

ANALISIS DESAIN *BRACKET YAW DAMPER* PADA PENGEMBANGAN *BOGIE*
KERETA API JARAK JAUH UNTUK KECEPATAN 160 KM/JAM DENGAN METODE
FEA

**(DESIGN ANALYSIS OF THE YAW DAMPER BRACKET IN THE
DEVELOPMENT *BOGIE* OF LONGDISTANCE TRAIN FOR 160 KM/H SPEED
USING THE FEA)**

Bachrul Eko Budi Santoso⁽¹⁾, Saiful Arif⁽¹⁾, Deny Setiawan⁽¹⁾

⁽¹⁾ Teknik Mesin, PSDKU Politeknik Negeri Malang di Kediri
Jl. Lingkar Maskumambang, no. 1, Sukorame, Mojoroto, Kota Kediri

Email : bachrulekobudisantoso@gmail.com

Diterima: 15 Agustus 2025. Disetujui: 10 Oktober 2025. Dipublikasikan: 30 November 2025

ABSTRAK

PT KAI (Persero) meminta PT INKA (Persero) untuk meningkatkan kecepatan operasional kereta penumpang dari 120 km/jam menjadi 160 km/jam sebagai langkah strategis dalam meningkatkan efisiensi transportasi. Komponen yang dapat mempengaruhi aspek tersebut adalah *bracket yaw damper*. Komponen *bracket* memiliki fungsi meredam getaran lateral antara *bogie* dan *carbody*. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan struktur dan mengoptimalkan desain *bracket yaw damper* pada *bogie* KAJJ menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) dalam *software* ANSYS Workbench. Material yang digunakan adalah baja SM490A dengan kekuatan luluh tinggi dan ketahanan deformasi yang baik. Analisis dilakukan terhadap model awal dan hasil topologi optimasi. Hasil menunjukkan penurunan massa dari 13,36 kg menjadi 9,61 kg (efisiensi 28%). Tegangan meningkat dari 124,12 MPa menjadi 145,05 MPa, namun masih dalam batas aman dengan faktor keamanan 2,2405. Desain akhir dinyatakan aman untuk digunakan pada kereta berkecepatan tinggi.

Kata Kunci: Analisis Desain; ANSYS Workbench; *Bracket Yaw Damper*; *Finite Element Analysis* (FEA); Kereta Api Jarak Jauh (KAJJ).

ABSTRACT

PT KAI (Persero) requested PT INKA (Persero) to increase the operational speed of passenger trains from 120 km/h to 160 km/h to enhance efficiency and meet mass transportation demands. A key component affecting stability is the yaw damper bracket, which absorbs lateral vibrations between the bogie and carbody. This study analyzes and optimizes the bracket's structural strength using FEA in ANSYS Workbench. The material used is SM490A steel, chosen for its high yield strength and deformation resistance. Two models were evaluated: the initial design and a topology-optimized design. Results show the bracket's mass was reduced from 13.36 kg to 9.61 kg, improving weight efficiency by 28%. Although stress increased from 124.12 MPa to 145.05 MPa, the final design maintains a safety factor of 2.2405, remaining within safe limits. The optimized bracket is suitable for use in high-speed train structures.

Keywords: ANSYS Workbench; Design Analysis; Finite Element Analysis (FEA); Long-Distance Passenger Train; Yaw Damper Bracket.

PENDAHULUAN

Industri kereta api di Indonesia, khususnya untuk Kereta Api Jarak Jauh, telah berkembang pesat dalam beberapa tahun terakhir. Permintaan dari *customer* yaitu dari PT. KAI oleh PT. INKA untuk peningkatan kecepatan operasional kereta penumpang dari 120 km/jam menjadi 160 km/jam merupakan upaya strategis untuk memenuhi kebutuhan transportasi yang lebih efisien. Peningkatan kecepatan ini menimbulkan tantangan baru terkait stabilitas dan keamanan kereta. Salah satu komponen krusial yang mempengaruhi stabilitas pada kecepatan tinggi adalah *bogie*.

Tanpa penyesuaian yang tepat, *bogie* dapat mengalami fenomena *hunting*, yaitu gerakan bolak-balik (osilasi) *yawing* tidak stabil, yang dapat mengurangi kenyamanan dan meningkatkan risiko kecelakaan. Komponen *yaw damper* berfungsi meredam gerakan bolak-balik (osilasi) *yawing* yang terjadi antara bodi kereta dengan *bogie*. Oleh karena itu, diperlukan struktur pemasangan yang kuat dan stabil agar kinerja *yaw damper* tetap optimal [1].

Bracket yaw damper berperan sebagai elemen penopang utama yang memastikan perangkat ini berada pada posisi yang benar selama operasional kereta berlangsung. Dengan demikian, *bracket* tersebut memastikan *yaw damper* mampu bekerja secara efektif dalam meredam gerakan yang tidak diinginkan serta menjaga stabilitas rangkaian kereta selama perjalanan [2].

Penelitian ini berfokus pada pembuatan desain *bracket yaw damper*. Tantangan utama dalam mendesain *bracket yaw damper* adalah mengelola gaya lateral yang terjadi saat kereta berubah arah atau kecepatannya. Penelitian menggunakan *Finite Element Analysis* (FEA) untuk menganalisis karakteristik getaran dan kenyamanan berkendara, relevan dalam konteks pengurangan getaran dan stabilitas pada kecepatan tinggi. Masalah ini tidak hanya mengganggu kenyamanan penumpang tetapi juga mempercepat kerusakan komponen [3].

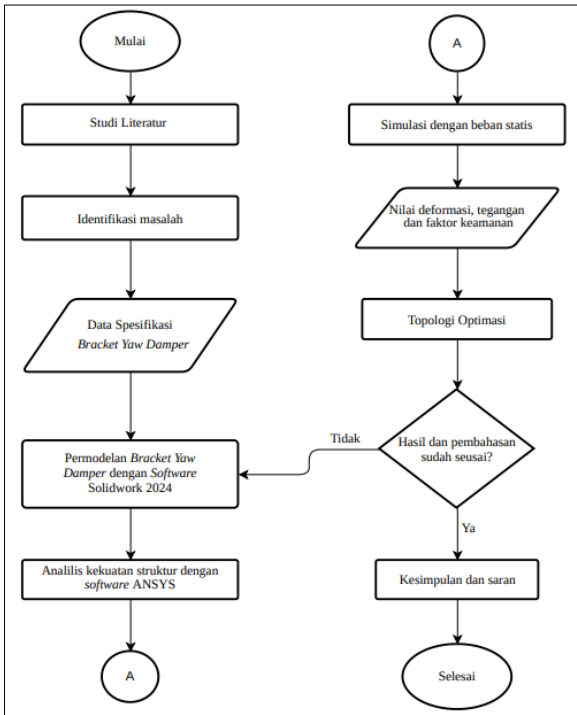
Walaupun beberapa penelitian sudah menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA) untuk memodelkan komponen ini, banyak yang masih fokus pada analisis statis dan tidak memperhitungkan interaksi dinamis yang terjadi saat kereta beroperasi dengan kecepatan tinggi [4].

MATERIAL DAN METODOLOGI

Jenis penelitian ini termasuk dalam kuantitatif berbasis deskriptif dengan menggunakan simulasi FEA sebagai metode utama, penelitian ini memungkinkan analisis mendalam tentang performa struktur tanpa memerlukan prototipe fisik. Data eksperimen digunakan sebagai langkah validasi untuk memastikan keakuratan dan keandalan hasil simulasi.

Proses ini sangat penting dalam desain *bracket*, yang sering digunakan dalam berbagai aplikasi teknik. Metode FEA (*Finite Element Analysis*) digunakan untuk

menentukan nilai deformasi, tegangan dan faktor keamanan ketika diberikan pembebanan [5].



Gambar 1. Diagram Alir

Input data material rangka *bogie* yaitu SM 490 A (JIS G3106). Baja SM490A adalah baja rol yang bisa digunakan dalam struktur *engineering*. Penggunaan SM490A juga memberikan keuntungan dalam hal kestabilan geometri dan keamanan struktural, terutama dalam menghadapi gaya lateral saat kendaraan bergerak dengan kecepatan tinggi [6].

Tabel 1. Spesifikasi Material

Modulus young	210 GPa
Elongation	17%
Yield strength	325 MPa
Ultimate tensile strength	490 MPa
Poisson Ratio	0,3

Bogie adalah struktur penting pada kereta api yang terdiri dari dua atau lebih roda yang terhubung oleh sebuah rangka,

dilengkapi dengan sistem pegas, sistem pengereman, serta peralatan tambahan seperti penggerak dan antiselip [7].



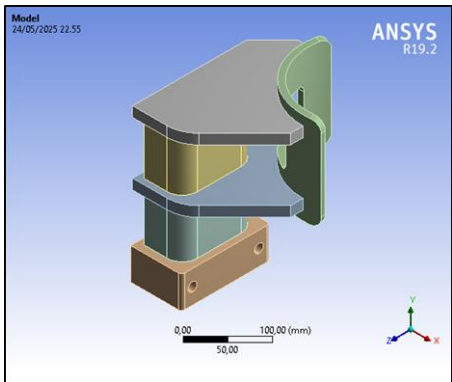
Gambar 2. Bogie Kereta Api

Secara ilmiah, *yaw damper* berfungsi mereduksi gaya dinamis antara kereta dan rel, khususnya pada kereta jarak jauh berkecepatan tinggi dengan variasi beban. Komponen ini juga berperan mengurangi emisi kebisingan dan getaran tanpa memengaruhi kinerja keseluruhan kereta. Sistemnya dirancang untuk mempertahankan efisiensi redaman secara optimal. [8].



Gambar 3. Yaw Damper

Studi ini menggunakan FEA untuk mengevaluasi kekuatan statik dan kelelahan *bracket yaw damper*, serta menerapkan optimasi topologi yang berhasil mengurangi massa komponen tanpa mengorbankan kekuatan strukturalnya, yang dapat menjadi referensi bagi penelitian sejenis dalam meningkatkan efisiensi desain untuk operasi kecepatan tinggi [9].



Gambar 4. Bracket Yaw Damper

Konvergensi *mesh* bertujuan memastikan hasil simulasi tidak dipengaruhi ukuran atau kepadatan elemen *mesh*. Saat *mesh* diperhalus, hasil seperti tegangan dan deformasi akan mendekati nilai stabil. Semakin kecil elemen, hasil simulasi makin valid, namun waktu komputasi juga meningkat. [10].

Skewness mesh metrics spectrum					
Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00
Orthogonal Quality mesh metrics spectrum					
Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Gambar 5. Mesh Metrics

Deformasi total menunjukkan perubahan bentuk *bracket* akibat beban yang diterapkan, menggambarkan sejauh mana material bergeser dari posisi awalnya. Nilai tertinggi terjadi pada area yang menerima beban puncak. Hal ini menandakan area tersebut sebagai titik kritis dalam menahan tekanan mekanis ekstrem [11].

Tegangan *von Mises* adalah nilai tunggal yang dihitung dari tegangan utama elemen untuk dibandingkan dengan batas *yield strength* material. Parameter ini digunakan untuk mengidentifikasi area dengan konsentrasi tegangan tertinggi saat struktur menerima beban kerja. Sementara itu, *safety factor* menunjukkan perbandingan

antara kekuatan material dan tegangan ekuivalen guna memastikan *bracket* memiliki cadangan kekuatan yang memadai selama operasi [12].

Untuk menghitung *safety factor* dapat dilihat pada persamaan sebagai berikut :

$$SF = \frac{yield\ stress}{calculated\ stress} \tag{1}$$

Penelitian ini mengevaluasi efektivitas metode *Topology Optimization* (TO) dalam merancang komponen yang ringan namun tetap mampu menahan beban saat digunakan [13].

Persamaan persentase penurunan massa adalah sebagai berikut :

$$final\ massa = \frac{Ma-Mb}{Ma} \times 100\% \tag{2}$$

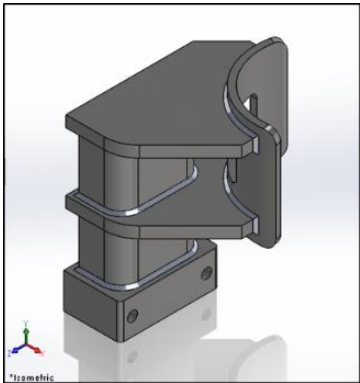
Dimana :

Ma : Massa awal (Kg)

Mb : Massa akhir (Kg)

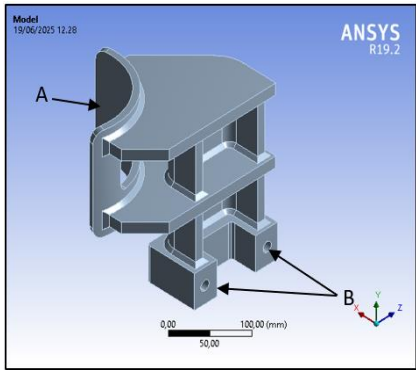
HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 6 model ini memiliki massa awal sebesar 13,278 kg. Gambar model awal diberikan kaki las dengan ukuran 5 mm dengan *software* Solidwork 2024.



Gambar 6. Bracket Yaw Damper

Bagian model yang di pertahankan bagian A yang merupakan penopang utama, serta bagian B berupa dua lubang di bagian bawah yang merupakan titik sambungan.



Gambar 7. Model Dipertahankan

Pembebanan pada *bracket* adalah sebesar 12.300 N dengan toleransi $\pm 15\%$. Hasil beban maksimal ke arah sumbu X dari komponen *yaw damper* yaitu :

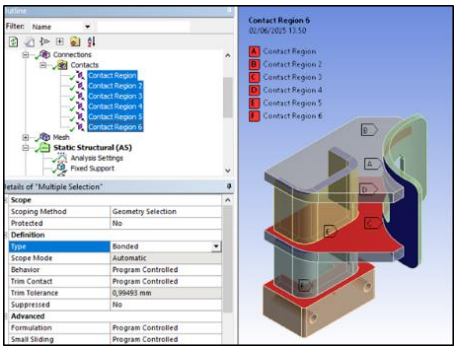
$$\begin{aligned} \% \text{ total} &= 12.300 \times 15\% \quad (1) \\ &= 0,15 \times 12.300 \\ &= 1.845 \\ F_{\text{max}} &= 12.300 + 1.845 \\ &= 14.145 \text{ N} \end{aligned}$$

Faktor keamanan menurut Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 44 Tahun 2010. Pada standar spesifikasi rangka kereta api, biasanya tegangan yang diizinkan adalah 75% dari *yield strength* material yang digunakan. Sehingga kita dapat menghitung *safety factor* lebih jelas dapat dilihat pada persamaan 2 yaitu :

$$\begin{aligned} 0,75 \times 325 &= 243,75 \text{ Mpa} \quad (2) \\ sf &= \frac{325}{243,75} = 1,33 \end{aligned}$$

Bracket yaw damper menggunakan sambungan tipe *fabricated*, yang artinya seluruh *part bracket yaw damper* disatukan melalui proses pengelasan. Berdasarkan tipe *bracket yaw damper* tersebut, maka jenis *connection* yang dipakai adalah tipe *bonded*. Kualitas sambungan bergantung pada distribusi tegangan, dan hasil simulasi menunjukkan peningkatan tegangan 16,8%

masih di bawah batas luluh material. Artinya, sambungan tetap aman secara struktural [14].



Gambar 8. Connections Bracket

Ukuran elemen 12 mm dipilih karena menghasilkan nilai tegangan *von mises* yang sudah relatif stabil dengan error margin hanya 0,26% terhadap *mesh* sebelumnya. Kualitas elemen yang baik ditunjukkan dengan nilai *skewness* 0,68886 (kategori baik, 0,50–0,80) dan *orthogonal quality* 0,31114 (kategori baik, 0,20–0,69) menjamin bahwa bentuk elemen tidak terlalu terdistorsi. Distorsi rendah ini menghasilkan distribusi tegangan yang lebih akurat dan stabil [15].

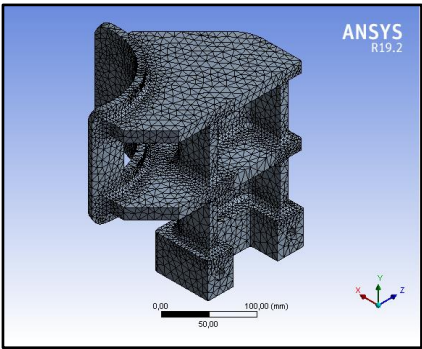
Tabel 2. Konvergensi *Meshing* Awal

Ukuran Elemen	Jumlah Elemen	Tegangan	Erör Margin
14	89571	124,44	1,23%
12	89586	124,12	0,26%
10	90333	125,17	0,84%

Tabel 3. Data *Mesh Quality*

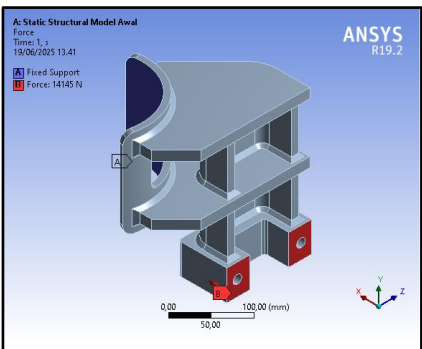
Ukuran Elemen	Skewness	Orthogonal Quality
14	0,66683	0,33317
12	0,68886	0,31114
10	0,69547	0,30453

Meshing bracket yaw damper menggunakan elemen tipe *tetrahedral* dan jenis *element order quadratic*. Element *quadratic* dipilih karena mampu memberikan akurasi yang lebih tinggi dalam menangkap deformasi *non-linier* dan distribusi tegangan yang lebih halus, terutama pada kontur lengkung dan area dengan konsentrasi tegangan tinggi [16].



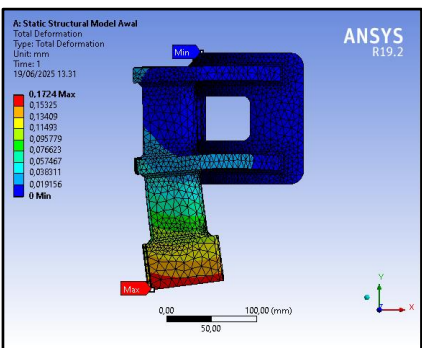
Gambar 9. Meshing Model Awal

Diterapkan *fixed support* pada sisi melengkung dari *bracket*, yang berarti area tersebut dianggap tidak dapat bergerak dan Diberikan gaya sebesar 14.145 N yang bekerja ke arah sumbu X.

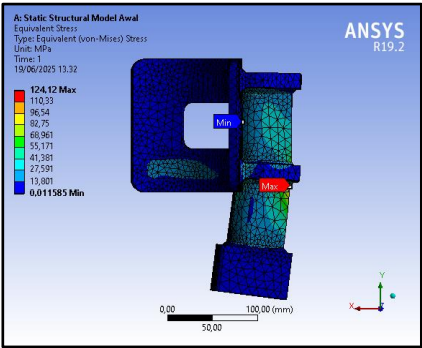


Gambar 10. Boundary Condition Awal

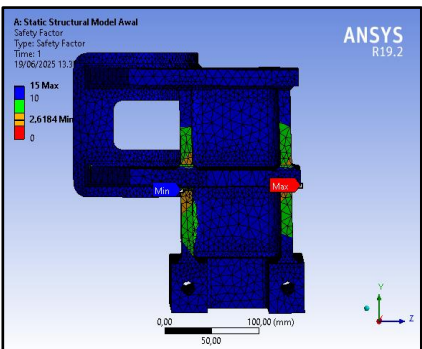
Hasil Simulasi Statis Model Awal



Gambar 11. deformasi Total



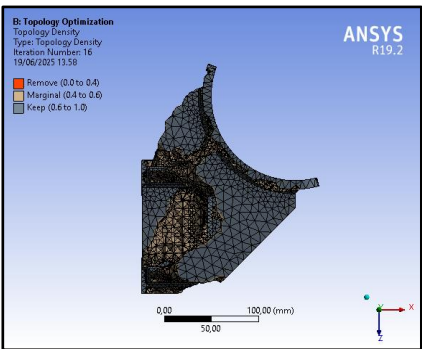
Gambar 12. Tegangan Von Mises



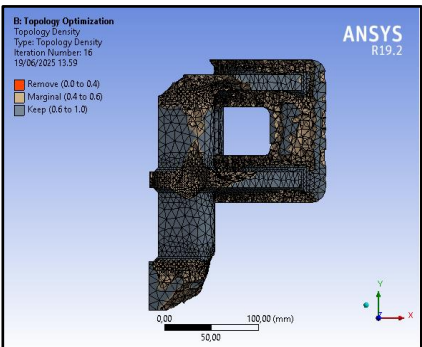
Gambar 13. Safety Factor

Hasil Topology Optimization

Hasil optimasi topologi pada model awal dari PT INKA difokuskan untuk mengurangi massa komponen sebesar 50%. Massa awal komponen adalah 13,363kg, dan setelah dilakukan optimasi, massa akhir berhasil dikurangi menjadi 7,4296 kg.

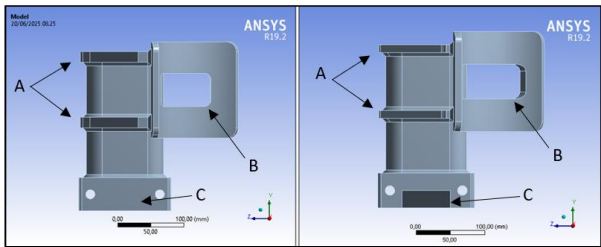


Gambar 14. Arah Sumbu Y



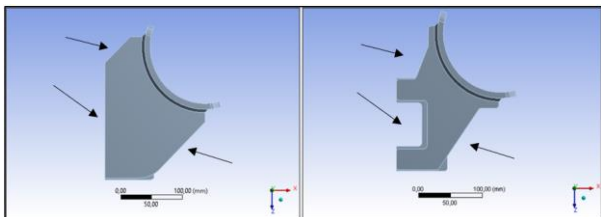
Gambar 15. Arah Sumbu Z

Model Hasil Optimasi



Gambar 16. Optimasi Model Sumbu X

Perubahan desain pada gambar 16 bagian yang di tunjukkan pada poin A plat yang awalnya 16 mm di pertipis menjadi 12 mm. Perubahan desain pada poin B komponen melengkung dengan memperbesar ukuran lubang dari semula 45 mm x 95 mm menjadi 50 mm x 130 mm. Pada poin C bagian bawah ditambahkan chamfer dengan panjang 70 mm dan kedalaman 30 mm di tengah *part*.



Gambar 17. Optimasi Model Sumbu Y

Pengurangan dimensi pada gambar 17 bagian pinggir komponen dilakukan dengan tujuan utama untuk mengurangi massa total dari *part* tersebut. Bagian pinggir yang dianggap tidak menanggung beban secara signifikan dikurangi volumenya, tanpa mengorbankan kekuatan struktural secara keseluruhan.

Hasil Simulasi Statis Model Akhir

Sama seperti simulasi model awal, pemilihan ukuran elemen 12 mm dalam penelitianmu didasarkan pada titik

kestabilan hasil tegangan *von Mises* dengan error margin hanya 0,06%, menunjukkan bahwa hasil sudah konvergen.

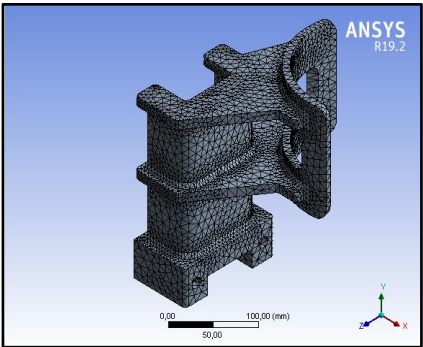
Tabel 4. Konvergensi *Meshing* Akhir

Ukuran Elemen	Jumlah Elemen	Tegangan	<i>Error Margin</i>
14	75137	144,94	0,08%
12	75158	145,05	0,06%
10	75748	151,01	3,91%

Tabel 5. Data *Mesh Quality*

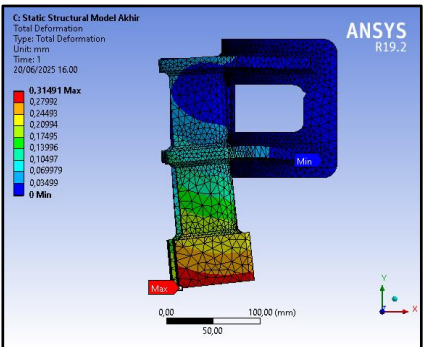
Ukuran Elemen	<i>Skewness</i>	<i>Orthogonal Quality</i>
14	0,68038	0,31992
12	0,68021	0,31979
10	0,69324	0,30676

Seperti model awal, *meshing bracket yaw damper* menggunakan elemen *tetrahedral* dengan *order quadratic*.

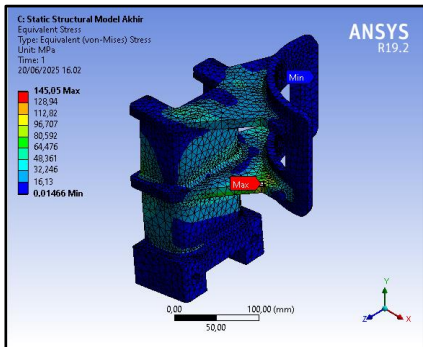


Gambar 18. *Meshing* Model Akhir

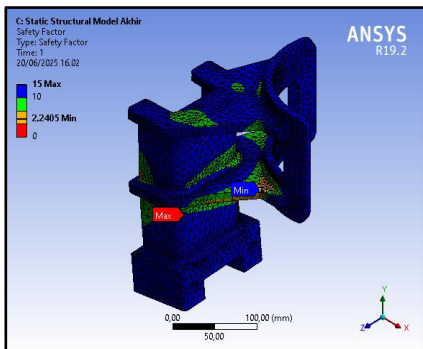
Hasil Simulasi Statis Model Akhir



Gambar 19. Deformasi Total Model Akhir



Gambar 20. Tegangan *Von Mises* Akhir



Gambar 21. *Safety Factor*

Penurunan ini merupakan konsekuensi wajar dari pengurangan massa, namun tetap berada dalam ambang batas keamanan. Hal ini menunjukkan bahwa desain akhir tetap dapat dipakai dalam menahan beban operasional. Dengan massa akhir sebesar 9,6135 kg, desain ini berhasil mengurangi bobot hingga 28,06% dibandingkan model awal 13,363 kg, tanpa mengorbankan kekuatan dan keselamatan struktur. Capaian tersebut membuktikan bahwa pendekatan desain berbasis analisis numerik dan evaluasi tegangan, seperti yang dilakukan melalui simulasi elemen hingga (*Finite Element Analysis*) berperan efektif dalam menghasilkan struktur yang efisien dan ekonomis [17, 18].

Adapun persamaan penurunan persentase dapat di tunjukkan pada persamaan 3 sebagai berikut.

$$final\ massa = \frac{13,363 - 9,6135}{13,363} \times 100\% = 28,05\% \tag{3}$$



Gambar 22. Perbandingan Massa

KESIMPULAN

Model awal memiliki massa sebesar 13,363 kg, sedangkan model akhir hanya 9,6135 kg, menunjukkan pengurangan massa sekitar 28% akibat optimasi topologi, yang berdampak positif terhadap efisiensi energi dan pengurangan beban dinamis tanpa mengorbankan integritas struktural. Tegangan *von mises* memang meningkat dari 124,12 MPa menjadi 145,05 MPa, namun tetap berada di bawah batas aman 243,75 MPa, sehingga tidak menimbulkan risiko kegagalan. Faktor keamanan sedikit menurun dari 2,6184 menjadi 2,2405 akibat pengurangan material, namun masih di atas standar minimum 1,33, menandakan struktur tetap aman. Ukuran *mesh* model awal dan akhir sama yaitu 12 mm untuk meningkatkan konvergensi dan akurasi simulasi, dengan kualitas elemen yang tetap baik. Nilai *skewness* sedikit menurun dari 0,68886 menjadi 0,68021 namun masih dalam kisaran ideal (< 0,85), menunjukkan *mesh* tetap stabil, sementara *orthogonal quality* sedikit meningkat dari 0,31114 ke 0,31979 namun tetap berada dalam batas ideal (> 0,2).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Liu, N. Zhang, M. Zheng, L. Luo, W. Zhong, and Z. Yan, "A study of a novel hydraulically interconnected anti-hunting damping system for high-speed trains," *Multibody Syst. Dyn.*, 2025, doi: 10.1007/s11044-025-10079-9.
- [2] Y. Yu, J. Wang, Y. Song, and L. Zhao, "Stability Analysis of Power Bogie System and Forward Design of Its Yaw Damper Damping Parameter," *Eng. Lett.*, vol. 31, no. 4, pp. 1434–1441, 2023.
- [3] H. Ha, J. Park, and K.-S. Park, "Advanced numerical analysis for vibration characteristics and ride comfort of ultra-high-speed maglev train," *Microsyst. Technol.*, vol. 26, no. 1, pp. 183–193, 2020, doi: 10.1007/s00542-019-04540-x.
- [4] Zhao C.L. et al., "RESEARCH ON LIGHTWEIGHTING OF KEY," vol. 24, pp. 521–532, 2025.
- [5] I. M. Ilyasa, I. A. Hendaryanto, and A. Winarno, "Analisis Kekuatan Struktur pada Desain Traction Rod Kereta Api Lokomotif dengan Metode Finite Element Analysis (FEA)," vol. 8, no. 2, pp. 190–199, 2024.
- [6] J. M. Valentino, W. Nirbito, and D. A. Sumarsono, "Analisis Pembebanan Dinamik Pada Perancangan Bogie Automatic People Mover System (Apms)," no. Snttm Xiv, pp. 7–8, 2015.
- [7] R. L. Monalisa, I. Yuwono, A. T. A. Salim, A. P. Utomo, and M. Z. Mahfud, "Analisis Kekuatan Struktur Bogie Frame Kereta Ukur pada Kondisi Exceptional Loads," *JMPM (Jurnal Mater. dan Proses Manufaktur)*, vol. 6, no. 2, pp. 16–28, 2022, doi: 10.18196/jmpm.v6i2.15711.
- [8] P. Zvolenský, J. Grenčík, A. Pultznerová, and L. Kašiar, "Research of noise emission sources in railway transport and effective ways of their reduction," *MATEC Web Conf.*, vol. 107, 2017, doi: 10.1051/mateconf/201710700073.
- [9] W. Szmyt, D. Gmiterek, and B. Dębowski, "Optimization of yaw damper bracket, fatigue assessment," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2028, no. April 2018, 2018, doi: 10.1063/1.5066410.
- [10] Y. Sanjaya, A. R. Prabowo, F. Imaduddin, and N. A. B. Nordin, "Design and analysis of mesh size subjected to wheel rim convergence using finite element method," *Procedia Struct. Integr.*, vol. 33, no. C, pp. 51–58, 2021, doi: 10.1016/j.prostr.2021.10.008.
- [11] F. Lubis, R. Pane, S. Lubis, M. A. Siregar, and B. S. Kusuma, "Analisa Kekuatan Bearing Pada Prototype Belt Conveyor," *J. MESIL (Mesin Elektro Sipil)*, vol. 2, no. 2, pp. 51–57, 2021, doi: 10.53695/jm.v2i2.584.
- [12] F. A. Budiman, A. Septiyanto, Sudiyono, A. D. N. I. Musyono, and R. Setiadi, "Analisis Tegangan von Mises dan Safety Factor pada Chassis Kendaraan Listrik Febrian Arif Budiman dkk / Jurnal Rekayasa

- Mesin,” *Rekayasa Mesin*, vol. 16, no. 1, pp. 100–108, 2021.
- [13] D. A. Tristanto, S. Mulyadi, M. N. Kustanto, A. Triono, and I. Hardiatama, “Analisis optimasi topologi desain support bracket pada steering main shaft mobil TITEN EV-2,” *Turbo J. Progr. Stud. Tek. Mesin*, vol. 12, no. 1, pp. 63–69, 2023, doi: 10.24127/trb.v12i1.2388.
- [14] B. Hülägü, V. Acar, F. Çakır, and H. Akbulut, *Numerical analysis of modal and flexural behavior of nanocomposite adhesively bonded joints*, vol. 47, no. 4. 2025. doi: 10.1007/s40430-025-05455-7.
- [15] N. Fatchurrohman and S. T. Chia, “Performance of hybrid nano-micro reinforced mg metal matrix composites brake calliper: Simulation approach,” *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.*, vol. 257, no. 1, 2017, doi: 10.1088/1757-899X/257/1/012060.
- [16] D. J. Willis, J. Peraire, and J. K. White, “A quadratic basis function, quadratic geometry, high order panel method,” *Collect. Tech. Pap. - 44th AIAA Aerosp. Sci. Meet.*, vol. 20, pp. 15164–15180, 2006, doi: 10.2514/6.2006-1253.
- [17] Y. Li, P. F. Yuan, and Y. M. Xie, “A strategy for improving the safety and strength of topologically optimized multi-material structures,” *Acta Mech. Sin. Xuebao*, vol. 39, no. 8, 2023, doi: 10.1007/s10409-023-22134-x.
- [18] J. Fang, G. Sun, N. Qiu, N. H. Kim, and Q. Li, “On design optimization for structural crashworthiness and its state of the art,” *Struct. Multidiscip. Optim.*, vol. 55, no. 3, pp. 1091–1119, 2017, doi: 10.1007/s00158-016-1579-y.