

Analisis Pembebanan Statik Pada *Wheelset* Kereta Api Menggunakan Perangkat Lunak Ansys Workbench

Dio Dwi Mubarak^{1*}, Diah Wulandari², Tinton Davareza³, Ganda Putra Firmansyah⁴

^{1,2,3,4} Prodi Studi D4 Teknik Mesin, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya

*Penulis Korespondensi, email: diodwi.22010@mhs.unesa.ac.id

Received: 18/12/2025

Revised: 28/12/2025

Accepted: 25/01/2026

Abstract. The *Wheelset* is a critical component of a railway vehicle, responsible for supporting loads, maintaining motion stability, and ensuring optimal interaction between the wheel and the rail. Failure of the *Wheelset* may lead to excessive deformation, reduced safety factors, and potential accidents, making structural analysis essential to verify its reliability. This study aims to evaluate the structural response of a *Wheelset* under static loading using the Finite Element Analysis (FEA) method through ANSYS Workbench 17.2. The research stages included developing a 3D model, selecting ASTM A36 material, configuring the mesh, defining boundary conditions, and applying a vertical load of 200,000 N in accordance with axle load standards. Simulation results indicate that the maximum deformation of 0.24436 mm remains within the material's elastic limit; the Maximum Principal Stress of 64.281 MPa is significantly below the yield strength of 250 MPa; and the minimum safety factor of 3.7155 demonstrates that the structure is in a safe condition. These findings confirm that the *Wheelset* is capable of withstanding static operational loads. Future studies are recommended to include dynamic load analysis, fatigue evaluation, and comparative studies on alternative materials to enhance the structural performance of the *Wheelset*.

Keywords: *Wheelset*, Static loading, Finite Element Analysis, ANSYS Workbench, Principal stress, Deformation, Safety factor.

Abstrak. *Wheelset* merupakan salah satu komponen vital pada kereta api yang berperan dalam memikul beban, menjaga kestabilan gerak, serta memastikan kontak roda–rel berjalan dengan baik. Kerusakan pada *Wheelset* berpotensi menyebabkan deformasi berlebih, penurunan faktor keamanan, hingga risiko kecelakaan, sehingga diperlukan analisis struktural untuk menjamin keandalannya. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi respons struktural *Wheelset* terhadap pembebanan statik melalui metode *Finite Element Analysis* (FEA) menggunakan ANSYS Workbench 17.2. Proses penelitian mencakup pembuatan model 3D, penentuan material ASTM A36, pengaturan *meshing*, penetapan kondisi batas, serta pemberian gaya vertikal sebesar 200.000 N sesuai standar beban gandar. Hasil simulasi menunjukkan bahwa deformasi maksimum sebesar 0,24436 mm masih berada dalam batas elastis material; tegangan utama maksimum sebesar 64,281 MPa jauh di bawah nilai luluh 250 MPa; dan nilai *safety factor* minimum 3,7155 mengindikasikan struktur berada dalam kondisi aman. Dengan demikian, *Wheelset* dinilai mampu menahan pembebanan statik secara optimal. Untuk penelitian mendatang, disarankan penambahan analisis beban dinamis, kajian kelelahan material, serta perbandingan material alternatif guna meningkatkan performa struktural *Wheelset*.

Kata Kunci: *Wheelset*, Pembebanan statik, Finite Element Analysis, ANSYS Workbench, Tegangan utama, Deformasi, Faktor keamanan.

I. PENDAHULUAN

Kereta api merupakan teknologi transportasi darat yang mengalami perkembangan pesat, kereta api memiliki banyak keunggulan dalam hal efisiensi bahan bakar, waktu, keamanan dan mampu mengangkut beban besar [1]. Salah satu komponen utama yang berperan penting dalam menjamin keselamatan dan keandalan operasional kereta api adalah *Wheelset*, yang merupakan salah satu

komponen utama pada kereta api, *Wheelset* terdiri dari Poros (*Axle*) dan Roda (*wheel*). *Wheelset* harus dirancang dengan presisi karena ketidakseimbangan dinamis, akibat keausan atau distribusi yang tidak merata dapat menyebabkan getaran, keausan berlebih pada bantalan, kebisingan, bahkan potensi kecelakaan [2].

Roda (*Wheel*) kereta api adalah komponen yang dirancang khusus untuk kendaraan berbasis rel.

Roda kereta api dirancang dengan geometri khusus, seperti permukaan *conus* dan *flange*, untuk menjaga kestabilan lateral dan mencegah terjadinya keluar rel [3]. Poros (*Axle*) merupakan komponen yang menghubungkan roda dan menghubungkan *Wheelset* dengan *bogie* kereta. Peran utamanya adalah mentransmisikan beban statik dari berat kereta dan beban dinamis akibat getaran serta benturan selama pengoperasian [4]. Kegagalan pada *Wheelset* maupun interaksi roda dan rel dapat menyebabkan keausan berlebih, penurunan faktor keamanan, hingga potensi kecelakaan [5]. Oleh karena itu, analisis pembebanan statik pada *Wheelset* menjadi tahap penting dalam memastikan bahwa tegangan dan deformasi yang terjadi masih berada di bawah batas luluh material yang digunakan [6]. Material yang umum digunakan pada roda kereta api yaitu berupa baja karbon dan baja panduan, karena karakteristik mekanik yang mampu menahan beban besar, ketangguhan yang tinggi, ketahanan aus yang memadai saat berinteraksi langsung dengan rel [7]. Dalam konteks industri kereta api, penerapan metode *finite element analysis (FEA)* menjadi semakin penting dengan meningkatnya tuntutan tingkat akurasi, efisiensi dalam proses perancangan, serta kebutuhan akan verifikasi keselamatan [8].

Finite Element Analysis (FEA) adalah metode numerik yang digunakan untuk memecahkan masalah teknik dan fisika yang kompleks. Lewat pendekatan *FEA* ini bertujuan untuk memberikan alat bantu keputusan teknis dengan menggunakan bantuan komputer [9]. Metode ini telah banyak digunakan pada komponen perkeretaapian seperti *bogie frame*, *traction rod* lokomotif, maupun *Wheelset* untuk mengevaluasi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan tanpa harus selalu melakukan uji fisik yang mahal dan memakan waktu. Analisis dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak *ANSYS*, yang merupakan salah satu perangkat lunak analisis elemen hingga paling umum digunakan oleh *engineer* maupun *designer* [10]. Analisis secara statik mempresentasikan perilaku struktur ketika dalam kondisi dimana terjadi pembebanan maksimal dalam waktu cepat pada struktur rangka dari beban arah vertikal, sehingga dapat diketahui

area kritis akibat tegangan [11]. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa hasil simulasi *FEA* dapat mendekati hasil eksperimen dengan deviasi yang masih dalam batas toleransi, sehingga *FEA* layak dijadikan alat bantu utama dalam tahap desain dan verifikasi struktur komponen [12].

Pada penelitian sebelumnya oleh Safarudin, (2021) Desain Purwarupa Alat Uji Ketidakseimbangan Dinamis Pada Roda Kereta Api, penelitian ini juga menggunakan simulasi *ANSYS* untuk menganalisis deformasi dan faktor keamanan desain roda kereta api [13]. Penelitian oleh Supriyana dan Kholidin (2016) menganalisis tegangan pada poros roda gerbong kereta api dengan metode elemen hingga menggunakan perangkat lunak *ANSYS 12.0* untuk mengetahui distribusi tegangan dan area kritis pembebanan pada poros. Dari hasil simulasi yang dilakukan menunjukkan bahwa pendekatan *FEA* berbasis *ANSYS* efektif untuk mengidentifikasi lokasi kritis dan mengevaluasi keamanan poros roda kereta [14]. efektivitas metode *FEA* dalam memodelkan perilaku mekanik komponen rangkaian kereta telah dibuktikan melalui berbagai penelitian, misalnya pada analisis tegangan dan deformasi komponen *disc brake* maupun *axle* kereta, yang menunjukkan bahwa *FEA* mampu memprediksi area kritis secara akurat sebelum proses produksi dilakukan [15], [16].

Meskipun berbagai penelitian terdahulu telah membahas analisis kekuatan dan tegangan pada komponen perkeretaapian menggunakan metode *Finite Element Analysis (FEA)*, sebagian besar penelitian tersebut masih berfokus pada komponen secara terpisah. Selain itu, penelitian yang secara khusus mengevaluasi respons struktural *Wheelset* secara utuh terhadap pembebanan statik berdasarkan desain aktual industri masih relatif terbatas. Berdasarkan tinjauan tersebut, masih terdapat celah penelitian. Penelitian ini tidak hanya menganalisis salah satu komponen, tetapi mengevaluasi *Wheelset* secara keseluruhan dengan pendekatan *FEA* berbasis *ANSYS Workbench 17.2*. Selain itu, dokumentasi *Setup* simulasi *FEA* yang sistematis dan dapat direplikasi masih jarang dibahas secara rinci dalam penelitian sebelumnya.

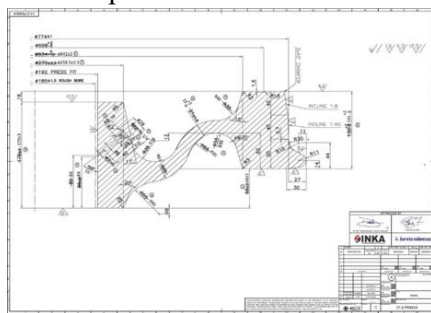
Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis respons struktural *Wheelset* kereta api terhadap pembebanan statik menggunakan metode *Finite Element Analysis (FEA)* berbasis ANSYS Workbench 17.2. Model *Wheelset* yang digunakan mengacu pada desain teknis dari PT. INKA dengan material *Carbon Steel ASTM A36*. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi teknis dalam evaluasi desain *Wheelset*, serta memberikan panduan *Setup* simulasi FEA yang dapat digunakan untuk pengembangan dan penelitian lanjutan.

II. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis numerik berbasis *Finite Element Analysis (FEA)* untuk menganalisis kekuatan struktural dari desain *Wheelset* kereta api yang terdiri dari rodan dan poros (*axle*) dengan pembebanan statik. Tahapan metode penelitian meliputi pembuatan model 3D, pemilihan material, penentuan kondisi batas, pemberian beban, dan analisis hasil menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench 17.2. Seluruh tahapan dilakukan untuk mengevaluasi hasil dari deformasi, tegangan, dan juga faktor keamanan dari *Wheelset* kereta api.

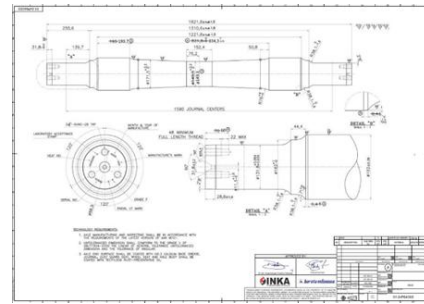
A. Model desain wheelset

Model desain dari *Wheelset* yang akan di analisis dalam penelitian ini yaitu berdasarkan gambar teknik roda dan poros dari PT. INKA.



Gambar 1. Desain Model Roda (*Wheel*) Kereta.
(Sumber: PT. INKA)

Roda ini memiliki diameter luar sebesar $\varnothing 774 \pm 1$ mm dan lubang tengah $\varnothing 192$ dan (*rough bore*) $\varnothing 185 \pm 1.5$ mm yang digunakan untuk proses pemasangan *press fit* pada poros.



Gambar 2. Desain Model Poros (*Axle*) Kereta.
(Sumber: PT. INKA)

Poros ini memiliki panjang total $1821,8 \pm 1,5$ mm. Desain poros mencakup beberapa tahapan diameter, di antaranya $\varnothing 192.2$ pada bagian *seat* roda (untuk *press fit*), $\varnothing 131.8$ mm pada bagian luar (untuk dudukan *bearing*). Ujung poros juga dilengkapi *chamfer*.

B. Konfigurasi material

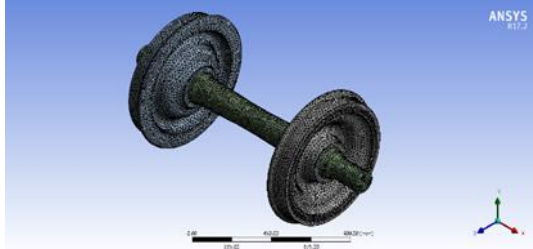
Pada penelitian ini, material *Carbon Steel ASTM A36* dimodelkan sebagai material linier elastis dan isotropik. Asumsi linier elastis digunakan karena analisis difokuskan pada kondisi pembebanan statik, di mana tegangan maksimum yang terjadi masih berada di bawah batas luluh material. Dengan demikian, hubungan antara tegangan dan regangan dianggap linier sesuai dengan hukum Hooke [17]. Selain itu, material diasumsikan isotropik karena sifat mekanik baja karbon relatif seragam ke segala arah, sehingga pendekatan ini dinilai memadai untuk analisis awal kelayakan struktural *Wheelset*. Material ini memiliki kombinasi kekuatan tarik yang baik, keuletan, serta kemudahan dalam proses fabrikasi. Berikut spesifikasi material *carbon steel ASTM A36* pada Tabel 1.

Tabel 1. Spesifikasi *Carbon Steel ASTM A36*

Properti	Nilai	Satuan	Keterangan
<i>Density</i>	7,850	Kg/m^3	Massa jenis
<i>Young's Modulus</i>	200×10^9	Mpa	Modulus elastisitas
<i>Tensile Strength (Ultimate)</i>	400-500	Mpa	Kekuatan Tarik maksimum
<i>Yeild Strength (σ_y)</i>	250	Mpa	Batas elastis/tegangan luluh
<i>Shear</i>	78×10^9	Pa	Modulus

Modulus (G)		(N/m ²)	geser
----------------	--	---------------------	-------

C. Proses meshing

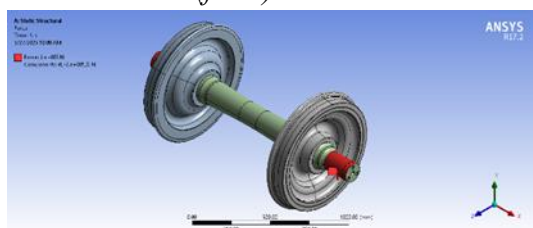


Gambar 3. Meshing Pada Wheelset
(Sumber: Pribadi)

Proses *Mesh* dilakukan setelah model *Wheelset* diimpor ke *ANSYS*. Proses ini bertujuan untuk membagi geometri model menjadi elemen kecil yang memungkinkan perhitungan secara detail. Ukuran *mesh* ditentukan sebesar 20 mm pada roda dan 15 mm pada poros untuk memperoleh keseimbangan antara hasil dan efisiensi komputasi. Ukuran *mesh* yang lebih halus diterapkan pada poros karena bagian ini berpotensi mengalami konsentrasi tegangan lebih tinggi, khususnya di area hub dan transisi geometri. Pemilihan ukuran *mesh* ini dianggap mampu merepresentasikan distribusi tegangan dan deformasi secara memadai tanpa meningkatkan waktu komputasi secara signifikan.

D. Kondisi batas (boundary condition)

1. Pemberian beban (*force*)

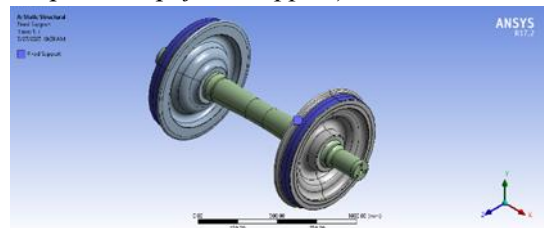


Gambar 4. Pemberian Beban (*Force*)
(Sumber: Pribadi)

Beban sebesar 200.000 N diterapkan pada ujung poros *Wheelset* secara aksial untuk merepresentasikan beban gandar kereta api pada kondisi statik operasional, yang setara dengan beban sekitar 20 ton. Berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor 60 Tahun 2012, jalan rel kelas I di

Indonesia dirancang dengan standar beban gandar maksimum sebesar 22,5 ton [18]. Dalam penelitian ini digunakan beban 20 ton sebagai pendekatan beban operasional nominal yang lebih konservatif dan merepresentasikan kondisi kerja normal. Pendekatan ini bertujuan memastikan analisis tetap berada dalam batas elastis material sekaligus menggambarkan kondisi pembebanan yang realistis pada *Wheelset*.

2. Tumpuan tetap (*fixed support*)



Gambar 5. Tumpuan Tetap (*Fixed Support*)
(Sumber: Pribadi)

Pada analisis *Wheelset* ini tumpuan *fixed support* diterapkan pada bagian tepi roda yang berwarna biru yang sesuai pada Gambar 5. Pendekatan ini digunakan untuk merepresentasikan kondisi operasional aktual, di mana roda ditahan oleh rel sehingga tidak mengalami perpindahan translasi maupun rotasi bebas selama menerima beban vertikal. Penempatan *fixed support* pada area ini bertujuan untuk mensimulasikan kondisi paling kritis (*worst-case condition*) terhadap respon struktural *Wheelset*. Penentuan posisi *fixed support* yang tepat sangat krusial karena dapat mempengaruhi hasil simulasi.

E. Ringkasan setup simulasi

Untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai konfigurasi simulasi yang dilakukan dalam simulasi ini, seluruh parameter input utama dirangkum dalam bentuk tabel, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2. Ringkasan ini mencakup pemilihan material, pengaturan pembebanan, batasan gerak, metode pemodelan *mesh*, serta jenis analisis yang digunakan. Tujuan dari penyajian ringkasan ini adalah untuk memudahkan pemahaman serta merekap semua aspek teknis sebelum dilakukan proses simulasi dan evaluasi hasil.

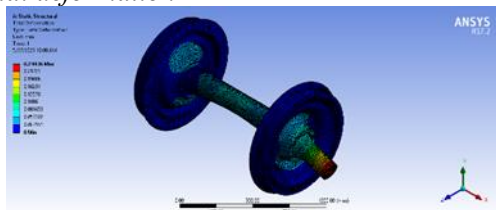
Tabel 2. Ringkasan *Setup* Simulasi

Parameter	Deskripsi
Material	<i>Carbon Steel ASTM A36</i>
<i>Force</i>	200.000 N
<i>Fixed Support</i>	Diameter roda yang bersentuhan dengan rel
Jenis <i>Mesh</i>	<i>Standart Mesh</i>
Ukuran <i>Mesh</i>	Roda (<i>Wheel</i>) : 20 mm
	Poros (<i>Axle</i>) : 15 mm
Jumlah <i>Node</i>	309968
Jumlah Elemen	202478
Model Analisis	<i>Static Structural</i>
Output Yang Dihasilkan	<i>Total Deformation, Tegangan Utama Maksimum, Safety Factor.</i>

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada tahap ini dilakukan analisis terhadap hasil simulasi menggunakan ANSYS Workbench 17.2 untuk mengevaluasi perilaku struktural dari *Wheelset* kereta api. Evaluasi difokuskan pada tiga parameter utama, yaitu *Total Deformation*, *Maximum Principal Stress*, dan *Safety factor*. Ketiga parameter tersebut digunakan untuk menggambarkan respons mekanik *Wheelset* terhadap beban statik sebesar 200.000 N. Tujuan analisis ini adalah mengidentifikasi distribusi tegangan maksimum yang muncul, serta menentukan tingkat keamanan struktural berdasarkan karakteristik material *ASTM A36* yang digunakan. Berikut hasil analisis yang diperoleh.

A. *Total deformation*

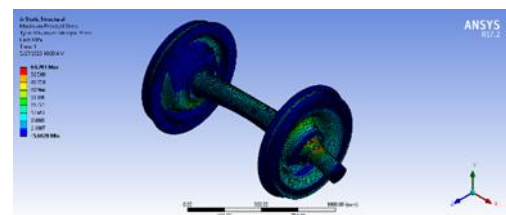


Gambar 6. *Total Deformation*
(Sumber: Pribadi)

Berdasarkan Gambar 6. hasil simulasi menggunakan ANSYS Workbench, diperoleh bahwa total deformasi maksimum yang terjadi pada

model *Wheelset* adalah sebesar 0.24436 mm, Jika dilihat dari Gambar 6. Warna merah menunjukkan area dengan deformasi terbesar, yang merupakan area dengan konsentrasi beban paling besar akibat pembebanan statik. Jika dibandingkan dengan dimensi geometris *Wheelset*, deformasi tersebut relatif kecil sehingga tidak berpotensi mengganggu fungsi operasional maupun kontak roda–rel. Selain itu, nilai deformasi ini masih berada dalam batas elastis material *ASTM A36*, yang mengindikasikan bahwa tidak terjadi deformasi permanen pada struktur. Konsentrasi deformasi yang muncul pada bagian luar roda disebabkan oleh jalur distribusi beban vertikal yang langsung diteruskan ke area kontak roda dengan rel, sehingga area tersebut mengalami respons deformasi paling dominan.

B. *Tegangan utama maksimum (maximum principal stress)*

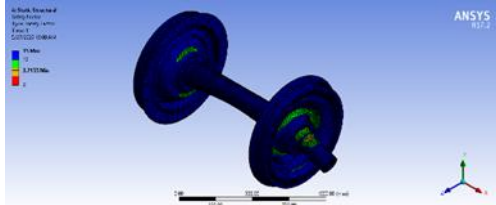


Gambar 7. *Maximum Principal Stress*
(Sumber: Pribadi)

Berdasarkan Gambar 7 hasil simulasi yang ditampilkan, nilai maksimum dari tegangan utama tercatat sebesar 64,281 MPa, sedangkan nilai minimum sebesar –5,6628 MPa, yang menunjukkan adanya distribusi tegangan tarik dan tekan pada komponen *Wheelset*. Tegangan maksimum terlokalisasi pada area sambungan antara roda dan poros (*axle hub*), di mana terjadi perubahan geometri dan penampang yang memicu peningkatan konsentrasi tegangan. Sebagian besar area *Wheelset* menunjukkan tegangan di bawah 40 MPa, ditunjukkan oleh gradasi warna hijau hingga biru. Dengan menggunakan material *Carbon Steel ASTM A36* yang memiliki batas luluh sekitar 250 MPa, nilai tegangan utama maksimum tersebut masih berada jauh di bawah batas elastis material. Jika dibandingkan dengan penelitian Supriyana dan Kholidin (2016), yang melaporkan tegangan maksimum poros roda kereta api pada kondisi

pembebanan statik berada pada kisaran di 100 Mpa [14]. Hasil tegangan pada penelitian ini masih berada dalam rentang yang sebanding dan aman.

C. Safety factor



Gambar 8. *Safety factor*
(Sumber: Pribadi)

Berdasarkan hasil simulasi pada Gambar 8, nilai minimum dari *safety factor* yang terjadi pada komponen *Wheelset* adalah sebesar 3.7155, sedangkan nilai maksimumnya mencapai 15. Nilai minimum ini masih menunjukkan tingkat keamanan yang sangat baik karena umumnya faktor keamanan minimal yang direkomendasikan dalam desain teknik mesin adalah antara 1,5 hingga 2,5 tergantung pada aplikasinya. Nilai faktor keamanan yang diperoleh pada penelitian ini berada jauh diatas batas minimal yang direkomendasikan, sehingga mengidentifikasi bahwa desain *Wheelset* bersifat konservatif dan memiliki cadangan kekuatan yang memadai. Kondisi ini sangat penting untuk komponen perkeretaapian yang beroperasi pada sistem keselamatan tinggi, di mana kegagalan struktur dapat berdampak signifikan terhadap keselamatan operasional. Oleh karena itu, hasil analisis faktor keamanan ini memperkuat bahwa desain *Wheelset* layak digunakan untuk kondisi pembebanan statik.

D. Evaluasi hasil analisis

Evaluasi terhadap hasil simulasi *Finite Element Analysis (FEA)* menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench 17.2, yang fokus pada tiga parameter simulasi yaitu *total deformation*, *Maximum Principal Stress*, dan *Safety factor*.

Tabel 3. Data Hasil Analisis *Wheelset*

No	Parameter	Batas	Hasil
1	<i>Total Deformation (mm)</i>	Min	0
		Max	0.24436
2	<i>Maximum Principal Stress (Mpa)</i>	Min	-5,6628
		Max	64,281
3	<i>Safety factor</i>	Min	3.7155
		Max	15

Tabel 3. digunakan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai respons struktural *Wheelset* terhadap pembebanan statik secara keseluruhan.

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil simulasi *Finite Element Analysis (FEA)* menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench 17.2. Dapat disimpulkan bahwa model *Wheelset* dengan material *Carbon Steel ASTM A36* masih berada dalam kondisi aman ketika menerima beban statik sebesar 200.000 N. Nilai deformasi maksimum sebesar 0,24436 mm menunjukkan bahwa *Wheelset* hanya mengalami deformasi elastis. Nilai tegangan maksimum sebesar 64.281 Mpa juga berada jauh dibawah nilai batas luluh material yaitu 250 Mpa, sehingga tidak terjadi adanya indikasi kegagalan material. Analisis faktor keamanan memperlihatkan nilai minimum sebesar 3.7155 menandakan bahwa *Wheelset* memiliki tingkat keamanan yang tinggi dan mampu bekerja dengan baik dalam kondisi pembebanan statik sesuai dengan batas operasionalnya. Dari keseluruhan menginformasikan bahwa konfigurasi material, kondisi batas dan model yang digunakan sudah memadai untuk menghasilkan simulasi yang representatif.

Untuk penelitian selanjutnya disarankan menambahkan analisis pembebanan dinamis untuk mensimulasikan kondisi sebenarnya, termasuk beban benturan, kelelahan material untuk mengetahui perilaku dari *Wheelset* terhadap beban berulang. Selain itu penggunaan material lain seperti paduan baja dengan kekuatan lebih tinggi dapat dibandingkan untuk melihat potensi peningkatan performa struktural. Penelitian juga dapat dikembangkan dengan melakukan *mesh*

refinement pada area kritis untuk mendapatkan hasil simulasi yang lebih detail.

UCAPAN TERIMA KASIH

Peneliti mengucapkan terimakasih yang sebesar besarnya kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan, bantuan, serta arahan selama proses penelitian. Apresiasi yang sebesar-besarnya disampaikan kepada dosen pembimbing yang telah memberikan bimbingan ilmiah, masukan, dan motivasi selama penyusunan penelitian ini.

REFERENSI

- [1] D. Devianto *et al.*, “An innovative model for capturing seasonal patterns of train passenger movement using exogenous variables and fuzzy time series hybridization,” *J. Open Innov. Technol. Mark. Complex.*, vol. 10, no. 1, hal. 100232, 2024, doi: 10.1016/j.joitmc.2024.100232.
- [2] L. Mahendra, “Konsep Alat Uji Ketidakseimbangan Dinamis *Wheelset* Kereta Api,” Universitas Gajah Mada, 2021.
- [3] A. Zulkarnain dan D. I. Kusuma, “Rancang Bangun Prototype Alat Pendeteksi *Wheel Flat* pada Sarana Kereta K3,” *Bul. Profesi Ins.*, vol. 5, no. 2, hal. 66–71, 2022.
- [4] R. Dahlan, “Analisis tegangan pada hollow axle kereta cepat CR 400 AF dengan metode elemen hingga,” vol. 18, no. 2, hal. 94–99, 2023.
- [5] S. A. Yudistirani, E. Diniardi, H. Basri, dan A. I. Ramadhan, “Analisa keausan dan faktor keamanan keluar rel pada kereta api lokomotif,” vol. 13, no. 2, 2021.
- [6] R. Lia, I. Yuwono, A. Tranggono, A. Salim, A. Prasetyo, dan M. Zainal, “Analisis Kekuatan Struktur *Bogie* Frame Kereta Ukur pada Kondisi Exceptional Loads,” vol. 6, no. 2, hal. 16–27, 2022.
- [7] Sumiyanto dan Abdunnuser, “Pengaruh Media Pendingin Terhadap Sifat Mekanik Dan Struktur Mikro Plat Baja Karbon ASTM A36,” *Tek. mesin*, vol. 11, no. 2, hal. 155–170, 2015.
- [8] S. A. Pranatagama, O. Kurdi, dan A. Widodo, “Analisis Perubahan Tegangan Pada Friction Block Kereta Api Cepat dengan Octagonal Menggunakan Finite Element Method,” *J. Tek. Mesin S-I*, vol. 12, no. 2, hal. 61–64, 2024.
- [9] I. M. Ilyasa, I. A. Hendaryanto, dan H. Winarno, Agustinus, “Analisis Kekuatan Struktur pada Desain Traction Rod Kereta Api Lokomotif dengan Metode *Finite Element Analysis* (FEA),” *J. Engine Energi, Manufaktur, dan Mater.*, vol. 8, no. 2, hal. 190–199, 2024.
- [10] A. B. Prasetyo, K. A. Sekarjati, dan I. P. A. Assagaf, “Analisis Frekuensi Natural Velg Ring 16 Menggunakan Finite Element Method,” vol. 2022, no. November 2021, hal. 354–359, 2022.
- [11] S. M. Utomo *et al.*, “Analisis Pembebanan Statik Pada Rangka *bogie* automatic people mover system (APMS) Menggunakan Standar UIC-615 Dengan Finite Element,” hal. 131–138, 2017.
- [12] I. C. Cruceanu dan Ş. Sorohan, “Determination of the Harmonic Response of a Railway *Wheelset* using The *Finite Element Analysis* Method,” *Procedia Manuf.*, vol. 47, hal. 173–179, 2020, doi: 10.1016/j.promfg.2020.03.026.
- [13] R. Safarudin, “Desain Purwarupa Alat Uji Ketidakseimbangan Dinamis pada Rangkaian Roda Kereta Api,” 2021.
- [14] N. Supriyana dan A. Kholidin, “Analisa Tegangan Poros Roda Gerbong Kereta Api Dengan Metode Elemen Hingga,” *Simetris J. Tek. Mesin, Elektro dan Ilmu Komput.*, vol. 7, no. 2, hal. 681, 2016, doi: 10.24176/simet.v7i2.781.
- [15] T. Setiazi *et al.*, “Analisis elemen hingga karakteristik suhu solid disc brake mobil 1,” *J. Tek. Mesin*, vol. 10, no. 4, hal. 547–550, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.437.
- [16] B. Asngali, A. Susanto, M. F. Subkhan, I. Martinez, K. Yamada, dan F. Majedi, “Static Analysis of Railway Axle using Finite Element Method and Monitoring of Railway Bearing Based on Vibration Analysis,” *J. Phys. Conf. Ser.*, hal. 1–7, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1845/1/012037.

- [17] M. Arifuddin dan A. I. Mahardika, *Modul Deformasi Zat Padat*, 1 ed. Banjarmasin: Universitas Lambung Mangkurat, 2023.
- [18] L. R. Wiradarma, M. R. F. Amrozi, dan S. Siswosukarto, “Analisis Dampak Penambahan Beban Gandar Kereta Api terhadap Struktur Jalan Rel,” *Simp. Nas. Teknol. Infrastruktur*, hal. 1–8, 2024.