

BAB IV

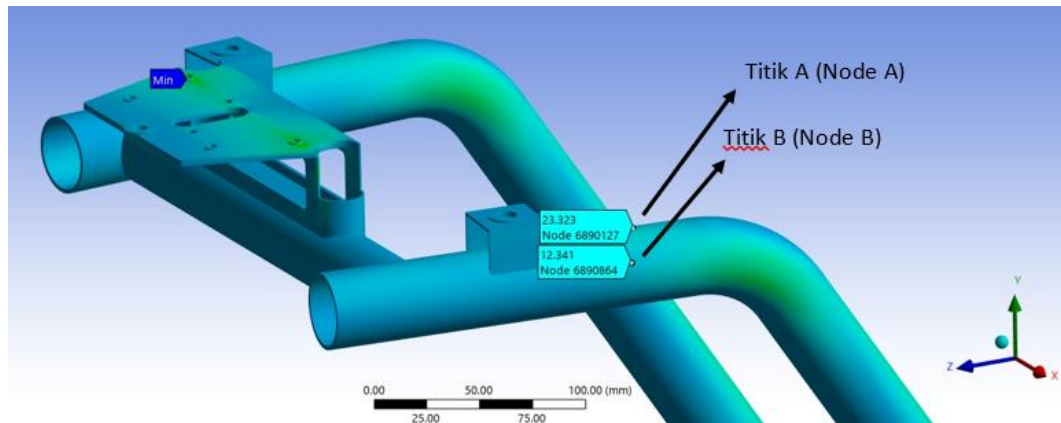
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Validasi Simulasi *Ansys Static Structural*

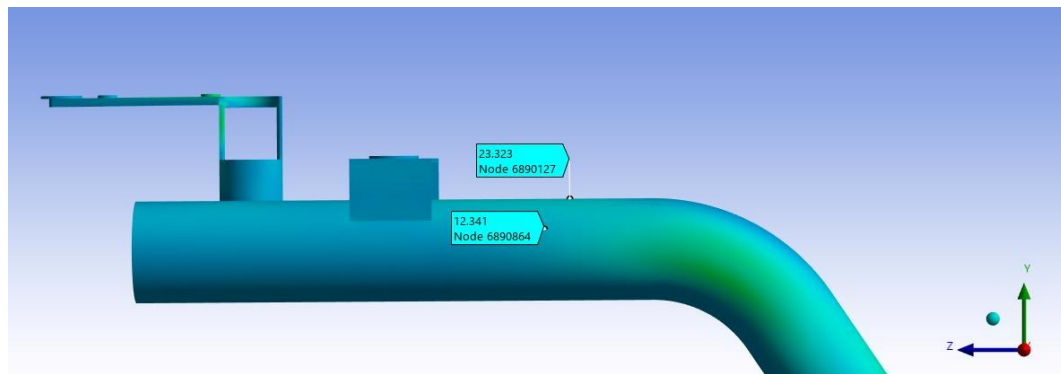
Validasi simulasi dilakukan agar hasil data yang didapatkan dari simulasi dapat diterima hasilnya secara aktual. Validasi dilakukan dengan membandingkan hasil perhitungan matematis *stress* pada rangka sepeda motor listrik dengan hasil simulasi yang dilakukan pada keadaan statik pada titik atau *node* yang dipilih, juga dilakukan dengan cara melihat kualitas *mesh* yang optimal dan *grid independent test*.

4.1.1 Perhitungan Matematis dan Nilai *Error*

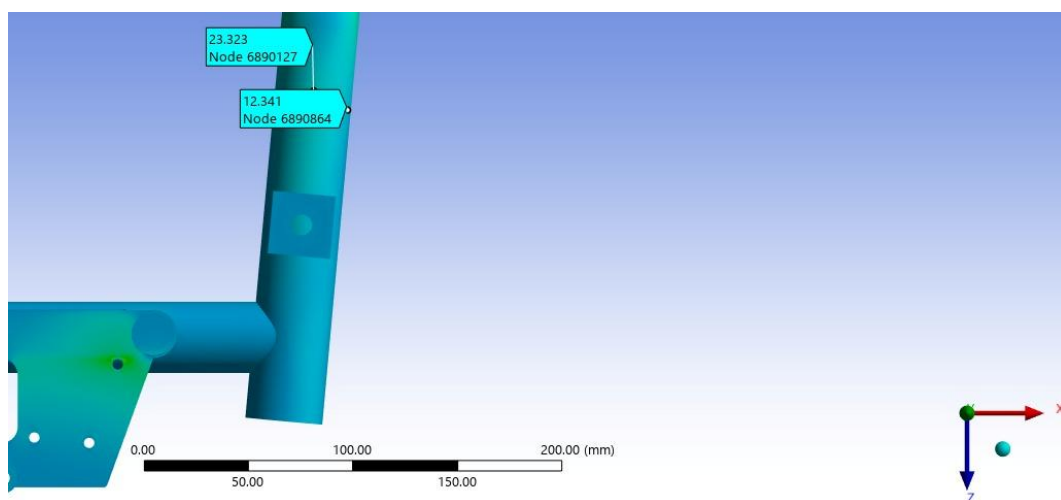
Gambar 4.1, Gambar 4.2 ,dan Gambar 4.3 menunjukkan letak dan hasil simulasi rangka sepeda motor listrik pada kondisi pembebanan tertentu. Pada simulasi tersebut ditandai dua titik penting, yaitu titik A (Node A) dan titik B (Node B), yang digunakan sebagai acuan untuk mengamati nilai hasil perhitungan tegangan. Perhitungan nilai tegangan ini sesuai dengan buku *mechanical of material* (Collins, S. P., Storrow, A., Liu, D., Jenkins, C. A., Miller, K. F., Kampe, C., & Butler, J.,2021). Penentuan kedua titik ini bertujuan untuk membandingkan hasil simulasi numerik dengan hasil analisis analitik, sehingga dapat memberikan validasi terhadap ketelitian metode simulasi yang digunakan baik pada kajian statis maupun dinamis.



Gambar 4. 1 Penentuan titik a (node A) dan titik b (node B)



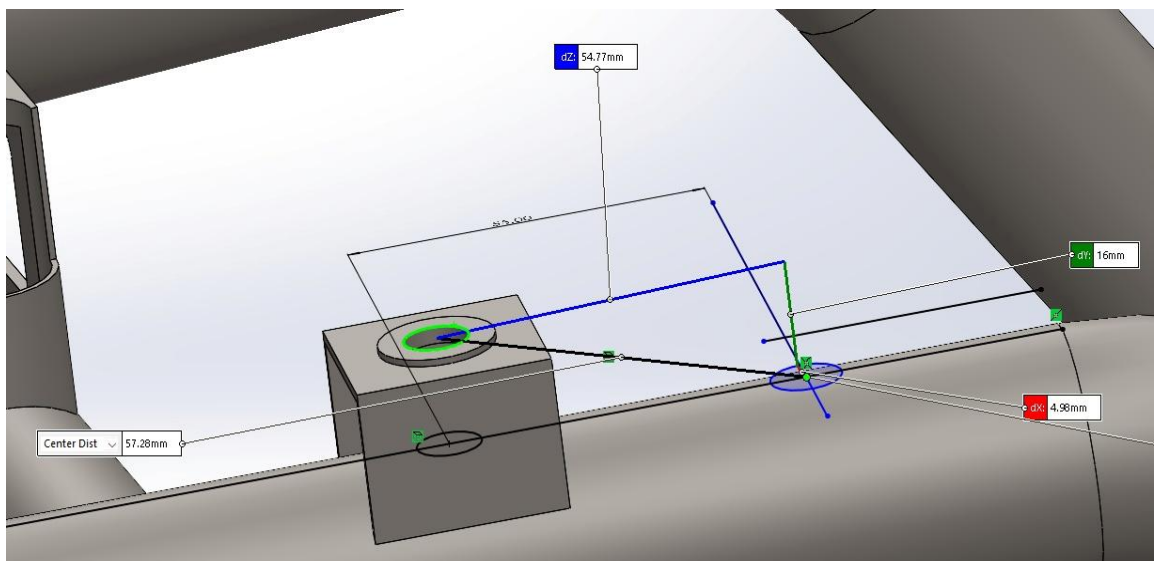
Gambar 4. 2 Node A dan node B



Gambar 4. 3 Letak node A dan node B

a) Titik A (Sumbu yz)

Gambar 4.4 memperlihatkan penentuan posisi titik A beserta panjang lengan yang diukur ke pusat gaya pada rangka sepeda motor listrik. Nilai panjang lengan yang diperoleh dari hasil pengukuran ini digunakan sebagai parameter penting dalam perhitungan analitik, khususnya dalam menentukan tegangan yang bekerja pada struktur rangka.



Gambar 4. 4 Jarak *node* A ke pusat gaya

Diketahui :

Hasil nilai tegangan *Von Mises* pada simulasi menunjukkan gambar 4.1 (*node* A) sebesar 23,32 Mpa.

$$m = 60 \text{ kg}$$

$$F = m \cdot g$$

$$= 60 \cdot 9,81$$

$$= 588,6 \text{ N}$$

$$D = 37 \text{ mm}$$

$$d = 33 \text{ mm}$$

$$l = 57,3 \text{ mm}$$

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

Jawaban :

Tegangan Geser

$$\sigma_z = 0$$

$$\tau_{yz} = \frac{T \cdot c}{I}$$

Dengan Inersia Polar

$$I = \frac{\pi}{4} (R^4 - r^4)$$

$$= \frac{\pi}{4} (18,5^4 - 16,5^4)$$

$$= 33766,775 \text{ mm}^4$$

$$\tau_{yz} = \frac{T \cdot c}{I}$$

$$= \frac{F \cdot l \cdot (\frac{D}{2})}{I}$$

$$= \frac{588,6 \cdot 57,3 \cdot (\frac{37}{2})}{\frac{\pi}{4} (18,5^4 - 16,5^4)}$$

$$= 18,5 \text{ Mpa}$$

Tegangan Normal

$$\sigma_y = \frac{(m \cdot l) \cdot c}{I}$$

$$= \frac{588,6 \cdot 57,3 \cdot (\frac{37}{2})}{\frac{\pi}{54} (37)^4}$$

$$= 6,7$$

$$= 7 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{\max, \min} = \frac{\sigma_y + \sigma_z}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{yz}^2}$$

$$= \frac{7 + 0}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{7 - 0}{2}\right)^2 + (18,5)^2}$$

$$\sigma_{\max} = 22,3 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{\min} = -15,3 \text{ Mpa}$$

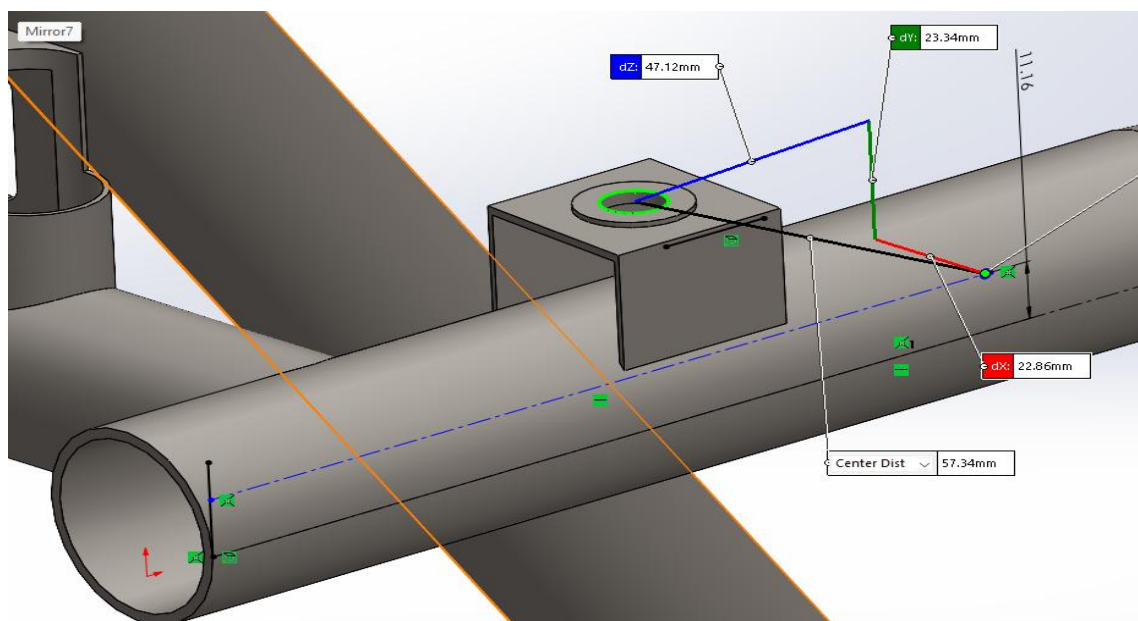
$$\% \text{ Error} = \frac{|H_{\text{simulasi}} - H_{\text{analitik}}|}{H_{\text{analitik}}} \cdot 100$$

$$= \frac{|23,3 - 22,3|}{22,3} \cdot 100$$

$$= 4,4 \%$$

b) Titik B (Sumbu xy)

Pada gambar 4.5 menampilkan posisi titik B dengan ukuran panjang lengan yang ditarik dari pusat titik ke pusat gaya. Panjang lengan di titik ini menjadi salah satu parameter penting untuk mengetahui besarnya tegangan yang bekerja akibat gaya yang diterapkan



Gambar 4. 5 Jarak *node* B ke pusat gaya

Diketahui :

Hasil nilai tegangan *Von Mises* pada simulasi menunjukkan gambar 4.1 (node B) sebesar 12,34 Mpa.

$$m = 60 \text{ kg}$$

$$F = m \cdot g$$

$$= 60 \cdot 9,81$$

$$= 588,6 \text{ N}$$

$$D = 37 \text{ mm}$$

$$d = 33 \text{ mm}$$

$$l = 57,34 \text{ mm}$$

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

Tegangan Geser

$$\tau_{yx} = \frac{F}{A}$$

$$\tau_{yz} = \frac{m \cdot g}{\frac{\pi}{4} (D^2 - d^2)}$$

$$= \frac{588,6}{\frac{\pi}{4} (37^2 - 33^2)}$$

$$= \frac{588,6}{219,8}$$

$$= 2,67 \text{ Mpa}$$

Tegangan Normal

$$\begin{aligned}\sigma_y &= \frac{(m \cdot l) \cdot c}{I} \\ &= \frac{588,6 \cdot 57,34 \cdot 11,16}{\frac{\pi}{4} (R^4 - r^4)} \\ &= \frac{588,6 \cdot 57,34 \cdot 11,16}{\frac{\pi}{4} (18,5^4 - 16,5^4)} \\ &= 11.154 \text{ MPa}\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\sigma_{\max, \min} &= \frac{\sigma_y + \sigma_z}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_y - \sigma_z}{2}\right)^2 + \tau_{yz}^2} \\ &= \frac{11,154 + 0}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{11,154 - 0}{2}\right)^2 + (2,67)^2}\end{aligned}$$

$$\sigma_{\max} = 11,76 \text{ Mpa}$$

$$\sigma_{\max} = -0.606 \text{ Mpa}$$

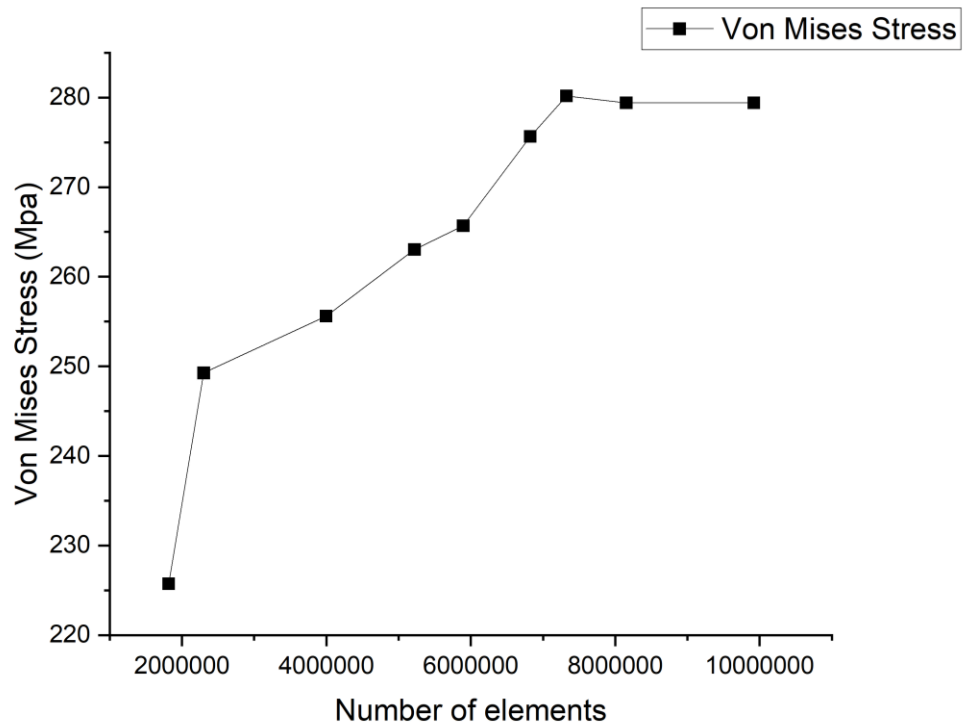
$$\begin{aligned}\% \text{ Error} &= \frac{|H_{\text{simulasi}} - H_{\text{analitik}}|}{H_{\text{analitik}}} \cdot 100 \\ &= \frac{|12,341 - 11,76|}{11,76} \cdot 100 \\ &= 4,94 \%\end{aligned}$$

4.1.2 Uji *Grid Independence* dan *Skewness*

Pada kondisi *boundary condition* yang disimulasikan di *Ansys Static Structural* dilakukan uji *mesh* dan *grid independence test* terhadap *mesh* agar mendapatkan data yang mendekati kondisi asli. Uji *Grid Independence* dilakukan dengan memvariasikan *element size* dan mendapatkan jumlah *element* secara global yang ditunjukkan pada tabel 4.1.

Tabel 4. 1 Uji *Grid Independence*

No	Elements (mm)	Number of elements	Von.mises Stress (Mpa)
1.	1,11	9.919.442	279,4
2.	1,2	8.152.447	279,4
3.	1,22	7.324.593	280,19
4.	1,24	6.962.895	279,13
5.	1,25	6.822.395	275,65
6.	1,41	5.219.369	263,03
7.	1,51	3.996.632	255,6
8.	1,8	2.302.140	249,26
9.	1,95	1.815.772	225,73

**Gambar 4. 6** Grafik nilai *deformation* dan *safety factor* terhadap jumlah *element* pada simulasi

Tabel 4.1 dan gambar 4. 6 merupakan hasil uji *grid independence* dengan menggunakan variasi *element size* menunjukkan hasil *output* yang tidak terlalu signifikan artinya hal tersebut sudah menggambarkan hasil yang sudah tidak bergantung pada jumlah *element*.

Tabel 4. 2 Uji kualitas *skewness* pada kondisi statik

No.	Number of Element	Skewness	Von Mises Stress (Mpa)
1	9.919.442	0,87	279,4
2	8.152.447	0,887	279,4
3	7.324.593	0,923	280,19
4	6.962.895	0,904	279,13
5	6.822.395	0,966	275,65
6	5.219.369	0,996	263,03
7	3.996.632	0,99	255,6
8	2.302.140	0,98	249,26
9	1.815.772	0,87	225,73

Tabel 4.2 menunjukkan hasil *skewness* yang telah dilakukan pada simulasi statis, jika dilihat dari kualitas *mesh* yang optimal maka *element size* yang digunakan yaitu sebesar 1,2 mm.

4.2 Simulasi Rangka Sepeda Motor Listrik Menggunakan *Ansys Static Structural*

Beban diberikan oleh pengendara pada kondisi statik yang akan digunakan untuk gaya input yang bekerja untuk mengetahui dampaknya pada rangka, dampak tersebut dapat dilihat dengan menggunakan parameter *max equivalent stress* pada metode *finite element analysis* (FEA) pada *ansys static structural*.

4.2.1 Simulasi dengan Pembebanan Driver dengan beban sekitar 80 kg

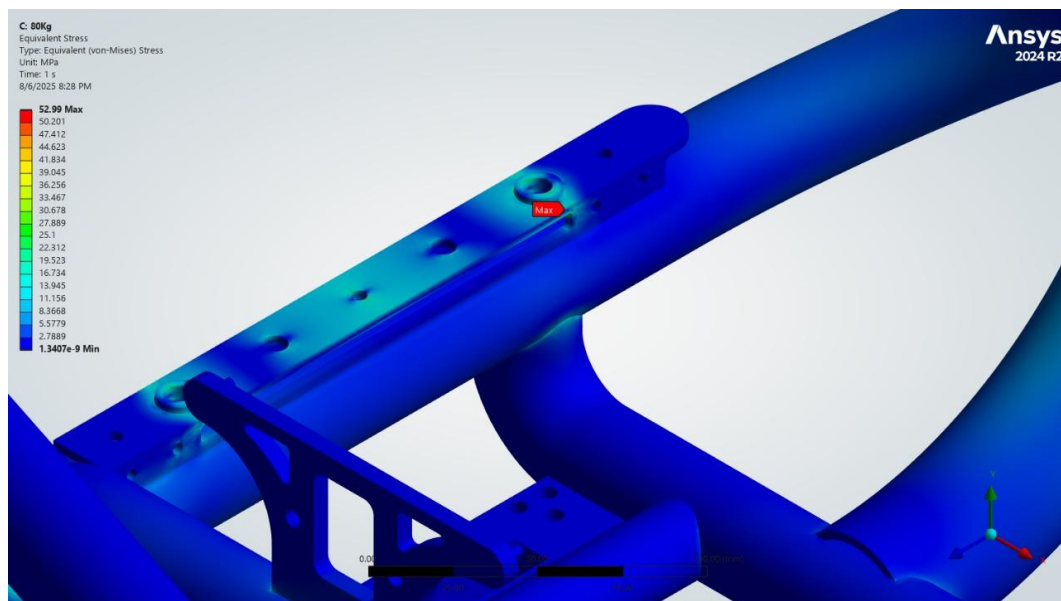
Simulasi pembebanan statik dilakukan dengan beban sebesar 80 kg (784.8 N) diaplikasikan pada beberapa titik distribusi pembebanan. Jenis tegangan yang dianalisis adalah tegangan *ekuivalen* (*von mises*), yang umum digunakan untuk mengevaluasi kekuatan struktur terhadap pembebanan kompleks.

Gambar 4.7 dan gambar 4.8 menunjukkan distribusi tegangan pada struktur, dengan nilai maksimum tegangan terjadi di sekitar area sambungan baut (ditandai

dengan warna merah), yaitu sebesar 52,99 MPa. Daerah ini menjadi titik kritis yang berpotensi mengalami konsentrasi tegangan akibat geometri sambungan dan distribusi gaya.

Rentang tegangan tersebar dari 0,000013407 MPa (minimum) hingga 52,99 MPa (maksimum). Mayoritas struktur menunjukkan nilai tegangan yang rendah (ditunjukkan dengan warna biru hingga hijau), yang mengindikasikan bahwa bagian tersebut relatif aman terhadap pembebanan.

Berdasarkan hasil simulasi ini, dapat disimpulkan bahwa struktur mampu menahan pembebanan sebesar 80 kg, namun perhatian khusus perlu diberikan pada area dengan tegangan maksimum untuk memastikan tidak terjadi kegagalan material, terutama jika digunakan dalam kondisi dinamis atau beban berulang.



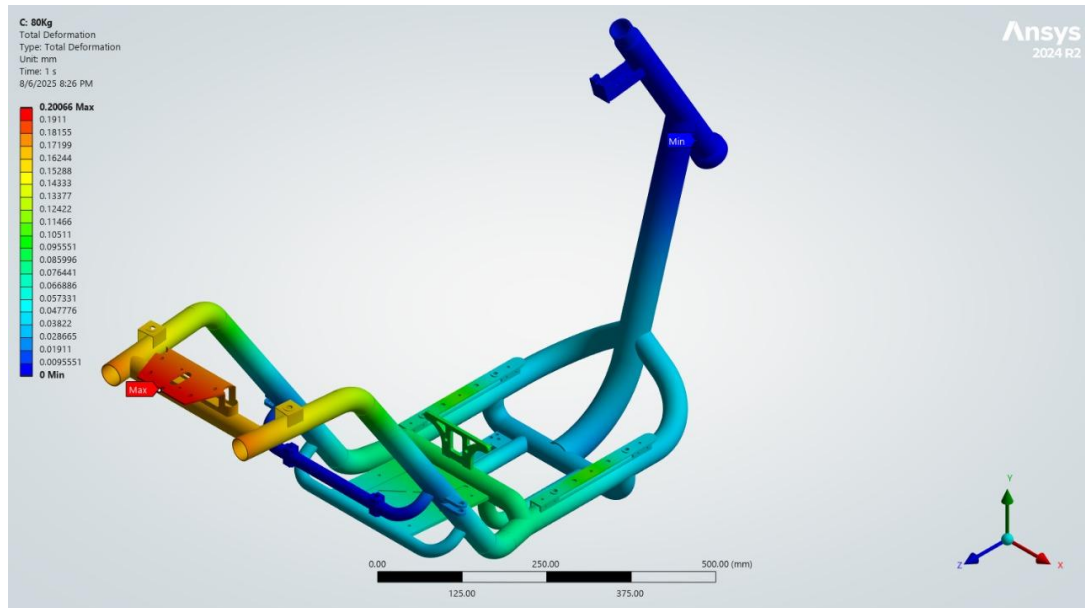
Gambar 4. 7 *Equivalent (von mises) max* di pembebanan 80 kg

Nilai maksimum deformasi terjadi pada bagian belakang rangka yang ditunjukkan pada gambar 4.8 (ditandai warna merah) sebesar 0,20066 mm, sedangkan deformasi minimum berada pada bagian depan stang kemudi (ditandai warna biru) dengan nilai mendekati nol (0 mm).

Distribusi warna menunjukkan bahwa mayoritas bagian struktur mengalami perubahan yang kecil (didominasi warna hijau dan biru), yang mengindikasikan bahwa struktur tetap berada dalam batas elastis dan tidak mengalami deformasi permanen. Hasil ini menunjukkan bahwa struktur masih cukup kaku dan aman terhadap pembebanan statik sebesar 80 kg, dengan deformasi yang sangat kecil dan masih dapat diterima untuk aplikasi fungsional normal.

Beban yang ditempatkan di jok pengemudi tidak berhenti hanya di titik aplikasinya (sesuai dengan *boundary condition*). Beban tersebut ditransfer ke seluruh struktur rangka, terutama ke bagian belakang yang terhubung langsung dengan jok pengemudi. Karena bagian belakang relatif lebih panjang dan kakuannya lebih rendah, beban yang ditransfer bisa memicu deformasi lebih besar dibagian jok penumpang.

Rangka bagian belakang (jok penumpang) bekerja seperti kantilever yang menjorok dari titik dudukan utama. Meski tidak diberi beban langsung, jok belakang tetap menerima gaya internal berupa momen lentur dan geser akibat beban di depan (jok pengemudi). Itulah sebabnya defleksi bisa lebih besar di ujung belakang meskipun gaya eksternal tidak diaplikasikan di sana. Bagian jok driver biasanya diperkuat (ada *cross member*, sambungan dengan pipa utama), sedangkan bagian jok penumpang relatif lebih tipis/panjang tanpa pengaku tambahan. Kondisi ini membuat *stiffness* lebih rendah di jok belakang, sehingga deformasi maksimum berpindah ke sana.



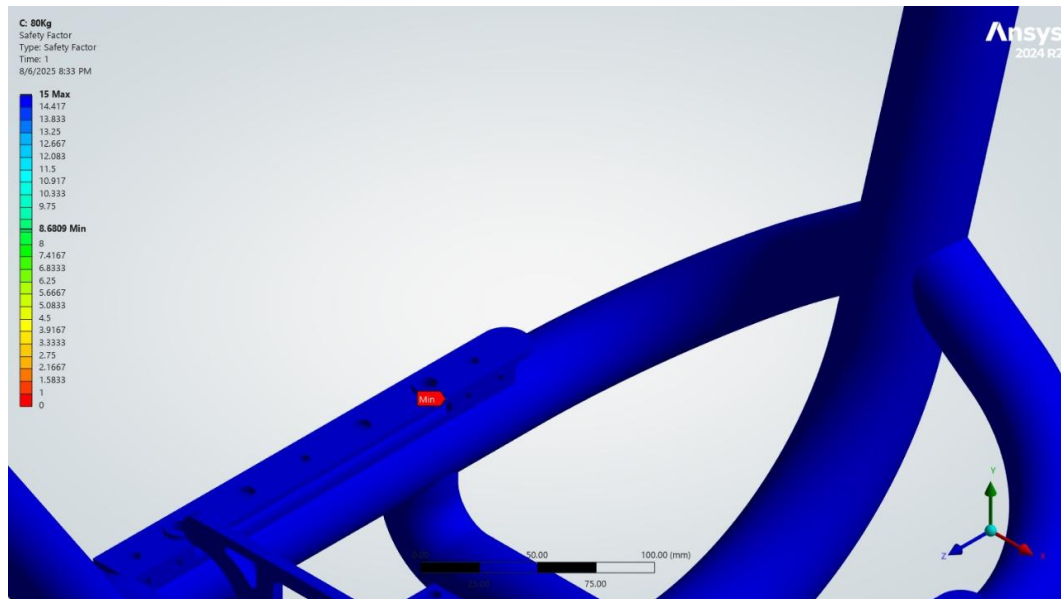
Gambar 4. 8 Total *deformasi* pembebanan 80 kg

Simulasi juga bertujuan untuk menganalisis faktor keamanan (*safety factor*) dari struktur rangka ketika dibebani secara statik sebesar 80 kg ($\pm 784,8$ N). Faktor keamanan dihitung berdasarkan perbandingan antara tegangan ijin material dengan tegangan ekuivalen (*von-Mises*) yang terjadi akibat beban.

Hasil simulasi pada gambar 4.9 menunjukkan bahwa nilai faktor keamanan minimum terjadi pada area plat *footstep driver* dengan nilai sebesar 8,66, yang ditandai dengan warna merah. Sementara itu, nilai maksimum faktor keamanan mencapai 15, yang menunjukkan bahwa bagian tersebut berada jauh dari batas kegagalan material.

Distribusi faktor keamanan secara umum menunjukkan bahwa seluruh struktur berada dalam kondisi aman, karena semua nilai berada jauh di atas batas aman minimum (nilainya sekitar 1,5–3) untuk struktur statik. Nilai minimum 8,66 menunjukkan bahwa tegangan yang bekerja masih jauh lebih kecil dibandingkan kekuatan material.

Dengan demikian, struktur ini memiliki cadangan kekuatan yang sangat besar terhadap beban 80 kg dan dinilai sangat aman untuk penggunaan normal. Namun, tetap disarankan untuk memperhatikan daerah kritis dengan nilai minimum *safety factor*; terutama jika struktur digunakan dalam kondisi dinamis, getaran, atau beban kejut.



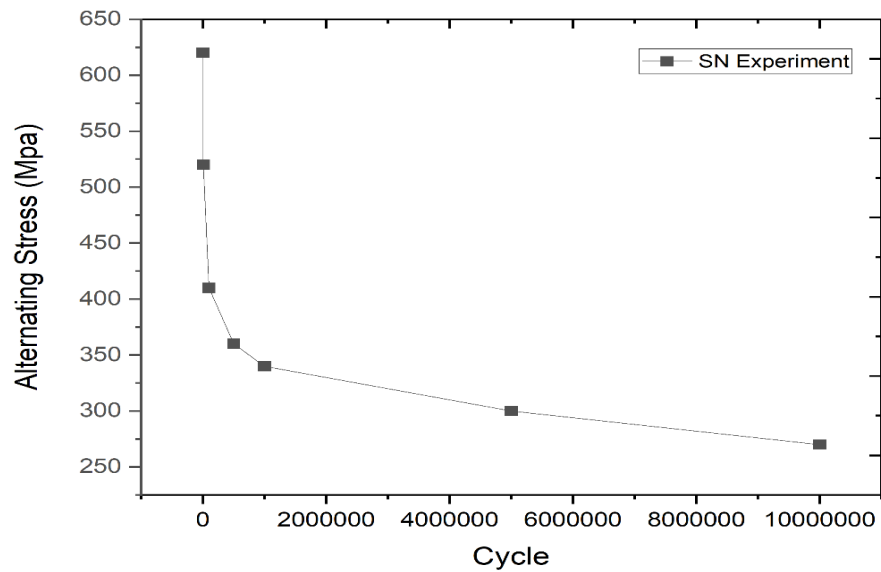
Gambar 4. 9 *Safety factor min* di pembebanan 80 kg

Tabel 4. 3 Hasil data simulasi statis rangka sepeda motor listrik

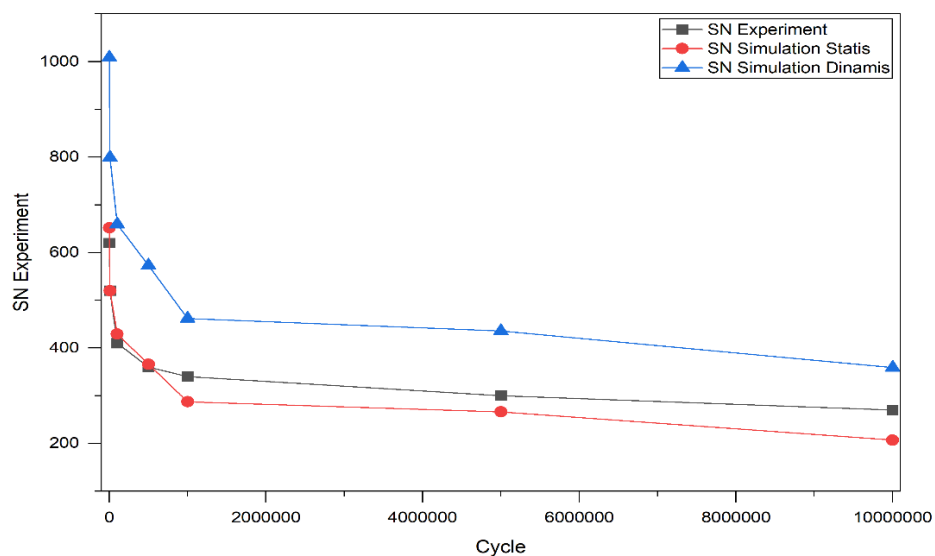
Total Massa (Kg)	Skewness	Von Mises Stress Max (Mpa)	Von Mises Stress Min (Mpa)	Deformation Max (mm)	Deformation Min (mm)	Alternating Stress Max (Mpa)	Life Max	Life Min	Safety Factor Min	Safety Factor Max
80	0,87	52,99	0,000013407	0,20066	0	26,55	1.e+007	1.e+007	8,6809	15

4.3 Mechanical Fatigue

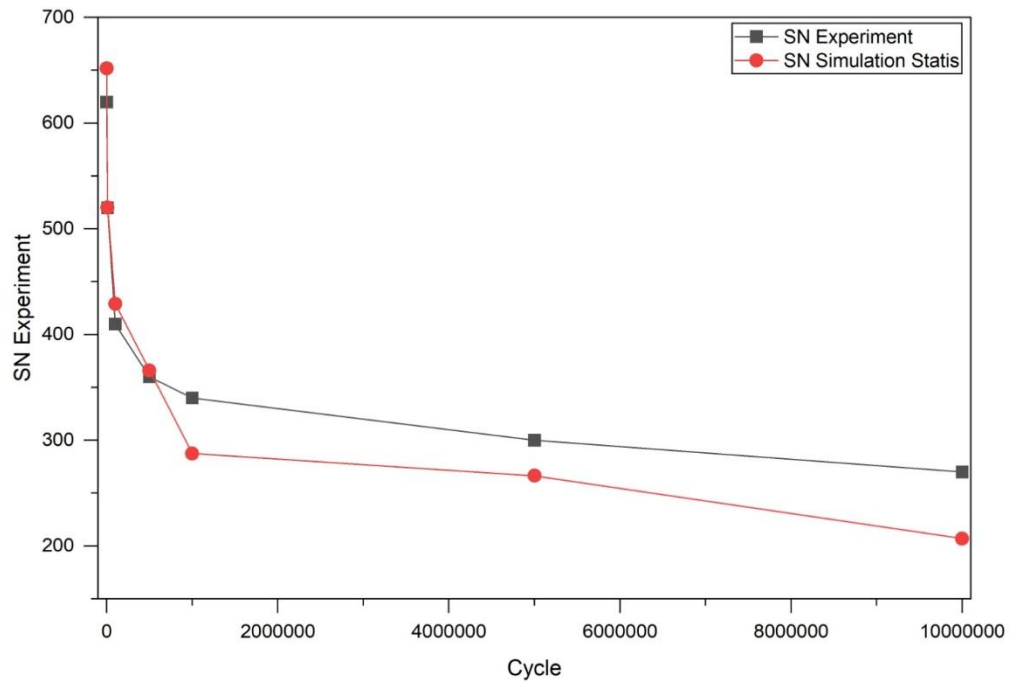
Pembebanan yang terjadi secara berkala dan berulang-ulang pada rangka sepeda motor listrik sebesar 180 kg tersebut dapat menyebabkan *mechanical fatigue* pada rangka. Berdasarkan hasil tes *fatigue* pada baja AISI 4130 yang telah dilakukan pada studi kasus, didapatkan literatur yang membahas tentang grafik *S-N Curve* Baja AISI 4130 pada gambar 4.10.



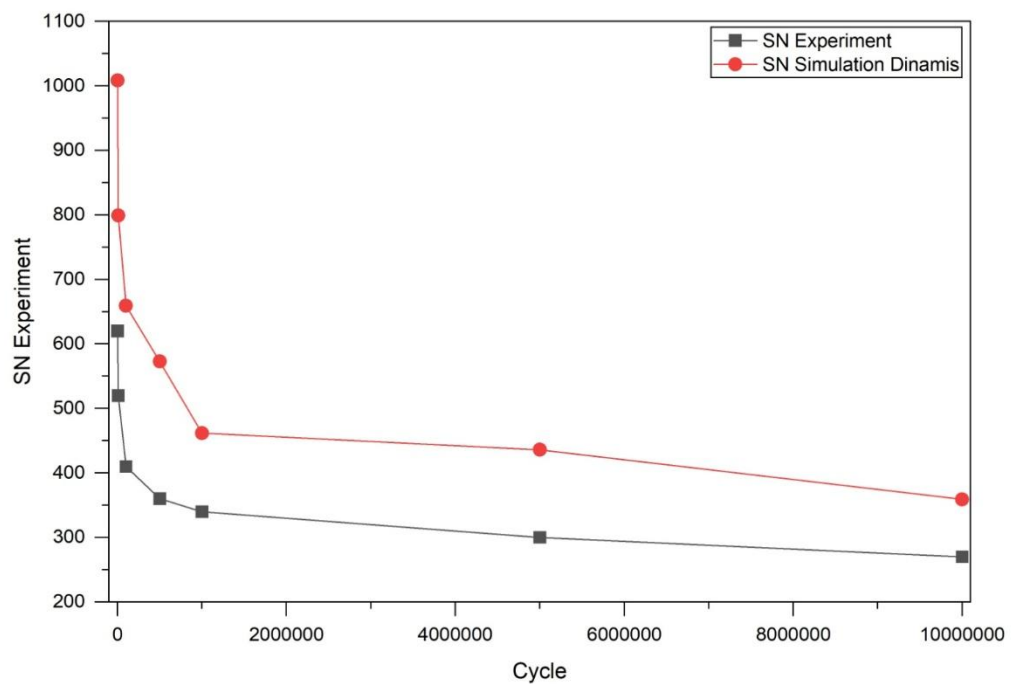
Gambar 4. 10 Grafik *s-n curve* baja aisi 4130 *experiment*



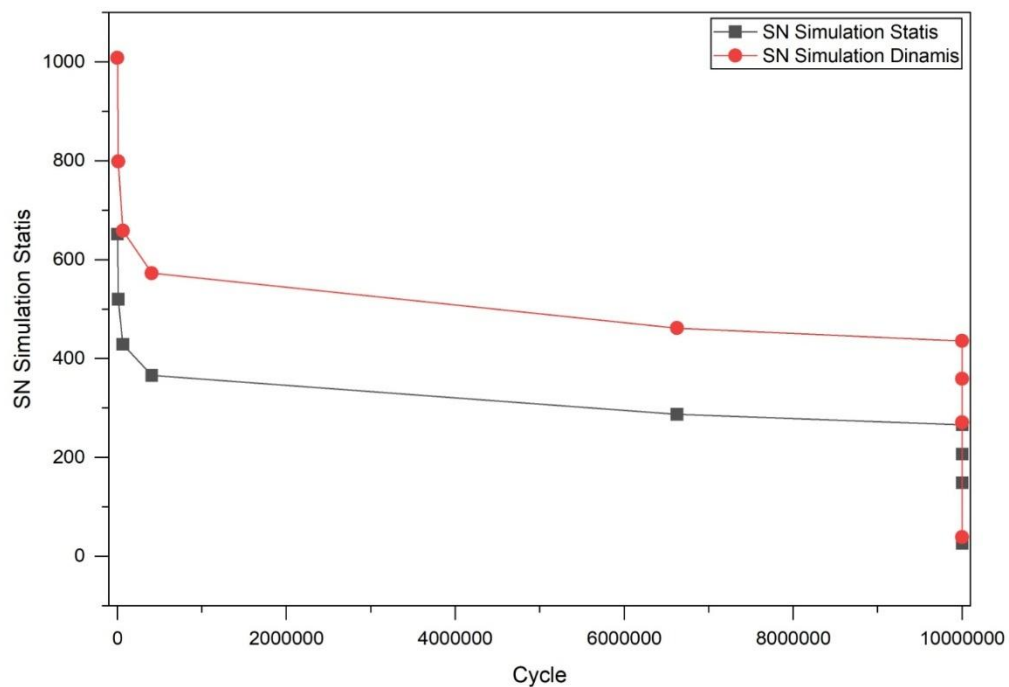
Gambar 4. 11 Grafik *S-N curve* baja AISI 4130 *experiment* dengan *S-N curve* baja AISI 4130 simulasi statis dan simulasi dinamis



Gambar 4. 12 Grafik *S-N curve* baja AISI 4130 *experiment* dengan Simulasi Statis



Gambar 4. 13 Grafik *S-N curve* baja AISI 4130 *experiment* dengan Simulasi Dinamis



Gambar 4. 14 Grafik *S-N curve* baja AISI 4130 Simulasi Statis dengan Simulasi Dinamis

Gambar 4.11 sampai dengan gambar 4.14 menunjukkan grafik perbandingan *S-N Curve* dari hasil *experiment*, simulasi statis, dan simulasi dinmais yang diperoleh dengan memberikan pembebanan bertahap mulai dari 80 kg hingga 360 kg pada rangka sepeda motor listrik. Setiap variasi beban menghasilkan nilai tegangan yang kemudian dikonversikan menjadi umur lelah (*fatigue life*) dalam bentuk jumlah siklus kegagalan (N). Proses ini menghasilkan data yang dapat diplot pada kurva *S-N*.

Karena beban yang diberikan tidak *fully reserved loading*, maka *S-N Curve* yang digunakan merupakan *S-N Curve* material yang dipengaruhi oleh *mean stress* dengan menggunakan persaaan *goodman* ataupun *gerber*. *Mean stress* adalah komponen rata-rata dari tegangan siklik yang mempengaruhi ketahanan material terhadap kelelahan. Nilai *mean stress* digunakan dalam berbagai kriteria *fatigue* seperti *modified goodman*, dan memainkan peran penting dalam menentukan faktor

keamanan desain struktur terhadap beban berulang. *Mean stress* yang tinggi, terutama jika bernilai positif (tegangan tarik), cenderung mempercepat terjadinya retak atau kegagalan pada material. Sebaliknya, *mean stress* negatif (tegangan tekan) dalam batas tertentu bisa meningkatkan ketahanan *fatigue*. Dengan menggunakan *ultimate stress* persamaan 4.2 baja AISI 4130, maka mean stress yang didapatkan sebesar:

$$\sigma_{mean} = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}$$

$$\sigma_{mean} = \frac{52,99 + 0,000013407}{2}$$

$$\sigma_{mean} = 26,4950067$$

Setelah dilakukannya simulasi statis dan simulasi dinmais maka didapatkan grafik perbandingan *S-N Curve* material yang baru pada setiap siklusnya pada gambar 4.11 hingga gambar 4.14 serta data grafik *S-N Curve* yang dilakukan secara simulasi di tunjukkan pada tabel 4.4 dan tabel 4.5 .

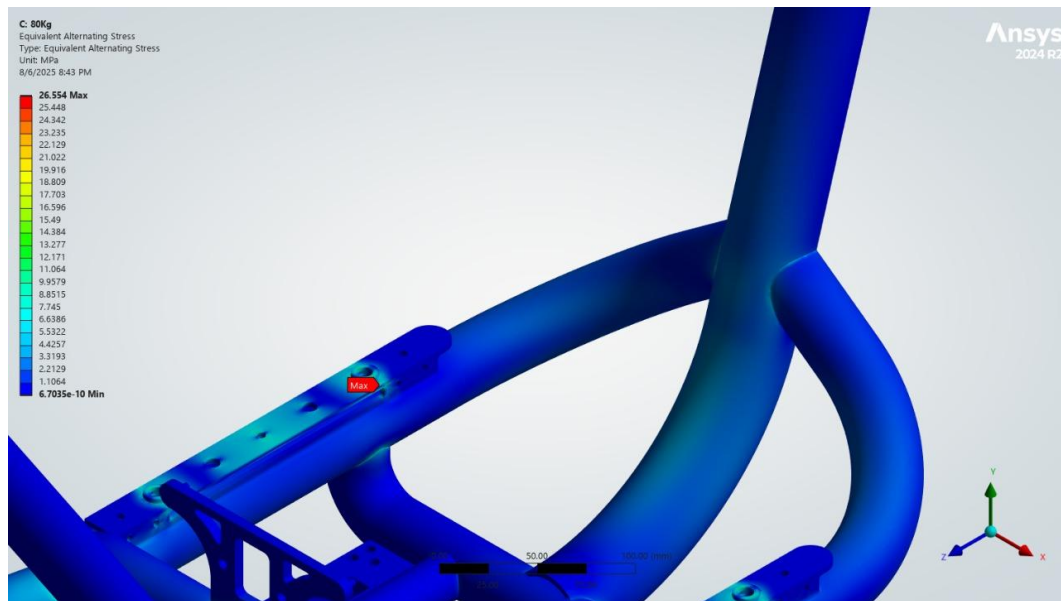
Tabel 4. 4 Variasi Pembebanan pada Simulasi Statis

SN CURVE BAJA AISI 4130 SIMULASI STATIS											
Jumlah	Pengemudi (N)			Penumpang+Beban (N)			Alternating	Alernating	Life Max	Life Min	Safety Factor
Massa (Kg)	Massa Kaki	Massa Badan	Massa Tangan	Massa Kaki	Massa Badan	Massa beban	Stress Max (Mpa)	Stress Min (Mpa)			
80	1667	588,6	29,43				26,554	6,7035E-06	10000000	10000000	8,6809
160	1667	588,6	29,43	196,2	588,6		148,97	2,2834E-09	10000000	10000000	1,6464
180	166,7	588,6	29,43	196,2	588,6	196,2	206,96	2,3999E-09	10000000	10000000	1,2466
220	196,2	735,75	29,43	245,25	735,75	215,82	266,36	2,9694E-09	10000000	10000000	1,0277
240	245,25	784,8	29,43	294,3	784,8	215,82	287,45	3,1426E-09	10000000	6623400	0,97343
270	245,25	902,52	29,43	294,3	902,52	274,68	366,14	3,6624E-09	10000000	405600	0,83114
300	318,825	961,38	34,335	343,35	961,38	323,73	429,14	3,9729E-09	10000000	64272	0,75838
330	343,35	1088,91	39,24	343,35	1079,1	343,35	520,06	4,48E-09	10000000	9984,1	0,68759
360	372,78	1177,2	39,24	372,78	1196,82	372,78	651,84	4,86E-09	10000000	0	0,62342

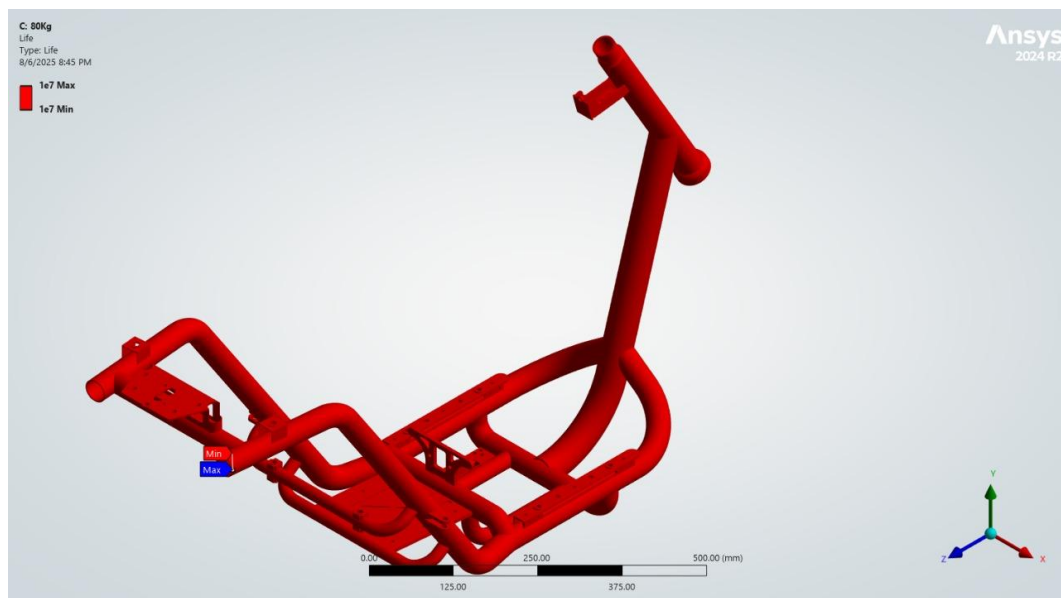
Tabel 4. 5 Variasi Pembebanan pada Simulasi Dinamis

SN CURVE BAJA AISI 4130 SIMULASI DINAMIS (DESELERASI)											
Jumlah Massa (Kg)	Pengemudi (N)			Penumpang+Beban (N)			Alternating Stress Max (Mpa)	Alernating Stress Min (Mpa)	Life Max	Life Min	Safety Factor
	Massa Kaki	Massa Badan	Massa Tangan	Massa Kaki	Massa Badan	Massa beban					
80	1667	588,6	29,43				38,725	1,45E-09	10000000	10000000	5,9677
160	1667	588,6	29,43	196,2	588,6		271,32	2,87E-08	10000000	9684500	1,0141
180	166,7	588,6	29,43	196,2	588,6	196,2	359,17	2,65E-08	10000000	514140	0,84
220	196,2	735,75	29,43	245,25	735,75	215,82	435,84	2,74E-08	10000000	55320	0,7520
240	245,25	784,8	29,43	294,3	784,8	215,82	461,81	2,79E-08	10000000	31572	0,72933
270	245,25	902,52	29,43	294,3	902,52	274,68	572,87	2,88E-08	10000000	2815,2	0,65789
300	318,825	961,38	34,335	343,35	961,38	323,73	659,11	2,97E-08	10000000	0	0,62072
330	343,35	1088,91	39,24	343,35	1079,1	343,35	799,21	3,06E-08	10000000	0	0,579
360	372,78	1177,2	39,24	372,78	1196,82	372,78	1008,7	3,16E-08	10000000	0	0,54025

Berdasarkan gambar 4.15 dan gambar 4.16 diketahui bahwa pada pembebanan 80 kg, yang telah disimulasikan tidak akan patah atau aman karena memiliki minimal *cycle* sebesar 10000000 jumlah siklus pada *alternating stress* yang menghasilkan nilai yang aman.



Gambar 4. 15 *Equivalent alternating stress* di pembebanan 80 kg



Gambar 4. 16 *Cycle* di pembebanan 80 kg

4.4 Simulasi Dinamis Kondisi *Deselerasi*

Simulasi dinamis pada kondisi deselerasi merupakan analisis yang digunakan untuk mempelajari respon rangka sepeda motor listrik ketika mengalami deselerasi akibat pengereman. Sehingga beban dinamis yang diterima rangka dapat direpresentasikan secara realistis. Metode simulasi statis hanya menggambarkan distribusi beban dalam kondisi tetap, sedangkan simulasi dinamis mempertimbangkan variasi beban terhadap waktu serta pengaruh momen akibat deselerasi mendadak. Melalui pendekatan ini, proses optimasi desain rangka dapat dilakukan lebih akurat karena hasil simulasi mampu menunjukkan tegangan maksimum, deformasi, serta distribusi gaya yang terjadi secara nyata pada kondisi pengereman.

Kecepatan awal (V_0) yang digunakan merupakan hasil dari perhitungan manual yaitu dengan menggunakan rumus berikut :

$$F = M \times a$$

$$\mu_s \times N = M \times a$$

$$a = \frac{\mu_s \times N}{M}$$

Diketahui nilai maksimum koefisien gesekan (μ_s) yang digunakan untuk roda depan berkisar sekitar nilai 0,75, dan lebih besar untuk roda belakang yang nilainya berkisar 0,8 (Parczewski & Wnęk, 2012). Massa total dari pembebanan (M). Maka distribusi massa yang digunakan ditunjukkan pada tabel 4.6.

Tabel 4. 6 Distribusi Massa

Distribusi Massa		
Massa (Kg)	Distribusi Massa Roda	Distribusi Massa Roda
	Depan	Belakang
80	$\mu_s = 0,75$	$\mu_s = 0,8$
	60%	40%
	353,16	251,136

Tabel 4.7 tersebut akan digunakan untuk perhitungan nilai *deselerasi* berikut:

$$a = \frac{\mu_{s1} \times N_1 + \mu_{s2} \times N_2}{M}$$

$$a = \frac{353,16 + 251,136}{80 \text{ Kg} + 20,362}$$

$$a = 6 \text{ m/s}^2$$

Tabel 4. 7 Nilai *Deselerasi* pada setiap pembebanan

Massa Rangka (Kg)	Distribusi Massa			Deselerasi (m/s^2)
	Massa Pembebanan	Distribusi Massa Roda Depan	Distribusi Massa Roda Belakang	
	(Kg)	$\mu_s = 0,75$	$\mu_s = 0,8$	
20,362	80	60%	40%	6,02
		353,16	251,136	

Pada gerak lurus berubah beraturan (GLBB) ketika kecepatan akhir (V_t) = 0 (kondisi pengereman hingga berhenti), jarak tempuh sampai berhenti dapat dicari dari persamaan kinematika:

$$V_t^2 = V_0^2 - 2 \times a \times s$$

$$0 = V_0^2 - 2 \times a \times s$$

$$s = \frac{V_0^2}{2 \times a}$$

Pada tahapan ini penulis melakukan perhitungan analitik (teoritis) sistem pengereman cakram roda depan dan belakang, beban maksimal kendaraan pada kecepatan 30 Km/jam.

Tabel 4. 8 Variasi Jarak Pengereman (s)

Jarak Pengereman (s)					
Massa Pembebanan (Kg)	V_t (m/s)	V_0 (km/h)	V_0 (m/s)	a (m/s ²)	s (m)
80	0	30	8,33	6,02	5,77

Pada Tabel 4.8 maka didapatkan maksimal jarak berhenti sekitar 10 meter untuk *braking distance*. Maka jarak pengereman yang diinginkan yaitu 5 m, 5 m sisanya digunakan sebagai *safety distance* apabila ada hal yang tidak diinginkan.

Waktu pengereman menggunakan persamaan GLBB yaitu:

$$V_t = V_0 - a \times t$$

$$t = \frac{V_0 - V_t}{a}$$

$$t = \frac{8,33 - 0}{6,02}$$

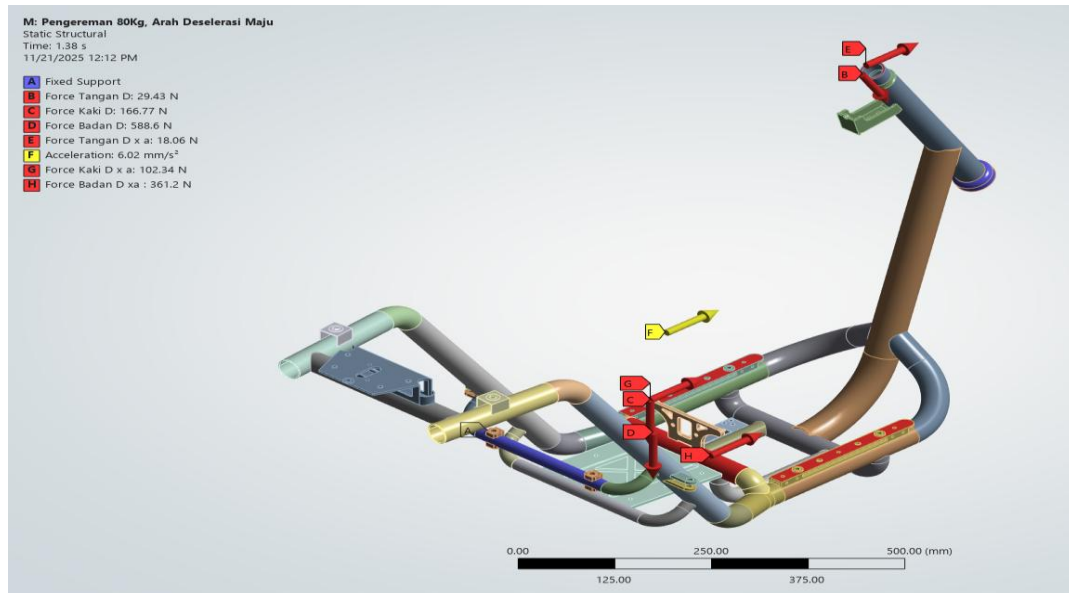
$$t = 1,38 \text{ s}$$

Tabel 4. 9 Waktu Pengereman

Massa Pembebanan (Kg)	V_t (m/s)	V_0 (km/h)	V_0 (m/s)	a (m/s ²)	s (m)	Waktu Pengereman (t)
80	0	30	8,33	6,02	5,77	1,38

Pada tabel 4.9 menunjukkan waktu pengereman terhadap jarak dan kecepatan yang terjadi saat kondisi pengereman sampai berhenti.

4.4.1 Boundary Condition Deselerasi



Gambar 4. 17 *Boundary condition* kondisi deselerasi

Pada simulasi dinamis diasumsikan dengan kondisi pengereman atau mengalami deselerasi (perlambatan). Kondisi ini, memiliki beberapa pendekatan untuk menentukan *boundary condition* yang diterapkan pada rangka motor listrik saat proses simulasi numerik dilakukan. *Boundary condition* ini ditunjukkan pada gambar 4.14 yang terdiri dari beberapa area letak *force* dan deselerasi yang bekerja pada rangka, antara lain :

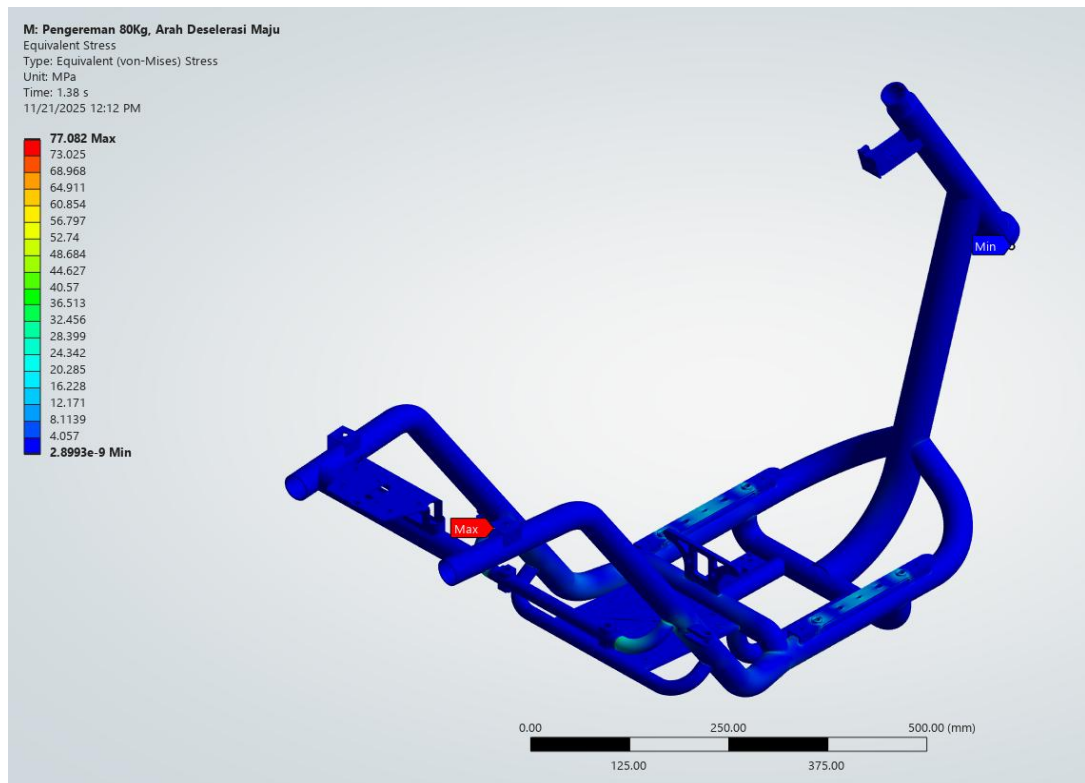
1. *Fix support* yang menjadi tumbuan rangka motor terletak pada area komstir dan *swing arm* bagian atas rangka motor listrik.
2. *Force* pada masing-masing beban terdistribusi sesuai dengan peletakkan *boundary condition* pada simulasi statis seperti *force driver* pada footstep driver, tangan driver diterapkan pada stangstir driver bagian atas, dan yang lainnya.

3. Vektor deselerasi bekerja ke arah belakang sebagai interpretasi perlambatan untuk proses pengereman yang kemudian diproyeksikan pada rangka untuk mengetahui respon struktur terhadap kondisi dinamis tersebut.
4. Deselerasi juga diletakkan pada setiap area *force* yang telah ditentukan untuk mengetahui reaksi rangka setelah mengalami kondisi pengereman, arah deselerasi ini sama dengan arah vektor deselerasi yang bekerja.

Dengan mempertimbangkan keempat kondisi batas ini, analisis statis dan dinamis dapat memberikan gambaran menyeluruh mengenai kinerja rangka, khususnya terhadap kekuatan, deformasi, serta ketahanan fatigue dalam proses optimasi desain sepeda motor listrik.

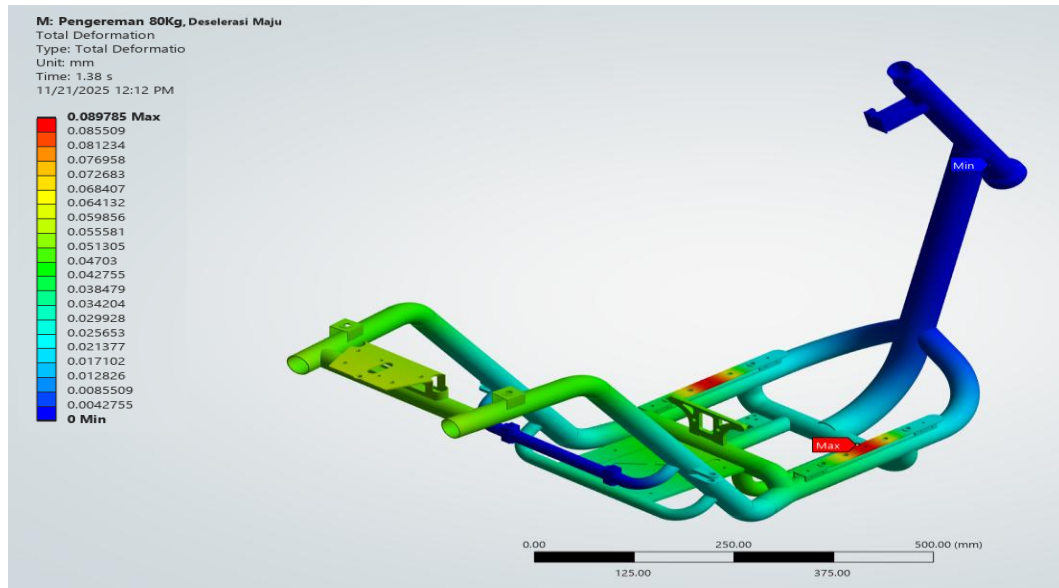
4.4.2 Hasil Simulasi Dinamis Kondisi Deselerasi dengan Pembebanan 80 kg

Simulasi dinamis rangka kendaraan pada kondisi pengereman mendadak dilakukan dengan parameter beban pengguna sebesar 80 kg dan kecepatan awal kendaraan 30 km/jam. Analisis menggunakan pendekatan tegangan *ekuivalen von mises* menunjukkan bahwa nilai maksimum tegangan terjadi sebesar 77,082 MPa , sedangkan nilai minimum yaitu 0,0000000028993 MPa. Nilai-nilai ini mencerminkan distribusi tegangan yang terjadi akibat deselerasi mendadak saat pengereman, di mana gaya inersia mendorong massa ke arah depan kendaraan yang ditunjukkan pada gambar 4.15.



Gambar 4. 18 Equivalent (von mises) max kondisi deselerasi pada 80 kg, 30 km/h

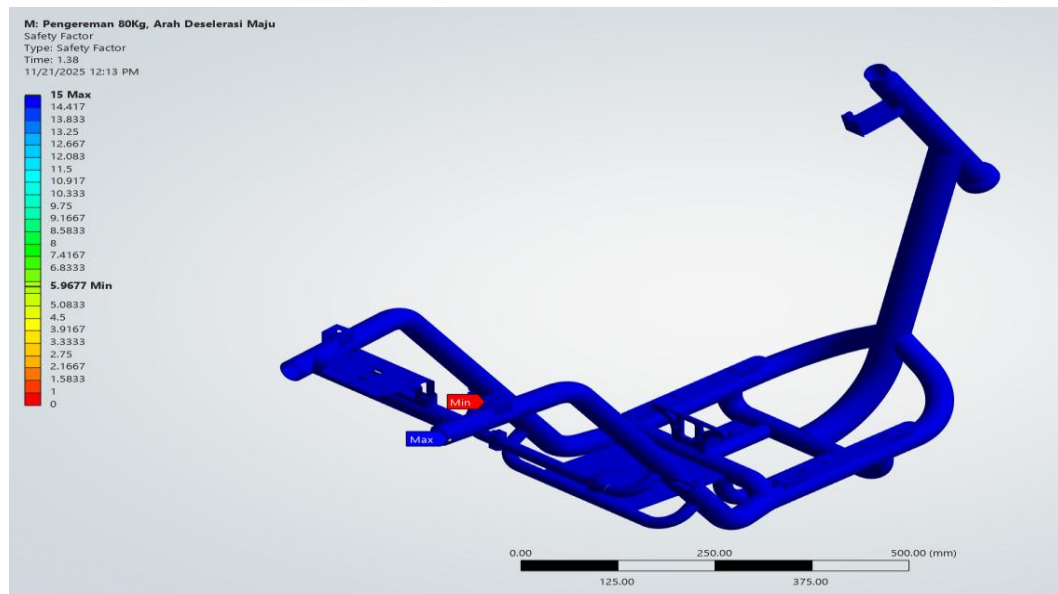
Tegangan maksimum teridentifikasi berada pada area sambungan rangka bagian arm bawah yang terlihat pada gambar 4.15, yang menerima beban kombinasi antara gaya tekan vertikal dan momen lentur akibat perpindahan pusat massa. Hal ini sesuai dengan karakteristik distribusi gaya saat pengereman, di mana bagian depan kendaraan menanggung beban lebih besar karena transfer beban dinamis. Tegangan minimum terletak di bagian atas rangka (dekat stang stir), yang relatif tidak mengalami deformasi signifikan karena jauh dari pusat gaya reaksi utama.



Gambar 4. 19 Total deformasi kondisi deselerasi pada 80 kg, 30 km/h

Simulasi deformasi total pada struktur rangka kendaraan dilakukan untuk memahami bagaimana rangka merespons beban dinamis selama proses pengereman. Dengan beban pengendara sebesar 80 kg dan kecepatan awal 30 km/h, diperoleh deformasi maksimum sebesar 0,089785 meter sedangkan deformasi minimum adalah 0 meter. Simulasi ini mencerminkan respons struktur terhadap gaya inersia dan gaya reaksi yang terjadi saat deselerasi mendadak.

Gambar 4.16 menunjukkan nilai deformasi maksimum terjadi pada bagian plat *footstep driver*, yang merupakan titik kritis akibat perpindahan massa dan distribusi gaya tekan saat pengereman. Posisi ini cenderung mengalami lenturan akibat gaya reaksi dari permukaan jalan yang diteruskan ke struktur melalui roda depan. Sebaliknya, bagian atas rangka (stang stir) menunjukkan nilai deformasi nol, yang menunjukkan bahwa area tersebut relatif kaku dan tidak menerima gaya langsung dalam skenario pengereman tersebut.



Gambar 4. 20 Safety factor min kondisi deselerasi pada 80 kg, 30 km/h

Simulasi ini menghasilkan nilai faktor keamanan yang bertujuan untuk mengevaluasi seberapa jauh struktur rangka mampu menahan beban dinamis saat pengereman sebelum mencapai batas luluh material. Berdasarkan hasil analisis elemen hingga (FEA) pada gambar 4.17, diperoleh nilai faktor keamanan maksimum sebesar 15, dan nilai minimum sebesar 5,9677. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa seluruh bagian rangka berada dalam batas aman yang sangat tinggi terhadap kegagalan struktural. Faktor keamanan minimum sebesar 5,9677 berada pada bagian arm bawah rangka, yang juga merupakan area dengan tegangan maksimum berdasarkan hasil analisis tegangan sebelumnya.

Tabel 4. 10 Data Simulasi Kondisi Deselerasi

DATA SIMULASI DINAMIS KONDISI DESELERASI												
Massa Pembebanan (Kg)	Vt (m/s)	V0 (km/h)	V0 (m/s)	a (m/s ²)	s (m)	Waktu Pengereman (t)	Equivalent Stress/ Von Mises Max (Mpa)	Equivalent Stress/ Von Mises Min (Pa)	Deformasi Max (m)	Deformasi Min (m)	Safety Factor Min	Safety Factor Max
80	0	30	8,33	6,02	5,77	1,38	77,082	0,0000000028993	0,089785	0	5,9677	15