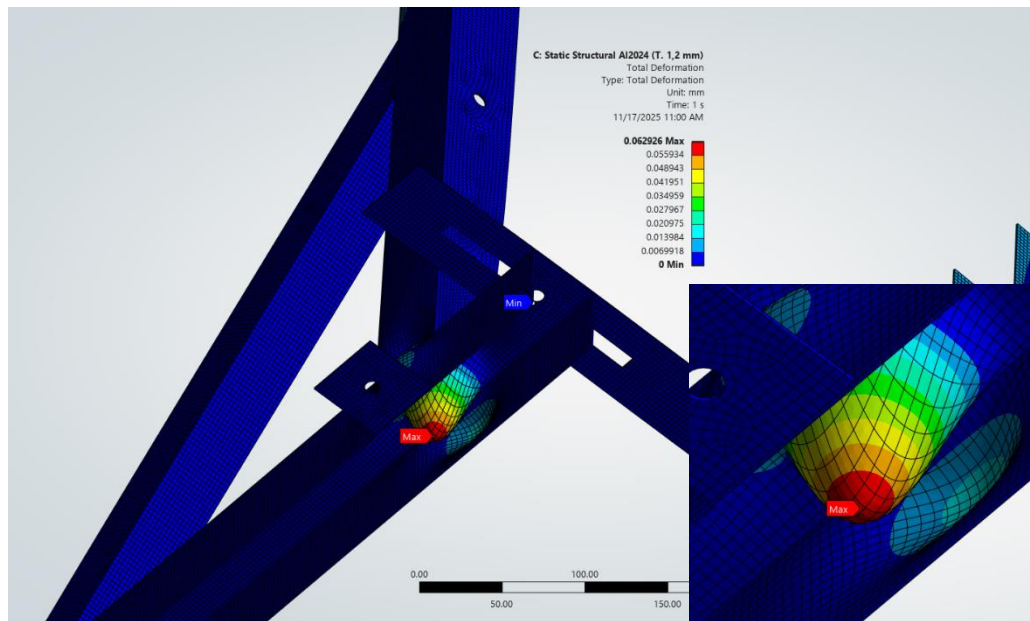
Gambar 4.41 *Equivalent Stress Max. Al 2024 Statis*

Gambar 4.41 menunjukkan distribusi tegangan ekuivalen maksimum yang terjadi sebesar 23,38 MPa pada *bracket* dengan material Aluminium 2024 dalam kondisi pembebanan statis. Nilai tegangan tertinggi muncul pada area sambungan seperti pada gambar di atas, namun masih berada di bawah batas kekuatan luluh material, sehingga tidak terjadi kegagalan.



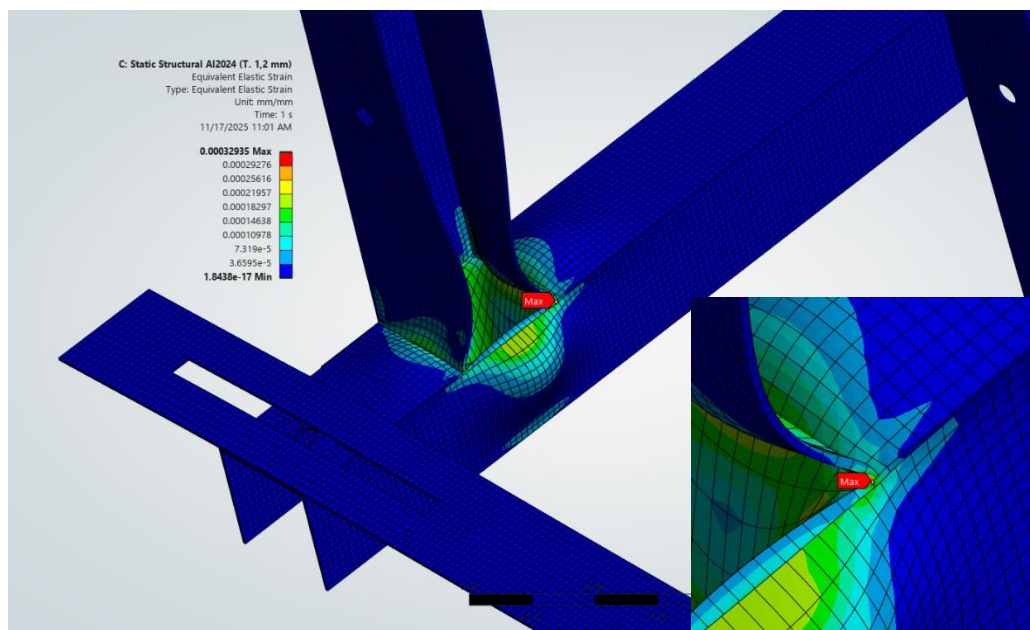
Gambar 4.42 *Safety factor* Al 2024 Statis

Gambar 4.42 memperlihatkan distribusi nilai faktor keamanan hasil simulasi. Berdasarkan gambar tersebut, seluruh bagian *bracket* berada dalam kondisi aman karena nilai faktor keamanannya lebih besar dari batas minimum yang disyaratkan sebesar 12,40. Pada perangkat lunak numerik, nilai maksimum faktor keamanan dibatasi hingga 15.



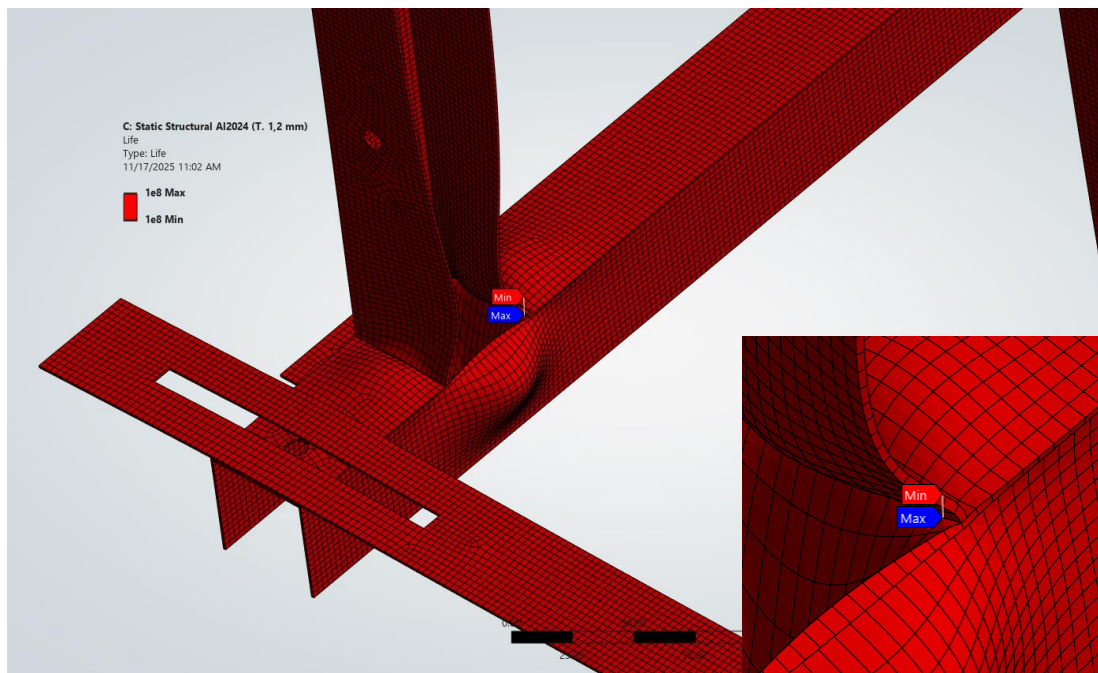
Gambar 4.43 *Total Deformation Max.* Al 2024 Statis

Gambar 4.43 menampilkan hasil deformasi total maksimum sebesar 0,0629 mm akibat pembebanan statis. Deformasi terbesar terjadi pada ujung lengan penahan, namun besarnya masih tergolong kecil dan tidak memengaruhi kestabilan keseluruhan.



Gambar 4.44 *Equivalent Elastic Strain Max.* Al 2024 Statis

Gambar 4.44 menunjukkan distribusi regangan elastis ekuivalen maksimum sebesar 0,00032 mm/mm pada *bracket* Aluminium 2024. Nilai regangan tertinggi berada pada area dengan tegangan terbesar, namun masih berada dalam batas elastis material, sehingga deformasi yang terjadi bersifat dapat kembali.



Gambar 4.45 *Fatigue Life* Al 2024 Statis

Gambar 4.45 menampilkan hasil analisis umur kelelahan (*fatigue life*) pada material Aluminium 2024 yang mengalami pembebanan statis akibat berat kaca tahan peluru secara konstan. Berdasarkan hasil simulasi diperoleh umur kelelahan maksimum mencapai 100.000.000 siklus (*cycles*), yang mengindikasikan kemampuan material untuk bertahan terhadap beban berulang dalam jangka panjang sebelum mengalami kegagalan akibat kelelahan.

4.6 Perbandingan Hasil Simulasi

Bagian ini menyajikan hasil perbandingan simulasi dinamis pada tiga jenis material yang digunakan pada *bracket*, yaitu Stainless Steel 304 dan Aluminium 2024. Perbandingan dilakukan untuk menilai perilaku struktural masing-masing material berdasarkan parameter utama meliputi tegangan ekuivalen, deformasi total, regangan elastis ekuivalen, nilai faktor keamanan, serta umur lelah (*fatigue life*) seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4. 3 dan Tabel 4. 4.

Tabel 4. 3 Perbandingan Hasil Simulasi Dinamis

Parameter	Material	
	SS 304 (Tebal 1,5 mm)	Al 2024 (Tebal 1,2 mm)
<i>Equivalent Stress</i> <i>Maximum (MPa)</i>	51,15	70,81
<i>Safety factor</i>	4	4,09
<i>Total Deformation</i> <i>Maximum (mm)</i>	0,212	0,987
<i>Equivalent Elastic Strain</i> <i>Maximum (mm/mm)</i>	0,00026	0,00099
<i>Fatigue Life (Cycles)</i>	10.000.000	100.000.000

Tabel 4. 4 Perbandingan Hasil Simulasi Statis

Parameter	Material	
	SS 304 (Tebal 1,5 mm)	Al 2024 (Tebal 1,2 mm)
<i>Equivalent Stress</i> <i>Maximum (MPa)</i>	17,65	23,38
<i>Safety factor</i>	11,61	12,4
<i>Total Deformation</i> <i>Maximum (mm)</i>	0,0115	0,0629
<i>Equivalent Elastic Strain</i> <i>Maximum (mm/mm)</i>	0,000091	0,00032
<i>Fatigue Life (Cycles)</i>	10.000.000	100.000.000

Berdasarkan hasil perbandingan simulasi dinamis dan statis, setiap material menunjukkan karakteristik struktural yang berbeda sesuai sifat mekanisnya. Aluminium 2024 tercatat memiliki tegangan ekuivalen tertinggi pada kedua simulasi, namun tetap menunjukkan performa terbaik dari sisi keamanan dan ketahanan terhadap kelelahan dengan umur lelah mencapai 100 juta siklus. Stainless Steel 304 menampilkan perilaku paling kaku dengan deformasi dan regangan paling rendah, sehingga mampu mempertahankan stabilitas bentuk meskipun menerima beban dinamis maupun statis. Kedua material memiliki faktor keamanan yang masih berada dalam batas yang ditetapkan sebesar 4, namun karakteristik kekuatan, kekakuan, dan fleksibilitasnya berbeda secara signifikan. Secara keseluruhan, Aluminium 2024 dapat dianggap memiliki kinerja paling optimal untuk ketahanan jangka panjang, serta Stainless Steel 304 unggul dalam kekakuan dan minim deformasi.