

Studi Komparatif Kekuatan Struktural Dua Desain Poros Gandar Kereta Api Menggunakan FEA (ANSYS Workbench)

Ganda Putra Firmansyah¹, Ferly Isnomo Abdi^{2*}, Andita Nataria Fitri Ganda³,
Tinton Davareza⁴, Dio Dwi Mubarak⁵

^{1,3,4,5}Teknik Mesin, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia 60231

²Teknologi Rekayasa Otomotif, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia 60231

E-mail: *ferlyabdi@unesa.ac.id

Abstrak: Poros roda (*axle*) kereta api merupakan komponen vital yang berfungsi menopang beban kendaraan serta menjaga kestabilan dan keselamatan operasi. Kegagalan pada poros dapat menimbulkan dampak serius sehingga diperlukan evaluasi desain yang andal. Penelitian ini bertujuan membandingkan kinerja struktural dua model poros roda kereta api (Model A dan Model B) akibat pembebanan statik vertikal menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA). Analisis dilakukan menggunakan *ANSYS Workbench* dengan pembebanan maksimum sebesar 22,5 ton sesuai standar Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor 60 Tahun 2012. Parameter yang dianalisis meliputi tegangan ekuivalen *Von Mises*, deformasi total, dan faktor keamanan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa Model A menghasilkan tegangan maksimum sebesar 172,88 MPa, deformasi maksimum 0,52865 mm, dan faktor keamanan minimum 1,2784, sedangkan Model B menghasilkan tegangan maksimum 328,91 MPa, deformasi maksimum 0,55679 mm, dan faktor keamanan minimum 0,67193. Tegangan maksimum Model A masih berada di bawah batas luluh material ASTM A36 sebesar 250 MPa, sementara Model B melampaui batas tersebut. Berdasarkan hasil ini, Model A memiliki margin keamanan struktural yang lebih baik terhadap pembebanan statik. Penelitian ini memberikan dasar evaluasi desain poros roda kereta api serta menunjukkan perlunya analisis lanjutan dengan pembebanan kombinasi dan evaluasi kelelahan untuk memastikan umur layanan jangka panjang.

Kata kunci: poros kereta api, *finite element analysis*, deformasi, faktor keamanan, tegangan *von mises*.

Abstract: Railway wheelset axles are critical components that support vehicle loads and ensure operational stability and safety. Axle failure may lead to severe consequences; therefore, reliable structural evaluation is essential. This study aims to compare the structural performance of two railway axle models (Model A and Model B) under static vertical loading using *Finite Element Analysis* (FEA). The Analysis was conducted using *ANSYS Workbench* with a maximum load of 22.5 tons in accordance with the Indonesian Ministry of Transportation Regulation No. 60 of 2012. The evaluated parameters include *Von Mises* equivalent stress, total deformation, and safety factor. Simulation results indicate that Model A produces a maximum stress of 172.88 MPa, a maximum deformation of 0.52865 mm, and a minimum safety factor of 1.2784, while Model B exhibits a maximum stress of 328.91 MPa, a maximum deformation of 0.55679 mm, and a minimum safety factor of 0.67193. The maximum stress in Model A remains below the ASTM A36 yield strength of 250 MPa, whereas Model B exceeds this limit. These results demonstrate that Model A provides a better structural safety margin under static loading. This study offers a fundamental basis for railway axle design evaluation and highlights the need for further Analysis involving combined loading conditions and fatigue assessment to ensure long-term service life.

Keywords: deformation, *finite element analysis*, railway axle, safety factor, *von mises* stress.

© 2026, JRM (Jurnal Rekayasa Mesin) dipublikasikan oleh ejournal Teknik Mesin Fakultas Vokasi UNESA.

PENDAHULUAN

Kereta api sebagai teknologi transportasi yang berkembang pesat memiliki banyak keunggulan, seperti efisiensi bahan bakar, waktu, keamanan, dan kemampuan mengangkut beban besar [1]. Seiring meningkatnya kebutuhan akan perjalanan antarkota maupun komuter harian, maka sistem kereta api dituntut untuk terus meningkatkan layanan dari sisi efisiensi energi, keandalan operasi, dan kenyamanan pengguna [2]. Selain itu, aspek keselamatan menjadi perhatian utama, mengingat potensi dampak besar dari

setiap kegagalan komponen dalam sistem transportasi ini [3].

Poros (*Axle*) pada roda kereta api merupakan komponen yang menghubungkan antara dua roda, dan menghubungkan wheelset dengan bogie kereta. Poros ini menghubungkan dan menanggung beban statik dari berat kereta serta beban dinamis yang terjadi selama pengoperasian seperti getaran dan benturan. Peran utamanya adalah mentransmisikan tenaga putar dari motor traksi ke roda, memungkinkan kereta api bergerak [4]. Posisi *axle* yang tertanam dalam struktur

bogie membuatnya sangat vital dalam menjaga stabilitas dan keamanan operasi kereta [5]. Namun, *axle* sangat rentan terhadap kerusakan akibat beban siklik selama perjalanan, terutama pada jalur berkecepatan tinggi atau saat terjadi getaran resonansi yang tidak teredam dengan baik [6]. Beban dinamis dan getaran ini dapat memicu kelelahan material (*fatigue*), yang berujung pada retakan mikro dan potensi patahnya *axle*, sehingga pemantauan dan desain yang cermat sangat diperlukan [7].

Kegagalan pada poros roda (*axle*) kereta api merupakan salah satu isu krusial dalam keselamatan perkeretaapian, mengingat komponen ini berperan vital dalam menyalurkan beban statis dan dinamis dari struktur kereta ke rel [8]. Kasus-kasus kegagalan *axle* yang dilaporkan di Indonesia maupun global umumnya diawali dengan retakan mikro akibat kelelahan material (*fatigue*) yang berkembang secara progresif hingga menyebabkan patah total dan lepasnya roda dari jalur [8]. Tantangan dalam desain *axle* tidak hanya terletak pada pembebanan vertikal konstan dari bobot kereta, tetapi juga gaya dinamis kompleks seperti gaya sentrifugal saat menikung, serta kejutan (*shock loads*) dari ketidakrataan permukaan rel. Akumulasi siklus tegangan inilah yang mempercepat kegagalan lelah, terutama jika material dan geometri *axle* tidak dirancang dengan optimal [9]. Oleh karena itu, analisis berbasis *Finite Element method* (FEM) menjadi solusi penting untuk memetakan distribusi tegangan maksimum, memvalidasi struktur *axle*, dan menyesuaikan dimensi atau bentuk terhadap titik kritis kegagalan [10]. Selain simulasi numerik, pemilihan material logam berkekuatan tinggi dengan ketahanan terhadap *fatigue* dan peredaman getaran sangat direkomendasikan untuk meminimalkan pengaruh resonansi dan vibrasi frekuensi tinggi yang sering terjadi pada kecepatan tinggi [11].

Perkembangan teknologi telah mendorong peralihan signifikan dari metode analisis struktur konvensional menuju pendekatan berbasis simulasi numerik, terutama dengan penerapan *Finite Element Analysis* (FEA) dalam bidang teknik perkeretaapian [12]. FEA memberikan kemampuan untuk memodelkan struktur secara detail dan realistis, sehingga memungkinkan prediksi yang akurat terhadap distribusi tegangan, deformasi, serta titik kegagalan pada komponen mekanis seperti *axle* kereta api [13]. Penggunaan simulasi FEA dalam proses desain dan optimasi komponen kereta memberikan efisiensi yang tinggi dalam hal waktu, biaya, dan keselamatan, terutama pada fase prototipe digital sebelum produksi [8]. Namun, kajian literatur menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian masih berfokus pada desain *axle* standar tanpa membandingkan variasi model *axle* secara menyeluruh dari segi performa struktur, terutama terkait distribusi tegangan dan displacement [14]. Minimnya eksplorasi mengenai faktor keamanan antara berbagai desain *axle* mengindikasikan adanya

kesenjangan penelitian yang perlu dijawab melalui studi komparatif. Studi semacam ini penting untuk memberikan dasar objektif dalam pemilihan desain *axle* yang optimal, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan keandalan operasional kereta api di masa mendatang.

Berdasarkan kajian literatur, belum banyak penelitian yang membahas analisis komparatif variasi geometri *axle* kereta api terhadap respons tegangan, deformasi, dan faktor keamanan pada kondisi beban gandar maksimum, khususnya pada standar jalan rel kelas I. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis dan membandingkan kinerja struktural beberapa model geometri *axle* kereta api menggunakan pendekatan *Finite Element Analysis* (FEA) pada beban gandar sebesar 22,5 ton. Kontribusi penelitian ini diharapkan mampu mengidentifikasi area kritis tegangan serta memberikan rekomendasi desain geometri *axle* yang lebih aman dan andal untuk mendukung keselamatan operasional kereta api.

DASAR TEORI

Poros (*Axle*) Kereta Api

Poros roda kereta api merupakan komponen utama dalam sistem bogie yang berfungsi menghubungkan dua roda dan menopang berbagai beban selama operasi, meliputi beban vertikal dari berat kendaraan, beban lateral saat kereta melewati tikungan, serta momen torsi akibat proses pengereman dan akselerasi [15]. Kombinasi pembebanan tersebut menyebabkan poros mengalami kondisi lentur, puntir, dan beban dinamis berulang yang berpotensi menimbulkan kelelahan material, khususnya pada area transisi diameter atau *fillet* yang menjadi lokasi konsentrasi tegangan tinggi akibat perubahan geometri [16], [17]. Berdasarkan konstruksinya, poros roda kereta api umumnya diklasifikasikan menjadi poros padat dan poros berongga, di mana poros padat memiliki kekuatan struktural tinggi dan banyak digunakan pada kereta konvensional, sedangkan poros berongga menawarkan pengurangan massa yang signifikan sehingga meningkatkan efisiensi energi, meskipun menuntut proses manufaktur yang lebih presisi untuk mencegah cacat mikro [18], [19]. Oleh karena itu, perancangan poros roda modern sangat bergantung pada pemilihan material yang tepat serta dukungan analisis elemen hingga untuk mengevaluasi distribusi tegangan dan deformasi, sehingga umur layanan poros dapat ditingkatkan dan risiko kegagalan dini dapat diminimalkan [20], [21].

Material Baja ASTM A36

Baja karbon ASTM A36 merupakan salah satu material struktur yang banyak dimanfaatkan dalam bidang teknik karena perpaduan antara kekuatan, keuletan, serta ketersediaannya yang melimpah. Karakteristik mekanik utama yang digunakan dalam analisis simulasi biasanya mencakup Modulus Elastisitas, rasio *Poisson*, tegangan luluh (*yield strength*), dan densitas. Kombinasi sifat-sifat tersebut

menjadikan ASTM A36 sangat sesuai untuk komponen struktural yang menahan beban statis dengan intensitas menengah hingga tinggi. Berdasarkan hasil studi eksperimental dan karakterisasi material di Indonesia, sifat mekanik dasar baja ASTM A36 menunjukkan konsistensi pada sampel pelat, serta memperlihatkan pengaruh signifikan dari proses perlakuan panas maupun pengelasan terhadap performa mekanisnya. Oleh karena itu, parameter standar material ini dapat digunakan sebagai acuan awal yang andal dalam proses simulasi berbasis *Finite Element Analysis* (FEA) [22].

Tabel I. Sifat Kimia ASTM A36

| Properti | Komposisi (wt%) | Properti | Komposisi (wt%) |
|----------|-----------------|----------|-----------------|
| Fe | 98,0 | Cu | 0,20 |
| C | 0,27 | S | 0,050 |
| Mn | 1,03 | P | 0,040 |
| Si | 0,28 | | |

Sumber : [23]

Tabel II. Sifat Mekanik ASTM A36

| Properti | Nilai | Satuan | Keterangan |
|---------------------------------------|---------|------------------|------------------------------|
| <i>Density</i> | 7,85 | g/m ³ | Massa jenis |
| <i>Young's Modulus</i> | 200.000 | Mpa | Modulus elastisitas |
| <i>Tensile Strength (Ultimate)</i> | 400-500 | Mpa | Kekuatan tarik maksimum |
| <i>Yield Strength (σ_y)</i> | 250 | Mpa | Batas elastis/tegangan luluh |
| <i>Shear Modulus (G)</i> | 78 | Gpa | Modulus geser |

Sumber : [24]

Sifat material memiliki peranan yang sangat penting dalam menentukan respons struktural pada roda. Modulus Elastisitas berfungsi sebagai penentu tingkat kekakuan keseluruhan, di mana nilai *E* yang lebih tinggi akan menghasilkan deformasi elastis yang lebih kecil ketika menerima beban dengan besar yang sama. Sementara itu, *Yield Strength* menjadi batas awal terjadinya deformasi plastis dan digunakan sebagai dasar dalam perhitungan *safety factor*. Selain itu, aspek mikrostruktur material yang dapat berubah akibat proses pendinginan atau pengelasan dapat mempengaruhi kekuatan tarik serta keuletan baja, sehingga berdampak langsung pada distribusi tegangan dan ketahanan terhadap kelelahan dalam jangka panjang. Sejumlah penelitian di tingkat nasional juga menunjukkan bahwa variasi pada perlakuan termal dan proses pengelasan memberikan pengaruh nyata terhadap sifat mekanik baja ASTM A36, sehingga faktor-faktor tersebut perlu diperhitungkan ketika hasil simulasi dibandingkan dengan karakteristik komponen hasil produksi aktual [25].

Tegangan Von Mises

Tegangan ekuivalen *Von Mises* (σ_e) merupakan besaran skalar yang digunakan untuk mengevaluasi kemungkinan terjadinya luluh (*yielding*) pada material

ulet yang mengalami kombinasi tegangan normal dan geser dalam kondisi multiaxial. Konsep ini didasarkan pada teori energi distorsi, yang menyatakan bahwa deformasi plastis akan terjadi ketika energi distorsi mencapai nilai kritis yang setara dengan kondisi luluh pada uji tarik satu arah. Dengan demikian, kriteria *Von Mises* memungkinkan kondisi pembebanan kompleks disetarakan menjadi satu nilai tegangan ekuivalen yang dapat langsung dibandingkan dengan batas luluh material [26]. Besarnya tegangan ekuivalen *Von Mises* dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$\sigma_e = \frac{1}{2} [(\sigma_x + \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{xz}^2)]^{\frac{1}{2}} \tag{1}$$

Sumber : [27]

Dimana:

σ = tegangan normal (MPa)

τ = tegangan geser (MPa)

Nilai σ_e yang diperoleh dari hasil simulasi kemudian dibandingkan dengan *yield strength* material untuk menilai tingkat keamanan desain, di mana nilai σ_e yang berada di bawah batas luluh menunjukkan bahwa struktur masih berada dalam kondisi elastis dan aman dari deformasi plastis permanen [27]. Pendekatan ini banyak digunakan dalam analisis struktur perubahan baja karena efektif dalam memprediksi distribusi tegangan dan mengidentifikasi area konsentrasi tegangan tinggi, sehingga pada penelitian ini tegangan *Von Mises* dijadikan parameter utama dalam evaluasi dan perbandingan kinerja struktural desain poros roda kereta api sebelum dianalisis lebih lanjut dari sisi deformasi dan faktor keamanan.

Total Deformation

Total deformation merupakan besaran yang menunjukkan perpindahan keseluruhan suatu struktur akibat pengaruh beban eksternal, baik statik maupun dinamik, yang dihitung sebagai perpindahan maksimum titik-titik pada struktur terhadap posisi awalnya. Dalam analisis menggunakan *Finite Element Analysis* (FEA), nilai ini diperoleh melalui perhitungan numerik dengan mempertimbangkan sifat material, kondisi batas, serta distribusi gaya pada setiap elemen, sehingga dapat digunakan sebagai indikator kestabilan struktur dan kesesuaian desain terhadap batas perpindahan yang diizinkan oleh standar teknis. Parameter total deformation juga berperan dalam mengidentifikasi area kritis yang berpotensi mengalami defleksi berlebih dan memengaruhi kinerja sistem secara keseluruhan [28]. Besarnya deformasi total pada suatu titik dapat dihitung menggunakan persamaan dibawah ini yang merepresentasikan perpindahan resultan dari ketiga arah tersebut.

$$TD = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \tag{2}$$

Sumber : [29]

Dalam konteks rekayasa struktur logam, nilai total deformation digunakan untuk menilai kemampuan struktur dalam menahan beban tanpa mengalami deformasi permanen yang signifikan, di

mana deformasi yang melampaui batas desain dapat mengindikasikan risiko kegagalan struktural. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa analisis deformasi total berbasis FEA efektif dalam memvisualisasikan respons struktur dan memprediksi lokasi defleksi maksimum pada komponen mekanis, sehingga dapat dijadikan dasar verifikasi desain sebelum dilakukan evaluasi lanjutan terhadap tegangan ekuivalen dan faktor keamanan [30], [31].

Safety Factor

Faktor keamanan (*safety factor*) merupakan parameter penting dalam analisis desain teknik yang digunakan untuk memastikan struktur bekerja dengan aman di bawah berbagai kondisi beban. Secara umum, faktor keamanan didefinisikan sebagai rasio antara kekuatan maksimum material terhadap tegangan maksimum yang terjadi selama operasi, dinyatakan dalam persamaan:

$$SF = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{maks}} \tag{3}$$

Sumber : [32]

Dimana:

SF = Faktor Keamanan

σ_{yield} = Tegangan luluh material (MPa)

σ_{maks} = Tegangan maksimum (MPa)

Nilai faktor keamanan menunjukkan margin keselamatan suatu komponen terhadap kegagalan akibat beban berlebih. Menurut Marpaung, Wibowo dan Harmadi (2022), penggunaan *Finite Element Analysis* (FEA) membantu menentukan nilai faktor keamanan secara akurat dengan memvisualisasikan distribusi tegangan dan memprediksi titik kritis pada struktur baja. Dalam praktiknya, standar internasional seperti ASME dan ISO umumnya mensyaratkan nilai *SF* lebih besar dari 1,5 agar struktur dinilai aman terhadap deformasi plastis. Nilai faktor keamanan (*safety factor*) dibagi menjadi tiga kategori, seperti yang tertera dalam tabel berikut:

Tabel III. Nilai Faktor Keamanan (*Safety Factor*)

| Zona Faktor Keamanan | Rentang Nilai SF | Keterangan |
|----------------------|------------------------|---------------------------------|
| Aman | $SF > 1.5$ | Struktur memiliki cadangan kuat |
| Kritis | $1.0 \leq SF \leq 1.5$ | Dekati batas leleh |
| Tidak Aman | $SF < 1.0$ | Potensi deformasi atau gagal |

Sumber : [9]

Dalam penerapannya, faktor keamanan tidak hanya menilai kekuatan terhadap beban statis, tetapi juga mempertimbangkan efek dinamis, kelelahan, dan kemungkinan terjadinya deformasi jangka panjang. Nilai *SF* yang rendah menandakan bahwa tegangan kerja mendekati kekuatan luluh material, sehingga struktur berisiko mengalami kerusakan atau retak awal akibat pembebanan berulang. Pada penelitian Wibowo, Zaenudin dan Saleh, (2025) menunjukkan bahwa pada analisis as roda *dump truck* berbahan baja AISI 1035, nilai *SF* di bawah 1,2 mengindikasikan potensi kegagalan akibat tegangan berlebih pada daerah fillet. Sementara itu, penelitian [33] pada

struktur baja galvanis memperlihatkan bahwa nilai *SF* di atas 2 dianggap optimal untuk menahan beban dinamis tanpa deformasi plastis permanen. Dengan demikian, perhitungan faktor keamanan menjadi elemen kunci dalam memastikan integritas dan keandalan struktur hasil simulasi FEA.

Finite Element Analysis (FEA)

Metode Elemen Hingga (*Finite Element Analysis/FEA*) merupakan metode numerik yang digunakan untuk menyelesaikan permasalahan mekanika kontinu dengan cara mendiskretisasi struktur menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung pada titik simpul (*node*). Setiap elemen direpresentasikan oleh persamaan matematis yang menggambarkan hubungan antara gaya, tegangan, dan deformasi. Pendekatan ini memungkinkan analisis perilaku struktur yang kompleks seperti tegangan maksimum, distribusi regangan, serta perpindahan total akibat beban kerja tertentu. Menurut Kurniawan, Romahadi dan Fitri (2023), FEA banyak diterapkan pada bidang teknik mesin dan struktur karena akurasi tinggi dalam memprediksi respon material terhadap beban.

Tabel IV. Langkah – Langkah Dalam Analisis FEA

| Tahapan | Deskripsi |
|--------------------------|---|
| <i>Pre - processing</i> | Membuat model geometri, mendefinisikan material, dan melakukan meshing. |
| <i>Processing</i> | Menentukan kondisi batas dan pembebanan, serta menjalankan solver. |
| <i>Post - processing</i> | Menganalisis hasil berupa tegangan, deformasi, dan faktor keamanan. |

Sumber : Penulis

Proses ini memberi peluang bagi perancang untuk melakukan *what-if Analysis*, yakni membandingkan berbagai alternatif desain secara virtual melalui simulasi komputer, tanpa perlu membuat prototipe fisik, sehingga lebih hemat waktu dan biaya [35].

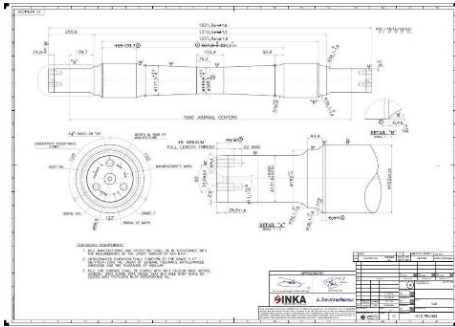
METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan analisis numerik berbasis *Finite Element Analysis (FEA)* untuk menganalisis kekuatan struktural dua model poros roda kereta api (*axle*) dengan geometri berbeda. Tahapan metode penelitian meliputi pembuatan model 3D, pemilihan material, penentuan kondisi batas, pemberian beban kerja, dan analisis hasil menggunakan perangkat *software ANSYS Workbench 17.2*. Seluruh tahapan dilakukan dengan tujuan mengevaluasi pengaruh perbedaan geometri terhadap tegangan *Von Mises*, deformasi total, serta faktor keamanan poros roda kereta api.

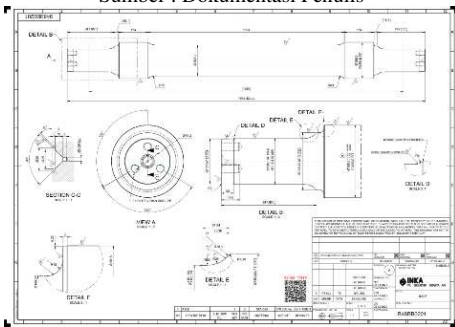
Desain 2D dan Model Geometri Poros Kereta

Dalam penelitian ini, dua model poros roda kereta api (*Axle*) dipilih berdasarkan gambar teknik yang lazim digunakan pada industri perkeretaapian di Indonesia. Pemilihan dua model ini bertujuan untuk membandingkan karakteristik kekuatan akibat variasi geometri poros, sehingga dapat dianalisis bagaimana

perbedaan desain memengaruhi distribusi tegangan dan performa struktural poros roda pada kondisi beban operasional.



Gambar 1. Desain 2D Poros Kereta Model A
Sumber : Dokumentasi Penulis



Gambar 2. Desain 2D Poros Kereta Model B
Sumber : Dokumentasi Penulis

Perbedaan kunci antara kedua model *axle* tersebut terletak pada dimensi dan bentuk geometrisnya. Model A memiliki panjang total sekitar 1820 mm, dengan diameter poros tengah yang meruncing, diameter tumpuan bogie lebih besar, dan diameter tumpuan roda juga lebih besar. Sebaliknya, Model B memiliki panjang total sedikit lebih panjang, namun diameter poros tengah yang sejajar, dengan diameter tumpuan bogie dan tumpuan roda yang lebih kecil dibanding Model A. Selain itu, area transisi pada Model A menggunakan radius transisi yang lebih kecil dibanding Model B yang memiliki radius transisi lebih besar untuk mengurangi konsentrasi tegangan. Berikut dibawah ini tabel ringkasan perbandingan dimensi desain poros roda Model A dan B dengan satuan mm.

Tabel V. Ringkasan Perbandingan Dimensi Desain Poros Model A dan B

| Geometri | Dimensi (mm) | | Keterangan |
|-------------------------------------|--------------|----------|----------------------------------|
| | Model A | Model B | |
| Panjang Poros | 1821,8 | 1865,42 | Panjang keseluruhan poros |
| Diameter Bogie | ∅ 131,8 | ∅ 119,16 | Menumpu bogie |
| Diameter Roda | ∅ 192 | ∅ 188,5 | Ditumpu roda |
| Diameter Poros (Sedikit mengerucut) | ∅ 171,5 | ∅ 160 | Diameter tengah |
| Panjang Poros Tengah | 834,3 | 1024 | Panjang keseluruhan poros tengah |

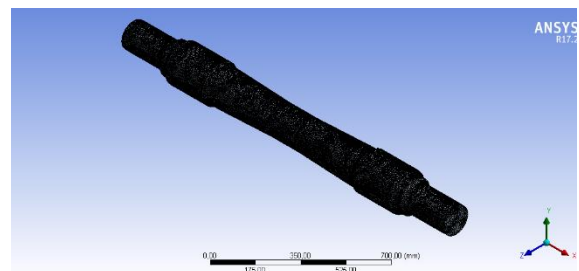
Sumber : Penulis

Pemilihan Material

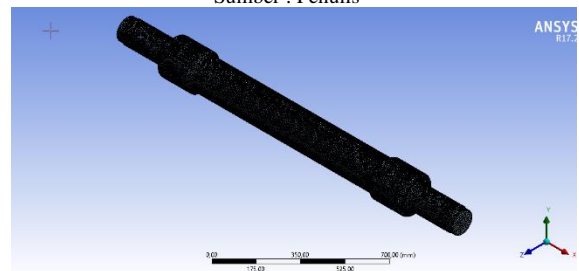
Material memiliki peran yang sangat penting dalam analisis struktur poros kereta api, karena karakteristik mekaniknya secara langsung memengaruhi respons terhadap beban yang bekerja. Dalam penelitian ini digunakan baja karbon ASTM A36, yang umum diaplikasikan pada komponen struktural dan transportasi karena menawarkan kombinasi yang baik antara kekuatan tarik, keuletan, kemudahan proses fabrikasi, serta ketersediaan material yang melimpah. Parameter mekanik utama yang digunakan dalam simulasi meliputi Modulus Elastisitas, *Poisson's Ratio*, *Yield Strength*, dan *Density* sebagaimana disajikan pada Tabel II. Nilai-nilai tersebut digunakan untuk memastikan bahwa hasil analisis numerik dapat merepresentasikan perilaku material secara realistis. Parameter mekanik ini juga menjadi dasar dalam perhitungan tegangan dan deformasi akibat beban vertikal yang diterima roda, sehingga memungkinkan evaluasi yang lebih akurat terhadap kinerja struktural dari setiap variasi desain.

Pemberian Meshing

Pada tahap pemberian *mesh*, model poros kereta api yang telah diimpor ke dalam ANSYS Workbench 17.2 diproses menggunakan metode *meshing* berbasis elemen solid tetrahedral. Metode ini dipilih karena mampu menyesuaikan dengan geometri poros yang kompleks serta memberikan distribusi elemen yang merata pada seluruh bagian model. Ukuran elemen *mesh* ditetapkan sebesar 5 mm untuk menghasilkan keseimbangan antara tingkat ketelitian hasil simulasi dan efisiensi waktu komputasi. Visualisasi hasil *meshing* pada model poros ditunjukkan pada gambar berikut.



Gambar 3. Mesh 3D Poros Kereta Model A
Sumber : Penulis



Gambar 4. Mesh 3D Poros Kereta Model B
Sumber : Penulis

Pemberian *mesh* bertujuan untuk membagi geometri poros menjadi elemen-elemen kecil sehingga perhitungan numerik pada metode elemen hingga

dapat dilakukan secara akurat. Kerapatan *mesh* yang digunakan telah mempertimbangkan area-area kritis seperti perubahan diameter dan *fillet*, yang berpotensi mengalami konsentrasi tegangan. Dengan pengaturan *mesh* yang sesuai, hasil analisis diharapkan mampu merepresentasikan distribusi tegangan dan deformasi poros secara realistis.

Tabel VI. Jumlah Node dan Elemen pada Model Poros

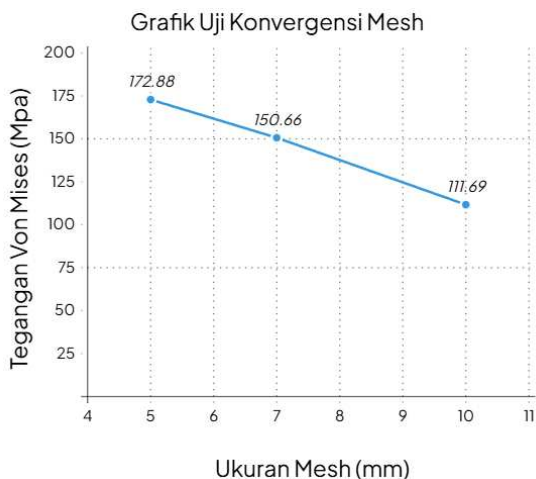
| Parameter | Deskripsi | |
|----------------|-----------|---------|
| | Model A | Model B |
| Jumlah Node | 337336 | 331449 |
| Jumlah Element | 197420 | 193282 |
| Ukuran Mesh | 5 mm | |

Sumber: Penulis

Berdasarkan hasil proses *meshing*, diperoleh jumlah node dan elemen yang memadai untuk mendukung analisis elemen hingga secara stabil. Jumlah node dan elemen tersebut menunjukkan bahwa model telah terdiskretisasi dengan baik tanpa menghasilkan beban komputasi yang berlebihan. Dengan demikian, *mesh* yang digunakan dianggap telah memenuhi kebutuhan analisis dan dapat digunakan sebagai dasar untuk tahap simulasi selanjutnya.

Uji Konvergensi Mesh

Uji konvergensi *mesh* dilakukan untuk memastikan bahwa hasil simulasi numerik tidak dipengaruhi secara signifikan oleh variasi ukuran elemen *mesh*. Parameter yang digunakan dalam uji konvergensi ini adalah tegangan *Von Mises* maksimum, karena parameter tersebut sensitif terhadap perubahan kerapatan *mesh* dan umum digunakan dalam evaluasi kekuatan material. Pengujian dilakukan dengan memvariasikan tingkat *mesh*, yaitu tingkat 5, 7, dan 10, kemudian membandingkan hasil tegangan *Von Mises* yang diperoleh pada setiap variasi *mesh*.



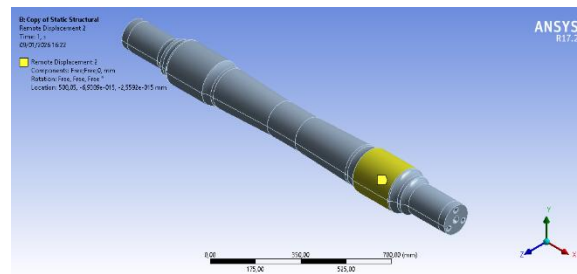
Gambar 5. Grafik Hasil Uji Konvergensi Mesh
Sumber : Penulis

Hasil uji menunjukkan bahwa semakin besar tingkat *mesh* yang digunakan, nilai tegangan *Von Mises* yang dihasilkan semakin kecil, yang mengindikasikan bahwa peningkatan kerapatan *mesh*

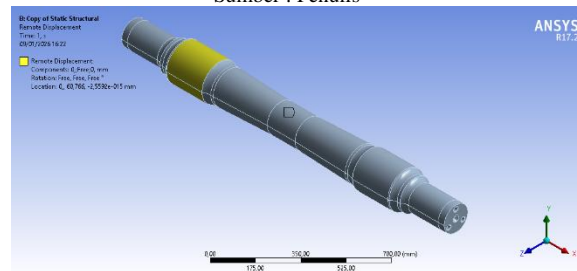
menghasilkan representasi geometri yang lebih halus dan mengurangi efek konsentrasi tegangan numerik. Pada penelitian ini, *mesh* tingkat 5 dipilih sebagai *mesh* analisis, dengan pertimbangan bahwa *mesh* tersebut telah mampu merepresentasikan respons tegangan poros secara memadai serta memberikan keseimbangan antara tingkat akurasi hasil dan efisiensi waktu komputasi.

Boundary Conditions dan Pembebanan

Pendekatan kondisi batas pada penelitian ini didasarkan pada teori dasar bantalan (*bearing*) sebagai elemen mesin yang berfungsi membatasi gerak relatif poros agar tetap bergerak pada arah yang diinginkan serta menopang beban kerja yang diterima poros. Secara teoritis, *bearing* berperan menjaga poros tetap berputar terhadap sumbunya sekaligus menahan beban radial, aksial, maupun kombinasi keduanya sesuai klasifikasinya [36]. Dalam sistem *wheelset* kereta api, poros roda ditopang oleh *bearing* yang umumnya bekerja menahan beban radial akibat berat kereta, serta sebagian beban aksial akibat gaya operasi, sehingga secara fungsional termasuk dalam kategori bantalan kombinasi. Oleh karena itu, pemodelan penumpuan poros menggunakan *remote displacement* pada dua lokasi *wheelset* dipilih untuk merepresentasikan perilaku *bearing* secara lebih realistis dibandingkan penggunaan *fixed support*.



Gambar 6. Remote Displacement pada Bearing Kanan Poros
Sumber : Penulis



Gambar 7. Remote Displacement pada Bearing Kiri Poros
Sumber : Penulis

Penerapan dua *remote displacement* pada sisi kanan dan kiri poros mengikuti prinsip kerja sistem bantalan, di mana satu *bearing* berfungsi sebagai *locating bearing* yang membatasi perpindahan aksial poros, sedangkan *bearing* lainnya berfungsi sebagai *floating bearing* yang membebaskan perpindahan aksial. Konsep ini sejalan dengan teori bantalan yang menyatakan bahwa pembatasan gerak aksial tidak boleh dilakukan pada kedua sisi poros secara

bersamaan karena dapat menimbulkan tegangan tambahan akibat pemuaian termal dan ketidaksejajaran [36]. Dengan pengaturan ini, poros tetap mampu mengalami deformasi lentur dan rotasi secara alami, sementara beban radial dan aksial dapat disalurkan sesuai fungsi bearing dalam sistem nyata.

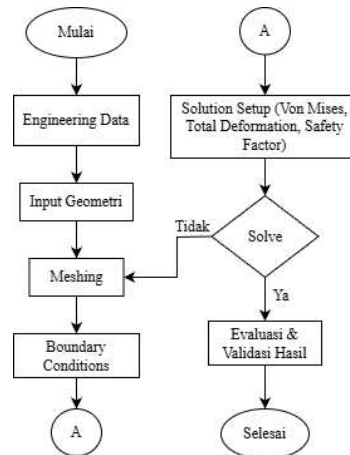


Gambar 8. Penerapan Beban Gaya pada Ujung Poros
Sumber : Penulis

Pembebanan pada poros dimodelkan sebagai gaya tekan vertikal yang merepresentasikan beban gandar maksimum, di mana beban ini secara fisik diteruskan dari struktur *bogie* ke poros melalui sistem *bearing*. Sesuai dengan teori bantalan radial dan kombinasi, beban vertikal utama yang diterima poros akan ditahan oleh bearing dalam arah radial. Besarnya gaya ditentukan berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor 60 Tahun 2012 yang menetapkan beban gandar maksimum sebesar 22,5 ton untuk jalur kelas I [37], sehingga pada analisis ini digunakan beban sebesar 22,5 ton atau setara dengan 220.725 N. Kombinasi antara pemodelan *remote displacement* sebagai representasi bantalan dan penerapan beban sesuai standar regulasi memungkinkan simulasi menghasilkan respons global poros yang konsisten dengan prinsip kerja bearing dalam sistem *wheelset* kereta api, meskipun roda dan bogie tidak dimodelkan secara eksplisit.

Prosedur Analisis

Analisis pada penelitian ini dilakukan menggunakan modul *Static Structural* dalam perangkat lunak *ANSYS Workbench* untuk mempelajari respons mekanik kedua model poros kereta api akibat pembebanan statik. Pendekatan ini digunakan untuk merepresentasikan kondisi awal beban vertikal tanpa mempertimbangkan efek dinamis, sehingga distribusi tegangan dan deformasi dapat diamati secara jelas sebagai dasar evaluasi kekuatan struktural desain sebelum dilakukan analisis lanjutan.



Gambar 9. Diagram Alir Analisis di Ansys
Sumber : Penulis

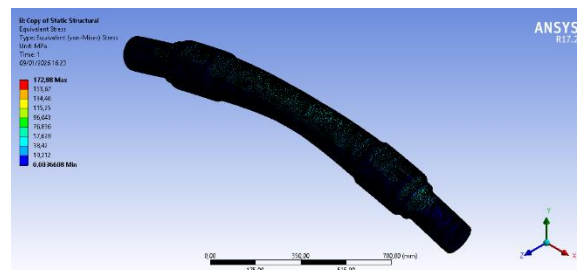
Evaluasi hasil dilakukan dengan membandingkan Model A dan Model B berdasarkan tiga parameter utama, yaitu tegangan ekuivalen, deformasi total, dan faktor keamanan. Desain poros dinilai lebih optimal apabila menghasilkan tegangan dan deformasi yang lebih rendah serta faktor keamanan yang lebih tinggi, sehingga mampu menahan beban secara lebih andal dan aman dalam mendukung operasi kereta api.

HASIL DAN PEMBAHASAN

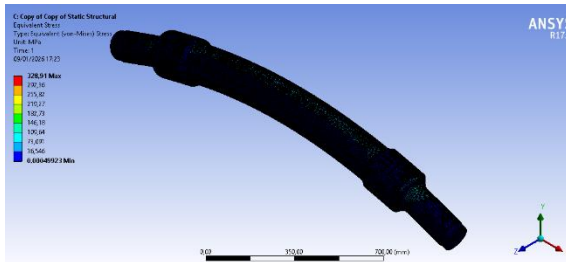
Pada tahap ini dilakukan analisis hasil simulasi menggunakan *ANSYS Workbench 17.2* untuk mengevaluasi respons struktural dua model poros roda kereta api, yaitu Model A dan Model B. Parameter utama yang dianalisis meliputi Tegangan *Von Mises*, *Total Deformation*, dan *Safety Factor*, yang digunakan untuk menggambarkan perilaku mekanik poros terhadap pembebanan statik vertikal yang bekerja pada sumbu Y. Hasil analisis ini digunakan untuk membandingkan kinerja kedua model serta menilai tingkat keamanan struktur berdasarkan batas kekuatan material ASTM A36.

Tegangan Von Mises

Analisis tegangan *Von Mises* dilakukan untuk mengidentifikasi besarnya tegangan maksimum yang terjadi serta lokasi konsentrasi tegangan pada kedua model poros akibat pembebanan statik.



Gambar 10. Distribusi Tegangan *Von Mises* Model A
Sumber : Penulis

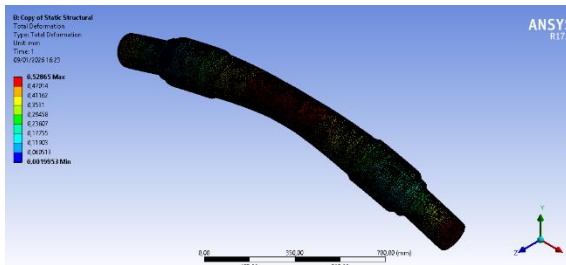


Gambar 11. Distribusi Tegangan Von Mises Model B
Sumber : Penulis

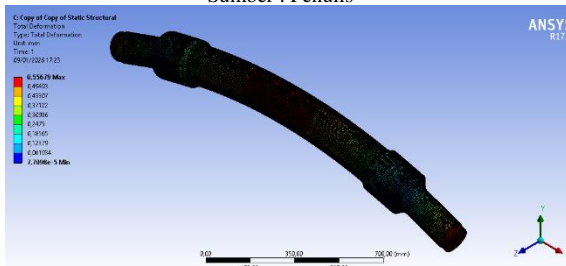
Hasil simulasi menunjukkan bahwa Model A mengalami tegangan *Von Mises* maksimum sebesar 172,88 MPa, sedangkan Model B mencapai 328,91 MPa. Tegangan maksimum pada kedua model terjadi pada area transisi diameter poros yang merupakan titik kritis akibat perubahan geometri. Nilai tegangan maksimum Model A tercatat lebih rendah sekitar 47,4% dibandingkan Model B. Selain itu, nilai tegangan maksimum pada Model A masih berada di bawah batas luluh material ASTM A36 sebesar 250 MPa, sehingga secara struktural masih berada dalam kondisi aman terhadap terjadinya deformasi plastis. Sebaliknya, nilai tegangan maksimum pada Model B telah melampaui batas *yield strength*, yang mengindikasikan potensi terjadinya kegagalan material apabila beban serupa terus bekerja.

Total Deformation

Analisis *total deformation* dilakukan untuk mengevaluasi besarnya deformasi maksimum yang terjadi pada poros sebagai respons terhadap pembebanan statik vertikal.



Gambar 12. Distribusi Total Deformation Model A
Sumber : Penulis



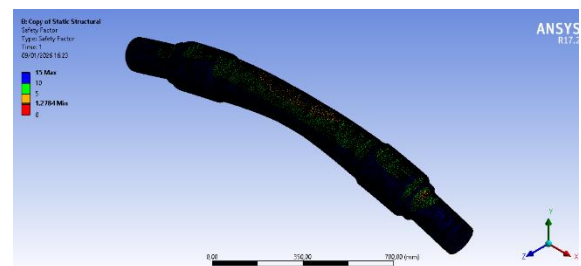
Gambar 13. Distribusi Total Deformation Model B
Sumber : Penulis

Hasil simulasi menunjukkan bahwa Model A mengalami deformasi maksimum sebesar 0,52865 mm, sedangkan Model B mengalami deformasi maksimum sebesar 0,55679 mm. Berdasarkan perbandingan tersebut, deformasi maksimum Model A

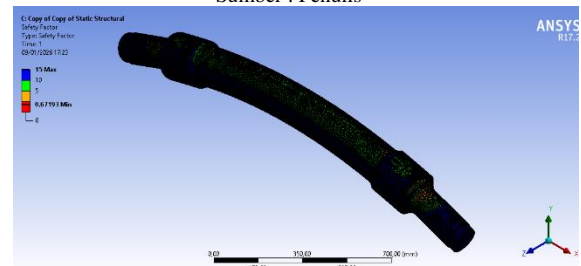
lebih rendah sekitar 5,1% dibandingkan Model B. Perbedaan ini menunjukkan bahwa Model A memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menahan perubahan bentuk akibat pembebanan statik. Meskipun kedua model masih berada dalam rentang deformasi elastis, Model A menunjukkan respons struktural yang lebih stabil dibandingkan Model B.

Safety Factor

Analisis *safety factor* dilakukan untuk menilai tingkat keamanan struktur poros terhadap batas kekuatan material, dengan fokus pada nilai *safety factor* minimum yang terjadi pada area kritis.



Gambar 14. Distribusi Safety Factor Model A
Sumber : Penulis



Gambar 15. Distribusi Safety Factor Model B
Sumber : Penulis

Hasil analisis menunjukkan bahwa Model A memiliki nilai *safety factor* minimum sebesar 1,2784, sedangkan Model B memiliki nilai minimum sebesar 0,67193, di mana nilai *safety factor* minimum pada Model A tercatat lebih tinggi sekitar 90,3% dibandingkan Model B. Nilai *safety factor* Model A yang berada di atas satu menunjukkan bahwa struktur masih memiliki margin keamanan terhadap pembebanan statik, sementara nilai *safety factor* Model B yang berada di bawah satu mengindikasikan kondisi struktur yang tidak aman dan berpotensi mengalami kegagalan material pada area kritis. Berdasarkan klasifikasi faktor keamanan, rentang nilai $1,0 \leq SF \leq 1,5$ termasuk dalam kategori kritis yang berada dekat dengan batas leleh material [9].

Tabel VII. Hasil Analisis Perbandingan Model A dan Model B

| No | Parameter | Batas | Model A | Model B |
|----|--------------------------|-------|---------|---------|
| 1 | Tegangan Von Mises (MPa) | Min | 0 | 0 |
| | | Max | 172,88 | 328,91 |
| 2 | Total Deformation (mm) | Min | 0 | 0 |
| | | Max | 0,52865 | 0,55679 |
| 3 | Safety Factor | Min | 1,2784 | 0,67193 |
| | | Max | 15 | 15 |

Sumber : Penulis

Berdasarkan ringkasan hasil perbandingan pada Tabel VII, Model A menunjukkan performa struktural yang lebih baik dibandingkan Model B dalam menahan pembebanan statik vertikal, yang ditunjukkan oleh nilai tegangan *Von Mises* maksimum yang lebih rendah, deformasi total yang lebih kecil, serta nilai *safety factor* minimum yang lebih tinggi dan berada di atas satu, sehingga memenuhi batas kekuatan material ASTM A36. Sebaliknya, Model B menghasilkan tegangan maksimum dan deformasi yang lebih besar serta *safety factor* minimum di bawah satu, yang mengindikasikan kondisi struktur yang lebih kritis pada area tertentu. Hasil ini menunjukkan bahwa, pada kondisi pembebanan statik yang dianalisis, Model A memiliki margin keamanan struktural yang lebih baik dibandingkan Model B.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis statik menggunakan metode *Finite Element Analysis* (FEA), Model A menunjukkan kinerja struktural yang lebih baik dibandingkan Model B, ditinjau dari nilai tegangan *Von Mises* maksimum sebesar 172,88 MPa yang masih berada di bawah batas luluh material ASTM A36 sebesar 250 MPa, serta lebih rendah dibandingkan Model B yang mencapai 328,91 MPa. Selain itu, Model A mengalami deformasi maksimum sebesar 0,52865 mm, lebih kecil dibandingkan Model B sebesar 0,55679 mm, yang menunjukkan respons struktur yang lebih stabil terhadap pembebanan statik vertikal. Dari sisi keamanan struktur, Model A memiliki nilai *safety factor* minimum sebesar 1,2784, sedangkan Model B hanya sebesar 0,67193, sehingga Model A masih memiliki margin terhadap terjadinya yielding pada kondisi pembebanan yang dianalisis. Hasil ini memberikan indikasi bahwa Model A memiliki tingkat keandalan struktural yang lebih baik pada analisis statik, namun belum dapat digunakan untuk menyimpulkan ketahanan terhadap kelelahan material, sehingga evaluasi lanjutan melalui analisis beban kombinasi (vertikal, lateral, dan torsi pengereman) serta analisis kelelahan menggunakan pendekatan kurva S–N atau *strain-life* diperlukan untuk memastikan umur layanan poros secara komprehensif.

REFERENSI

[1] D. Devianto dkk., “Journal of Open Innovation : Technology , Market , and Complexity 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] X. Wu dkk., “A critical review of wheel/rail high frequency vibration-induced vibration fatigue of railway bogie in China,” *Railw. Sci.*,

vol. 3, no. 2, hal. 177–215, 2024.

[3] G. Popa, R. A. Oprea, E. Tudor, M. A. Gheti, dan I. S. Munteanu, “Vibration Measurement and Monitoring in Railway Vehicles,” *Technologies*, vol. 13, no. 8, hal. 370, 2025.

[4] R. Dahlan, “Analisis Tegangan pada Hollow Axle Kereta Cepat CR 400 AF dengan Metode Elemen Hingga,” vol. 18, no. 2, hal. 94–99, 2024.

[5] T. Guo, B. Chen, Y. Wang, G. Cai, M. Hou, dan Q. Dong, “Vibration Characteristics and Fatigue Performance of Bogie Frame with Inner Axle Box for High-Speed Trains,” *Machines*, vol. 13, no. 11, hal. 1056, 2025.

[6] L. Wei, Y. Sun, J. Zeng, dan S. Qu, “Experimental and numerical investigation of fatigue failure for metro bogie cowcatchers due to modal vibration and stress induced by rail corrugation,” *Eng. Fail. Anal.*, vol. 142, hal. 106810, 2022.

[7] R. Xiu, M. Spiriyagin, Q. Wu, S. Yang, dan Y. Liu, “Fatigue life prediction for locomotive bogie frames using virtual prototype technique,” *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail Rapid Transit*, vol. 235, no. 9, hal. 1122–1131, 2021.

[8] M. Febrianto dan F. Alhaffis, “Investigasi Kegagalan Poros Gandar Kereta Pengangkut Tebu,” *Ranah Res. J. Multidiscip. Res. Dev.*, vol. 6, no. 4, hal. 498–503, 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),” vol. 8, no. 2, hal. 190–199, 2024.

[10] V. E. D. Firzatullah dan K. Rasyid, “Optimasi Desain Bogie Frame Light Rail Transit (LRT) dengan Penambahan Backing Plate Menggunakan Finite Element Method,” 2024, *Institut Teknologi Indonesia*.

[11] E. Achdi, F. Rizayana, dan R. N. Septian, “Railway Bogie Side Frame Strength Analysis,” *Mestro J. Tek. Mesin dan Elektro*, vol. 6, no. 03, hal. 7–11, 2024.

[12] I. M. Ilyasa, I. A. Hendaryanto, dan A. Winarno, “Analisis Kekuatan Struktur Pada Desain Traction Rod Lokomotif Kereta Api Dengan Metode Finite Element Analysis (FEA),” *J. Engine Energi, Manufaktur, dan Mater.*, vol. 8, no. 2, hal. 190–199, 2024.

[13] T. S. Mahendra dan S. Izha, “Analisis Struktur Hollow Axle Kereta Cepat EMU CR400AF Menggunakan Ansys Workbench,” 2024, *Universitas Mercu Buana Jakarta*.

[14] M. V. Hermawan, A. Supriyanto, dan T. Al Alaa, “Efek Variasi Beban Torsi Terhadap Distribusi Tegangan Komponen Axle Shaft Kendaraan Niaga,” *Teknika*, vol. 7, no. 1, hal. 46–51, 2021.

- [15] Y. Song, P. Wu, Y. Qi, H. Li, dan C. Wu, "Experimental study on the residual life of high speed trains axles considering initial defects," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 168, hal. 109078, 2025.
- [16] L. Wójcik, G. Winiarski, T. Bulzak, dan K. Lis, "Fatigue Analysis of a Cross Wedge Rolled Rail Axle," in *International Conference on Engineering Manufacture*, Springer, 2024, hal. 85–99.
- [17] Y. Hu, Q. Qin, S. Wu, X. Zhao, dan W. Wang, "Fatigue resistance and remaining life assessment of induction-hardened S38C steel railway axles," *Int. J. Fatigue*, vol. 144, hal. 106068, 2021.
- [18] M. S. Johnson dkk., "Structural analysis for the design of a lightweight composite railway axle," *Compos. Struct.*, vol. 290, hal. 115544, 2022.
- [19] L. Zou, D. Zeng, Y. Li, K. Yang, L. Lu, dan C. Yuan, "Experimental and numerical study on fretting wear and fatigue of full-scale railway axles," *Railw. Eng. Sci.*, vol. 28, no. 4, hal. 365–381, 2020.
- [20] P. R. da Costa, V. Infante, dan M. Freitas, "Investigation of a premature failure axle from a road-rail truck under rotary bending fatigue," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 173, hal. 109464, 2025.
- [21] V. Giannella, R. Sepe, A. Borrelli, G. De Michele, dan E. Armentani, "Numerical investigation on the fracture failure of a railway axle," *Eng. Fail. Anal.*, vol. 129, hal. 105680, 2021.
- [22] A. F. Al Faridzi, "Ketahanan Baja Astm A36 Terhadap Pengujian Tarik Dan Bending Dengan Proses Pengelasan Smaw Dan Metalografi," *Rekayasa Sist. Energi dan Manufaktur*, vol. 2, no. 2, hal. 109–118, 2024.
- [23] S. Senthilkumar, S. Manivannan, R. Venkatesh, dan M. Karthikeyan, "Influence of heat input on the mechanical characteristics, corrosion and microstructure of ASTM A36 steel welded by GTAW technique," *Heliyon*, vol. 9, no. 9, 2023.
- [24] A. Halim, I. Suryapradana, N. S. Radea, Z. S. Gheitsa, dan P. Akbar, "Analisis Struktur Rangka Box Fermentasi Biji Kakao Menggunakan Metode Elemen Hingga," vol. 20, no. 1, hal. 105–114, 2025.
- [25] S. Sumiyanto dan A. Abdunnaser, "Pengaruh media pendingin terhadap sifat mekanik dan struktur mikro plat baja karbon ASTM A-36," *Bina Tek.*, vol. 11, no. 2, hal. 155–170, 2015.
- [26] F. A. Budiman, A. Septiyanto, S. Sudiyono, A. D. N. I. Musyono, dan R. Setiadi, "Analisis tegangan von mises dan safety factor pada chassis kendaraan listrik tipe in-wheel," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 16, no. 1, hal. 100–108, 2021.
- [27] M. N. Rizki, A. Fikri, F. Faisal, dan R. A. Nanda, "Analisis Von-Mises Stress, Strain, Dan Total Deformasi Pada Pelat Implan Metatarsophalangeal (Mtp) Dengan Material Ti-6al-4v Menggunakan Finite Element Method," *J. Teknol. Kim. Unimal*, vol. 12, no. 2, hal. 178–189, 2023.
- [28] F. Marpaung, E. T. Wibowo, dan R. Harmadi, "Desain dan Analisis Tanki ISO LNG Kapasitas 40 feet Menggunakan Teknik Finite Element Analysis," *J. Asimetrik J. Ilm. Rekayasa Inov.*, hal. 163–170, 2022.
- [29] B. Kaur, P. Kaur, dan A. K. Jain, "Analysis of deformation of RC beam with addition of fly ash: A Finite element-based modelling," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 5, hal. 6640–6649, 2020.
- [30] D. Wibowo, M. Zaenudin, dan Y. K. P. Saleh, "Analisis Kegagalan pada As Roda Belakang Dump Truck Hino 500 Berbasis Finite Element Analysis," *J. Crankshaft*, vol. 8, no. 2, 2025.
- [31] Y. Herdiansah dan M. P. Nurhuda, "Analisis Karakteristik Dinamik dan Statik Jembatan Gantung 240 Meter dengan Wind Cable untuk Jalur Konveyor," *J. Arsip Rekayasa Sipil dan Perenc.*, vol. 8, no. 1, hal. 10–19, 2025.
- [32] M. D. Mustaqim dan D. T. Santoso, "Design and Structural Evaluation of an Electric Motorcycle Frame Using FEA," *Metrotech (Journal Mech. Electr. Technol.*, vol. 4, no. 3, hal. 168–178, 2025.
- [33] R. A. Nanda, T. Supriyono, R. A. R. Ma'arof, dan F. M. Dewadi, "Analisis Chassis Mobil Robot Penanaman Bibit Kangkung Menggunakan Metode Elemen Hingga," *J. Tek. Mesin Mech. Xplore*, vol. 2, no. 2, hal. 1–8, 2022.
- [34] R. N. Kurniawan, D. Romahadi, dan M. Fitri, "Implementasi Metode Elemen Hingga Menggunakan Solidworks untuk Mengoptimalkan Desain Pelek Depan Sepeda Motor Tipe Casting Wheel," *J. Tek. Mesin*, vol. 12, no. 2, hal. 96–106, 2023.
- [35] H. Abbas, D. Juma, dan M. R. Jahuddin, "Penerapan Metode Elemen Hingga Untuk Desain Dan Analisis Pembebanan Rangka Chassis Mobil Model Tubular Space Frame," *ILTEK J. Teknol.*, vol. 15, no. 02, hal. 96–102, 2020.
- [36] F. Setiawan, "Metode Deteksi Kerusakan Elemen Bola pada Bantalan Bola Tipe Double Row Berbasis Sinyal Getaran," Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, 2017.
- [37] L. R. Wiradarma, M. R. F. Amrozi, dan S. Siswosukarto, "Analisis Dampak Penambahan Beban Gandar Kereta Api terhadap Struktur Jalan Rel," hal. 1–8, 2024.