

Studi *Finite Element Analysis* terhadap Kekuatan Struktural Dua Desain Roda Kereta Menggunakan ANSYS Workbench 17.2

Tinton Davareza^{1*}, Andita Nataria Fitri Ganda², Diah Wulandari³, Dio Dwi Mubarok⁴,
Ganda Putra Firmansyah⁵

^{1,2,3,4,5}Teknik Mesin, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia 60231

E-mail: tinton.22026@mhs.unesa.ac.id

Abstrak: Roda kereta merupakan komponen vital dalam sistem perkeretaapian yang harus mampu menahan beban operasi secara aman dengan deformasi dan konsentrasi tegangan yang terkendali. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi dan membandingkan performa struktural dua desain roda kereta melalui pendekatan *Finite Element Analysis* (FEA). Analisis dilakukan menggunakan ANSYS Workbench 17.2 dengan memodelkan kontak roda dengan rel menggunakan tipe kontak *frictionless* agar kondisi batas lebih merepresentasikan kondisi operasi nyata. Material yang digunakan adalah baja karbon ASTM A36 sebagai pendekatan *baseline*, dengan pembebanan vertikal sebesar 110.362,5 N yang merepresentasikan setengah beban gandar jalur rel kelas I. Parameter evaluasi meliputi tegangan ekivalen *Von Mises*, total deformasi, dan *safety factor*. Hasil simulasi menunjukkan bahwa Model B memiliki performa struktural yang lebih baik dibandingkan Model A, ditunjukkan oleh tegangan maksimum yang lebih rendah (160,82 MPa dibandingkan 195,19 MPa), deformasi maksimum yang lebih kecil (0,029245 mm dibandingkan 0,045356 mm), serta nilai *safety factor* minimum yang lebih tinggi (1,3742 dibandingkan 1,1322). Perbedaan kinerja ini dipengaruhi oleh variasi geometri, khususnya pada *web plate*, radius transisi, dan distribusi massa roda. Penelitian ini memberikan kontribusi berupa pemahaman pengaruh geometri terhadap respons struktural roda kereta dan dapat digunakan sebagai dasar evaluasi awal desain roda kereta menggunakan pendekatan FEA.

Kata kunci: deformasi total, *finite element analysis*, roda kereta, *safety factor*, tegangan *Von Mises*.

Abstract: Railway wheels are critical components in railway systems that must safely withstand operational loads with controlled stress distribution and deformation. This study aims to evaluate and compare the structural performance of two railway wheel designs using the Finite Element Analysis (FEA) approach. The analysis was conducted using ANSYS Workbench 17.2 by modeling the wheel-rail contact using a frictionless contact type to better represent actual operating conditions. ASTM A36 carbon steel was employed as a baseline material, and a vertical load of 110,362.5 N was applied to represent half of the Class I axle load. The evaluated parameters include Von Mises equivalent stress, total deformation, and safety factor. The simulation results indicate that Model B demonstrates superior structural performance compared to Model A, characterized by a lower maximum stress (160.82 MPa versus 195.19 MPa), smaller maximum deformation (0.029245 mm versus 0.045356 mm), and a higher minimum safety factor (1.3742 versus 1.1322). These performance differences are primarily influenced by geometric variations, particularly in the web plate, transition radius, and mass distribution of the wheel. This study contributes to a clearer understanding of the influence of wheel geometry on structural response and provides a baseline reference for preliminary railway wheel design evaluation using FEA.

Keywords: finite element analysis; railway wheel; safety factor; total deformation; Von Mises stress.

© 2025, JRM (Jurnal Rekayasa Mesin) dipublikasikan oleh ejournal Teknik Mesin Fakultas Vokasi UNESA.

PENDAHULUAN

Roda kereta merupakan salah satu komponen paling krusial dalam sistem transportasi rel, karena secara langsung menerima beban statis maupun dinamis selama operasional perjalanan. Keandalan roda berpengaruh langsung terhadap keselamatan, stabilitas, dan umur layanan rangkaian kereta [1]. Di Indonesia, kebutuhan roda kereta masih banyak dipenuhi melalui impor, sehingga diperlukan upaya pengembangan desain dan analisis struktural untuk mendorong kemandirian industri perkeretaapian

nasional [2]. Analisis struktural melalui metode simulasi modern penting dilakukan agar desain roda dapat memenuhi standar keselamatan sekaligus mendukung program substitusi impor komponen [3].

Perbedaan dimensi dan geometri roda kereta dapat menghasilkan distribusi tegangan dan deformasi yang berbeda, sehingga pemilihan desain tidak dapat hanya mengandalkan pengalaman empiris tetapi harus dibuktikan melalui analisis rekayasa berbasis data. Faktor seperti diameter luar, radius transisi, dan ketebalan *web plate* terbukti memengaruhi konsentrasi

tegangan serta respons elastis komponen [4]. Dalam konteks industri kereta di Indonesia, penggunaan metode *Finite Element Analysis (FEA)* menjadi semakin penting mengingat tingginya tuntutan terhadap akurasi, efisiensi desain, dan verifikasi keselamatan [5], [6].

Roda kereta api harus mampu menahan beban statis dan dinamis berulang selama operasi, sehingga diperlukan karakteristik material dengan kekuatan tarik, kekerasan, serta ketahanan aus yang memadai agar tidak mengalami deformasi berlebih maupun kelelahan material [7]. Material yang lazim digunakan untuk roda kereta umumnya berupa baja karbon dan baja paduan, terutama karena sifat mekaniknya yang mampu menahan beban besar, memiliki ketangguhan tinggi, serta ketahanan aus yang memadai saat berinteraksi langsung dengan rel [8]. Selain itu, 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 [9], [10].

Metode *FEA* telah banyak digunakan untuk mengevaluasi distribusi tegangan pada komponen kereta api. Studi terkait analisis tegangan pada *connection rod* misalnya, menunjukkan bahwa perubahan kecil pada parameter geometri mampu menurunkan tegangan maksimum secara signifikan [11]. Penelitian lain yang menganalisis deformasi dan tegangan pada struktur *bogie* dan komponen *wheelset* juga menegaskan bahwa verifikasi numerik berbasis *FEA* sangat penting untuk menjamin keselamatan struktur terhadap beban ekstrem selama operasi [12]. Temuan-temuan tersebut menguatkan bahwa analisis berbasis *FEA* merupakan tahapan penting dalam proses desain roda kereta api yang optimal.

Berdasarkan kebutuhan tersebut, penelitian ini dilakukan untuk membandingkan performa struktural dua model roda kereta yang memiliki perbedaan dimensi dan geometri menggunakan metode *FEA* pada perangkat lunak *ANSYS Workbench*. Parameter yang dianalisis meliputi *Equivalent Stress (Von Mises)*, *Total Deformation*, serta *Safety Factor*. Penggunaan ketiga parameter ini sejalan dengan praktik evaluasi struktural pada komponen mekanik kritis, yang telah banyak diterapkan pada penelitian mekanika rekayasa modern [13].

Dengan melakukan analisis komparatif antara Model A dan Model B, penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan rekomendasi desain roda yang lebih aman dan efisien dalam menerima beban operasional. Pendekatan berbasis simulasi seperti ini telah terbukti mampu meningkatkan kualitas desain komponen transportasi secara signifikan, baik dalam hal reliabilitas maupun keselamatan [14]. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat mendukung

peningkatan kemampuan rekayasa di industri perkeretaapian nasional melalui pemanfaatan analisis numerik dalam proses pengembangan produk.

DASAR TEORI

Roda Kereta Api

Roda kereta api merupakan komponen struktural utama yang berfungsi menahan beban vertikal rangkaian kereta serta gaya lateral dan gaya kontak roda dengan rel selama operasi. Kondisi kerja tersebut menjadikan roda sebagai elemen penting dalam menjaga stabilitas kendaraan rel, mentransmisikan gaya pengereman, dan memastikan keselamatan operasional. Oleh karena itu, desain dan geometri roda dirancang untuk mampu mendistribusikan beban secara merata serta mempertahankan kinerja mekanik yang andal sepanjang umur layanannya [15].



Gambar 1. Roda Kereta

Sumber: [16]

Struktur roda secara umum terdiri dari bagian rim (tapak roda yang kontak langsung dengan rel), web (lempeng penghubung antara rim dan hub), dan hub (bagian pusat yang terhubung ke axle). Perbedaan ketebalan pada web, bentuk profil rim, serta diameter hub dapat memengaruhi distribusi tegangan dan deformasi pada roda. Misalnya, roda dengan web tipis atau transisi rim ke hub yang tajam cenderung mengalami konsentrasi tegangan pada area transisi saat menerima beban vertikal, yang dapat mempercepat kelelahan material atau bahkan retak struktural. Oleh karena itu, optimasi geometri roda sangat penting untuk meminimalkan konsentrasi tegangan dan memperpanjang umur pakai roda kereta [16], [3].

Material Baja ASTM A36

Baja karbon ASTM A36 adalah material struktural yang sering digunakan untuk komponen teknik karena kombinasi antara kekuatan, daktilitas, dan ketersediaannya yang luas. Sifat mekanik tipikal yang dipakai dalam simulasi meliputi Modulus Elastisitas, *Poisson's ratio*, *yield strength*, dan densitas, nilai-nilai ini menjadikan A36 layak untuk aplikasi struktural yang menerima beban statis menengah sampai berat. Studi eksperimen dan karakterisasi material di lingkungan Indonesia menunjukkan konsistensi sifat mekanik dasar ASTM A36 pada sampel pelat dan pengaruh perlakuan panas/pengelasan terhadap performa mekanisnya, sehingga parameter standar tersebut dapat dijadikan acuan awal dalam simulasi *FEA* [17].

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: [18]

Tabel II. Sifat Mekanik ASTM A36

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

Sumber: [19]

Peran sifat material sangat krusial pada respons struktural roda. Modulus Elastisitas (E) menentukan kekakuan global, nilai E lebih tinggi menghasilkan deformasi elastis yang lebih kecil di bawah beban yang sama, sedangkan *yield strength* menetapkan ambang plastisitas yang kemudian dipakai untuk menghitung *safety factor*. Selain itu, parameter seperti kondisi *microstructure* dapat mengubah kekuatan tarik dan keuletan material sehingga memengaruhi distribusi tegangan dan perilaku kelelahan jangka panjang; penelitian-penelitian lokal menegaskan bahwa variasi proses termal dan pengelasan berdampak signifikan pada sifat mekanik A36 dan harus dipertimbangkan bila hasil simulasi akan dibandingkan dengan komponen hasil produksi nyata [8].

Tegangan Von Mises

Tegangan ekuivalen *Von Mises* (σ_e) merupakan besaran skalar yang digunakan untuk mengevaluasi potensi luluh pada material ulet yang menerima kombinasi tegangan kompleks, baik tegangan normal maupun geser dalam kondisi *multiaxial*. Kriteria ini didasarkan pada teori energi distorsi, yang menyatakan bahwa material mulai mengalami plastisitas ketika energi distorsi per unit volume mencapai nilai kritis sama seperti pada uji tarik *uniaxial* pada batas luluh material [20]. Dengan demikian, *Von Mises stress* memungkinkan perbandingan kondisi beban kompleks menjadi ekuivalen terhadap uji tarik sederhana. Dengan demikian, persamaan berikut dapat digunakan untuk menghitung tegangan ekuivalen yang menggambarkan kondisi beban *multiaxial* sebagai satu nilai skalar.

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

Sumber: [21]

Di mana:

 σ = tegangan normal (Mpa) τ = tegangan geser (Mpa)

Dengan menggunakan nilai σ_e tersebut, analisis selanjutnya dapat membandingkan hasil simulasi terhadap kekuatan luluh material untuk menilai keamanan desain. Jika nilai σ_e yang dihasilkan oleh simulasi lebih kecil dari *yield strength* material, maka desain dianggap aman terhadap plastisitas statis [22]. Metode ini banyak digunakan pada simulasi struktur baja, termasuk rangkaian kendaraan, casis, dan komponen mekanik karena mampu memprediksi distribusi tegangan serta mendeteksi titik konsentrasi tegangan yang berpotensi gagal. Oleh sebab itu, dalam penelitian ini *Von Mises stress* dijadikan parameter utama untuk membandingkan performa struktural dua desain roda kereta, sebelum dilakukan evaluasi total deformasi atau *safety factor*.

Total Deformation

Total deformation dalam analisis struktur merujuk pada perpindahan gabungan titik struktur akibat pembebanan, meliputi perpindahan pada semua arah (X, Y, Z). Besar kecilnya deformasi sangat dipengaruhi oleh kekakuan material, geometri struktur, dan besar gaya yang diberikan. Struktur dengan kekakuan tinggi dan geometri optimal biasanya menunjukkan deformasi yang minimal di bawah beban, sedangkan struktur dengan geometri kurang optimal dapat menunjukkan deformasi berlebih atau konsentrasi lendutan [23], [24]. Oleh karena itu, *total deformation* menjadi parameter penting dalam analisis *FEA* untuk mengevaluasi apakah desain mampu mempertahankan bentuk dan fungsi struktural di bawah beban. Besarnya *total deformation* (TD) pada suatu titik dapat dihitung menggunakan persamaan di bawah ini yang merepresentasikan perpindahan resultan dari ketiga arah tersebut.

$$TD = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} \quad (2)$$

Sumber: [25]

Nilai total deformasi inilah yang selanjutnya digunakan sebagai acuan untuk menilai respons struktural komponen terhadap beban kerja pada simulasi. Dalam konteks komponen transportasi atau struktur mekanik, penelitian menggunakan *FEA* menunjukkan bahwa variasi geometri dan material menghasilkan perbedaan signifikan pada nilai deformasi dan respons struktural terhadap beban. Misalnya dalam simulasi struktural rangka kendaraan kompetisi, deformasi maksimal tetap berada dalam batas aman pada beban yang dirancang, menunjukkan bahwa desain dengan geometri dan material yang tepat mampu menahan beban tanpa deformasi berlebih [14]. Temuan ini menunjukkan bahwa analisis total deformasi melalui *FEA* efektif sebagai alat prediksi performa struktural sebelum produksi fisik dilakukan.

Safety Factor

Safety factor (SF) merupakan rasio antara kekuatan material (*yield strength* atau *ultimate strength*) terhadap tegangan kerja yang terjadi pada

kondisi beban maksimum. Secara umum, hubungan antara kekuatan material dan tegangan kerja tersebut dapat dinyatakan melalui persamaan faktor keamanan sebagai berikut.

$$SF = \frac{\sigma_{yield}}{\sigma_{maks}} \quad (3)$$

Sumber: [26]

Di mana:

- SF = faktor keamanan
- σ_{yield} = tegangan luluh material (Mpa)
- σ_{maks} = tegangan maksimum (Mpa)

Nilai ini dipakai sebagai margin keamanan untuk memastikan struktur tidak memasuki keadaan plastis atau gagal saat beroperasi. Dalam praktik rekayasa, penentuan SF mempertimbangkan ketidakpastian pada beban, variasi sifat bahan, kondisi manufaktur, dan faktor lingkungan, sehingga SF bukan sekadar angka teoritis tetapi alat manajemen risiko desain. Studi-studi FEA pada perancangan alat dan komponen transportasi menegaskan peran SF dalam mengevaluasi kelayakan desain sebelum *prototyping* fisik dilakukan [27].

Suatu desain dapat dikatakan aman jika nilai *safety factor* melebihi atau diatas nilai 1 (>1) [28]. Beberapa studi lokal yang mengaplikasikan FEA melaporkan bahwa penentuan SF yang konservatif membantu mengurangi risiko inisiasi retak pada komponen berulang beban dan meningkatkan umur pakai komponen transportasi [20].

Finite Element Analysis (FEA)

Finite Element Analysis (FEA) atau Metode Elemen Hingga adalah teknik numerik untuk memodelkan dan menganalisis perilaku struktur yang geometri dan kondisi bebannya kompleks dengan membagi struktur kontinu menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi distribusi tegangan, regangan, dan deformasi pada struktur yang tidak memungkinkan dianalisis secara analitik misalnya komponen mekanik dengan bentuk tidak beraturan atau beban kompleks [23]. FEA telah menjadi metode standar dalam desain dan analisis komponen mekanik maupun struktural, termasuk pada kendaraan dan sistem transportasi, karena mampu memberikan prediksi awal sebelum produksi fisik dilakukan [29].

Prosedur umum FEA *Static Structural* meliputi;

- 1) Engineering Data Material
- 2) Input Geometri 3D Model
- 3) Meshing
- 4) Boundary Conditions
- 5) Solving
- 6) Result Evaluation

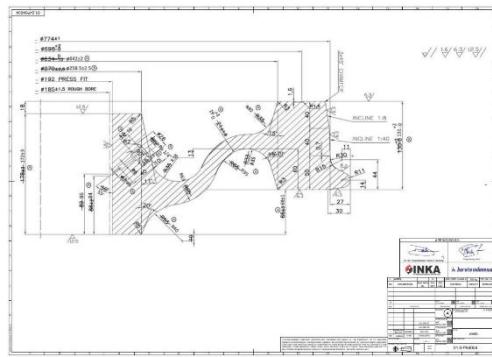
Proses ini memungkinkan desainer melakukan *what if analysis*, membandingkan alternatif desain hanya dengan simulasi komputer tanpa harus membuat *prototype* fisik sehingga efisien dari segi waktu dan biaya [30], [19].

METODE

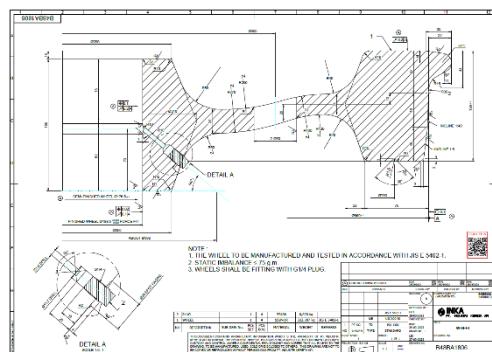
Metode penelitian ini mencakup rangkaian tahapan yang dilakukan untuk menganalisis dan membandingkan performa struktural dua desain roda kereta menggunakan pendekatan *Finite Element Analysis*. Proses penelitian dimulai dari pembuatan model geometri roda, penentuan material dan sifat mekanik, persiapan *mesh*, penetapan kondisi batas serta pembebanan, hingga pelaksanaan analisis statis menggunakan *ANSYS Workbench*. Setiap langkah dirancang untuk memastikan bahwa kedua model dianalisis dalam kondisi yang setara, sehingga hasil perbandingan terhadap parameter *Equivalent Stress (Von Mises)*, *Total Deformation*, dan *Safety Factor* dapat diperoleh secara objektif dan akurat.

Desain dan Model Geometri Roda Kereta

Desain roda kereta yang digunakan pada penelitian ini terdiri atas dua model berbeda, yaitu Model A dan Model B, yang masing-masing memiliki variasi dimensi pada bagian tapak roda, diameter hub, radius transisi, serta ketebalan *web plate*. Kedua desain dibuat menggunakan perangkat lunak *SolidWorks*, yang banyak digunakan dalam proses rekayasa desain komponen mekanik karena mampu menghasilkan geometri yang presisi dan sesuai standar manufaktur. Data geometris yang digunakan merupakan bentuk umum roda kereta yang lazim digunakan pada industri perkeretaapian di Indonesia, sehingga karakteristik desain masih merepresentasikan konfigurasi roda kereta konvensional yang digunakan pada sistem transportasi rel nasional.



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



Gambar 3. Desain 2D Roda Kereta Model B
Sumber: Dokumentasi Penulis

Pemilihan dua model dengan dimensi berbeda dilakukan untuk mengetahui pengaruh konfigurasi geometri terhadap kinerja struktural roda ketika menerima pembebanan vertikal. Variasi tersebut terutama berada pada parameter-parameter kritis seperti diameter luar roda, diameter hub, ketebalan *web*, serta lebar tapak roda, yang secara teoritis dapat memengaruhi distribusi tegangan dan deformasi pada struktur. Perbedaan dimensi ini menjadi dasar utama perbandingan sehingga dapat ditentukan desain mana yang memiliki performa kekuatan yang lebih baik.

Tabel III. Perbandingan Dimensi Geometri

Geometri	Dimensi		Keterangan
	Model A	Model B	
Diameter Luar	Ø774 mm	Ø860 mm	Bersentuhan dengan rel
Diameter Dalam	Ø192 mm	Ø188,5 mm	Tumpuan Axle atau Poros
Lebar Roda	190 mm	165 mm	-
Lebar Web Plate	19 mm	26 mm	Lebar lekukan menyerupai huruf S (tengah)
Radius Web Plate	38 mm	50 mm	Radius lekukan web plate

Sumber: Penulis

Model yang telah selesai dibuat dieksport ke perangkat lunak ANSYS Workbench dalam format *STEP* untuk memastikan kompatibilitas geometri dan meminimalkan kehilangan detail selama proses transfer. Format *STEP* umum digunakan dalam analisis numerik karena mampu menjaga ketelitian bentuk geometri kompleks, termasuk *fillet* dan kurva transisi pada roda kereta. Model yang telah dieksport kemudian digunakan sebagai input utama dalam proses simulasi *Finite Element Analysis*.

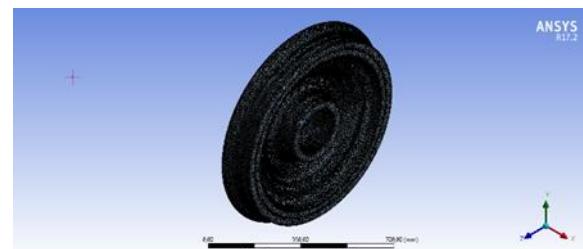
Pemilihan Material

Material merupakan aspek penting dalam analisis struktural roda kereta karena sifat mekaniknya memengaruhi respons terhadap pembebanan. Pada penelitian ini digunakan baja karbon ASTM A36 sebagai material *baseline*, yang dipilih karena memiliki sifat mekanik yang terdokumentasi dengan baik, bersifat homogen isotropik, serta umum digunakan dalam studi awal analisis struktur. Penggunaan material ini dimaksudkan sebagai pendekatan awal (*preliminary study*) untuk mengevaluasi pengaruh perbedaan geometri roda terhadap distribusi tegangan, total deformasi, dan faktor keamanan secara relatif.

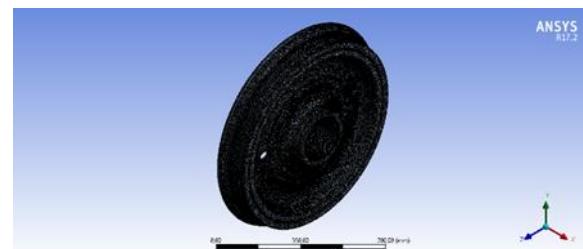
Perlu dicatat bahwa roda kereta pada aplikasi industri umumnya menggunakan *wheel steel* khusus dengan karakteristik kekuatan, ketahanan aus, dan ketahanan kelelahan yang lebih tinggi. Oleh karena itu, hasil analisis pada penelitian ini belum merepresentasikan kondisi operasional roda kereta secara langsung, melainkan berfungsi sebagai studi komparatif berbasis *FEA* dengan asumsi material sederhana. Sifat mekanik ASTM A36 yang digunakan dalam simulasi meliputi Modulus Elastisitas, *Poisson's Ratio*, *Yield Strength*, dan *Density* sebagaimana ditampilkan pada Tabel II.

Meshing dan Pengaturan Elemen

Proses *meshing* dilakukan untuk membagi model roda kereta menjadi elemen-elemen kecil sehingga perilaku struktural dapat dianalisis secara numerik menggunakan metode elemen hingga. Pada penelitian ini menggunakan *Automatic Meshing* dengan pengaturan *element size* 5 mm, sehingga seluruh permukaan dan volume roda terdistribusi *mesh* secara merata.



Gambar 4. Mesh 3D Roda Kereta Model A
Sumber: Penulis



Gambar 5. Mesh 3D Roda Kereta Model B
Sumber: Penulis

Ukuran elemen ditetapkan secara seragam pada kedua model untuk menjaga konsistensi hasil perbandingan. Pemilihan ukuran elemen mempertimbangkan keseimbangan antara akurasi hasil dan waktu komputasi. Semakin kecil ukuran elemen, maka semakin detail hasil simulasi, tetapi beban komputasi meningkat. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan satu set parameter *meshing* yang sama pada Model A dan Model B agar hasil evaluasi tegangan, total deformasi, dan faktor keamanan dapat dibandingkan secara objektif.

Tabel IV. Jumlah Node dan Element

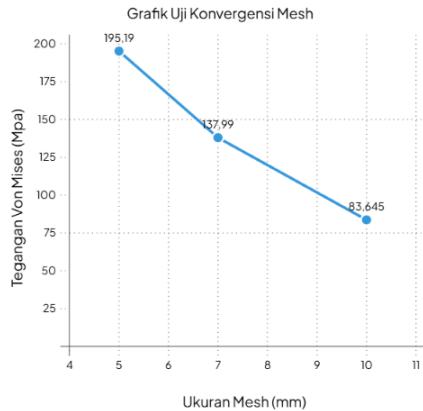
Parameter	Deskripsi	
	Model A	Model B
Jumlah Node	577819	655111
Jumlah Element	311840	357845
Ukuran Mesh		5 mm

Sumber: Penulis

Parameter *meshing* yang meliputi jumlah *node* dan elemen direkap pada Tabel IV. Perbedaan jumlah elemen yang muncul umumnya disebabkan oleh variasi geometri antar model, namun tetap berada dalam rentang kualitas *mesh* yang memenuhi syarat evaluasi struktural. Penggunaan *mesh* yang terstandardisasi seperti ini penting untuk memastikan bahwa variasi hasil analisis berasal dari perbedaan desain, bukan dari perbedaan kualitas *meshing*.

Uji Konvergensi Mesh

Uji konvergensi *mesh* dilakukan untuk memastikan bahwa hasil analisis tidak dipengaruhi secara signifikan oleh ukuran elemen *mesh* dan bukan merupakan artefak numerik. Pada penelitian ini digunakan tiga variasi ukuran elemen, yaitu 5 mm, 7 mm, dan 10 mm, dengan pengaturan material, *boundary condition*, dan pembebanan yang sama. Parameter evaluasi yang digunakan adalah nilai maksimum *Equivalent Stress* (*Von Mises*) karena paling sensitif terhadap perubahan kepadatan *mesh* dan menjadi acuan utama dalam analisis kekuatan struktur.

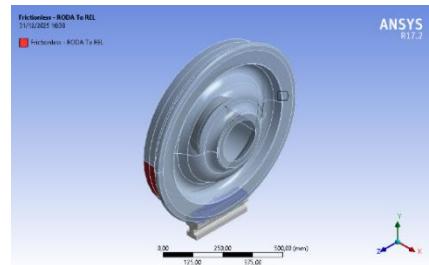


Gambar 6. Grafik Hasil Uji Konvergensi Mesh
Sumber: Penulis

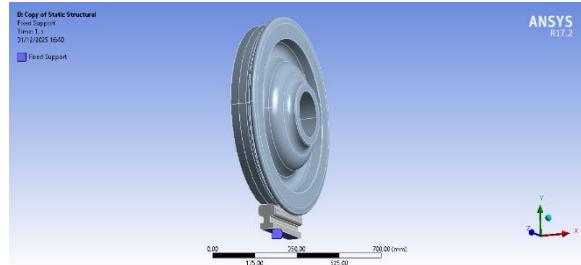
Berdasarkan grafik hasil uji konvergensi *mesh* pada Gambar 6, nilai tegangan *Von Mises* maksimum menurun seiring dengan bertambahnya ukuran *mesh*, yang menunjukkan bahwa penggunaan *mesh* yang semakin kasar cenderung meng-*underestimate* konsentrasi tegangan. Oleh karena itu, ukuran *mesh* 5 mm dipilih sebagai *mesh* akhir karena mampu menangkap tegangan kritis secara lebih konservatif sekaligus masih memenuhi efisiensi komputasi. Nilai tegangan hasil uji konvergensi ini digunakan sebagai validasi metode numerik, sedangkan pembahasan performa struktural roda disajikan pada bagian hasil dan pembahasan.

Boundary Conditions dan Pembebaan

Penerapan kondisi batas (*boundary conditions*) pada model roda dilakukan untuk merepresentasikan kondisi kontak nyata antara roda dan rel selama operasi. Interaksi roda dengan rel dimodelkan menggunakan tipe kontak *frictionless* antara permukaan tapak roda dan model rel sederhana berupa blok baja, dengan tujuan memfokuskan analisis pada respons struktural akibat beban vertikal tanpa mempertimbangkan pengaruh gaya gesek tangensial seperti traksi atau pengereman. Pendekatan ini menghasilkan interaksi beban pada area kontak terbatas sehingga distribusi tegangan dan deformasi lebih representatif dibandingkan penguncian langsung pada diameter luar roda. Kondisi batas *fixed support* diterapkan pada bagian bawah rel, bukan pada roda, sehingga roda tetap dapat mengalami deformasi elastis akibat pembebanan vertikal yang diterapkan.

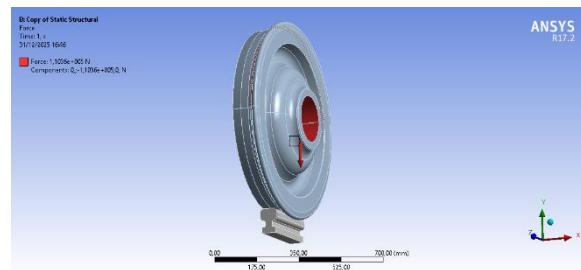


Gambar 7. Kontak Roda dengan Rel
Sumber: Penulis



Gambar 8. Fixed Support
Sumber: Penulis

Untuk menjaga stabilitas numerik simulasi statis, pembatasan perpindahan tambahan diterapkan secara minimal pada arah tertentu di area hub roda tanpa mengganggu respons utama struktur. Pembebanan diberikan dalam bentuk gaya vertikal ke bawah pada pusat roda untuk merepresentasikan beban dari berat rangkaian kereta. Besarnya beban ditentukan berdasarkan Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api, yang menyatakan bahwa jalan rel kelas I dirancang untuk menahan beban gandar maksimum sebesar 22,5 ton [31]. Karena satu gandar terdiri dari dua roda, maka gaya vertikal yang bekerja pada satu roda diasumsikan sebesar 11,25 ton atau 110.362,5 N, yang diterapkan sebagai *force load* dalam simulasi.

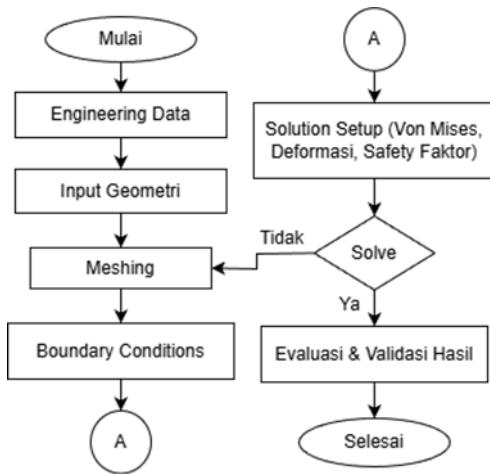


Gambar 9. Force Load
Sumber: Penulis

Simulasi dilakukan dalam kondisi statis dengan mengabaikan efek dinamis seperti gaya sentrifugal, gaya pengereman, dan fenomena kelelahan material. Asumsi ini dipilih karena tujuan utama penelitian adalah membandingkan performa struktural dua desain roda berdasarkan respons elastisnya, sehingga analisis statis dianggap memadai untuk mengidentifikasi perbedaan distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan. Pendekatan ini juga umum digunakan pada tahap awal evaluasi desain komponen transportasi sebelum dilakukan analisis lanjutan yang lebih kompleks.

Prosedur Analisis

Analisis pada penelitian ini menggunakan modul *Static Structural* di *ANSYS Workbench* untuk mengevaluasi perilaku mekanik kedua model roda kereta di bawah pembebahan statis. Metode ini dipilih karena mampu merepresentasikan kondisi awal roda saat menerima gaya vertikal tanpa pengaruh efek dinamis, sehingga distribusi tegangan dan deformasi dapat diamati secara langsung. Pendekatan ini juga umum digunakan dalam studi komponen transportasi untuk menentukan kekuatan dasar struktur sebelum analisis lanjutan dilakukan.



Gambar 10. Diagram Alir Analisis di ANSYS
Sumber: Penulis

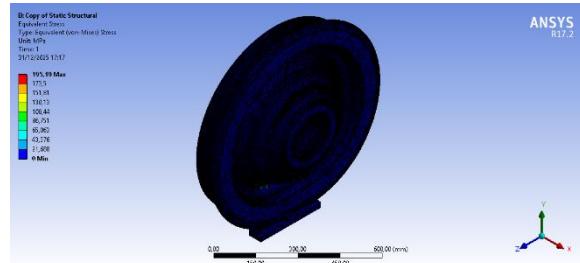
Proses evaluasi dilakukan dengan membandingkan hasil dari Model A dan Model B berdasarkan tiga parameter utama, yaitu tegangan *Von Mises*, total deformasi, dan *safety factor*. Desain dianggap lebih unggul apabila menghasilkan tegangan lebih rendah, deformasi lebih kecil, serta faktor keamanan lebih tinggi, sehingga dapat menahan beban dengan lebih aman. Melalui parameter penilaian yang konsisten ini, pemilihan desain roda yang paling optimal dapat dilakukan untuk mendukung operasional kereta api.

HASIL DAN PEMBAHASAN

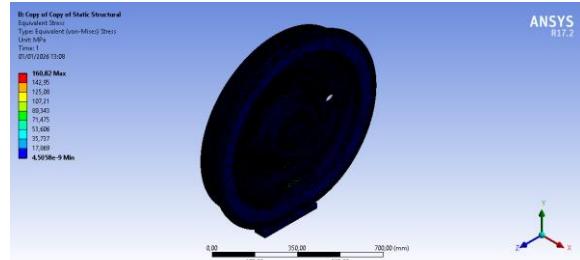
Analisis hasil simulasi menggunakan metode *Finite Element Analysis (FEA)* memberikan gambaran respons struktural kedua desain roda kereta terhadap pembebahan statis vertikal. Hasil simulasi menunjukkan bahwa perbedaan konfigurasi geometri, khususnya pada *web plate*, radius transisi, dan distribusi massa, berpengaruh signifikan terhadap distribusi tegangan, tingkat deformasi, serta margin keamanan struktur. Seluruh hasil dianalisis berdasarkan kontur *ANSYS* untuk memastikan konsistensi antara data numerik dan visualisasi deformasi.

Tegangan Von Mises

Analisis tegangan *Von Mises* dilakukan untuk mengevaluasi potensi luluh material roda kereta akibat pembebahan vertikal statis. Tegangan *Von Mises* digunakan sebagai indikator kegagalan material pada kondisi tegangan *multiaxial* karena mampu merepresentasikan kombinasi tegangan normal dan geser yang bekerja pada struktur. Kontur distribusi tegangan *Von Mises* untuk Model A dan Model B ditampilkan pada gambar berikut.



Gambar 11. Kontur Tegangan Von Mises Model A
Sumber: Penulis

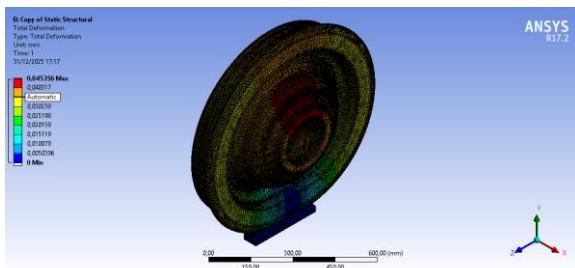


Gambar 12. Kontur Tegangan Von Mises Model B
Sumber: Penulis

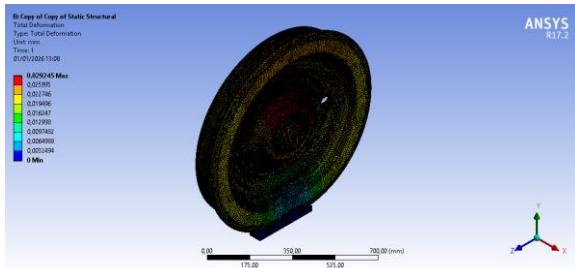
Berdasarkan hasil simulasi, Model A menunjukkan tegangan maksimum sebesar 195,19 MPa, sedangkan Model B menghasilkan tegangan maksimum sebesar 160,82 MPa. Konsentrasi tegangan tertinggi pada kedua model terletak pada area *web plate* bagian bawah yang berdekatan dengan rim dan berada di zona kontak dengan rel, yang merupakan lokasi kritis akibat transfer beban vertikal dari roda ke rel. Tegangan maksimum Model B lebih rendah dibandingkan Model A, yang mengindikasikan distribusi beban yang lebih merata akibat perbedaan geometri, khususnya peningkatan ketebalan *web* dan radius transisi. Meskipun demikian, kedua nilai tegangan masih berada di bawah batas luluh material ASTM A36 sebesar 250 MPa, sehingga secara kriteria tegangan statis kedua desain belum mengalami kegagalan luluh.

Total Deformation

Analisis total deformasi bertujuan untuk mengevaluasi tingkat perpindahan struktur roda akibat pembebahan vertikal dan digunakan sebagai indikator kekakuan struktural desain. Nilai deformasi total menunjukkan seberapa besar perubahan bentuk yang terjadi dari kondisi awal ke kondisi terdeformasi. Kontur deformasi total untuk Model A dan Model B ditampilkan pada gambar berikut.



Gambar 13. Kontur Deformasi Total Model A
Sumber: Penulis

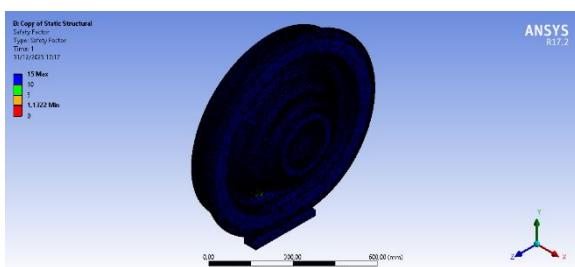


Gambar 14. Kontur Deformasi Total Model B
Sumber: Penulis

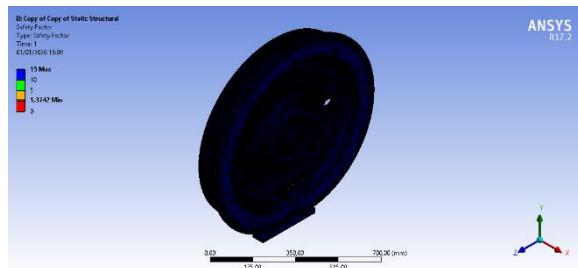
Hasil simulasi menunjukkan bahwa deformasi maksimum terkonsentrasi pada area *web plate* bagian atas yang mendekati hub (*axle*). Model A mengalami deformasi maksimum sebesar 0,045356 mm, sedangkan Model B menunjukkan deformasi maksimum yang lebih kecil yaitu 0,029245 mm. Area rim bawah pada kedua model justru menunjukkan deformasi yang relatif rendah akibat adanya kontak langsung dengan rel yang memberikan penekanan tambahan. Perbedaan nilai deformasi ini menegaskan bahwa Model B memiliki kekakuan struktural yang lebih baik, yang dipengaruhi oleh konfigurasi geometri *web plate* dan distribusi massa yang lebih efektif dalam menahan beban vertikal.

Safety Factor

Analisis *safety factor* dilakukan untuk menilai margin keamanan struktur roda terhadap tegangan maksimum yang terjadi selama pembebangan. *Safety factor* dalam simulasi ini dihitung berdasarkan rasio antara tegangan luluh material (*yield strength*) dengan tegangan *Von Mises* maksimum hasil analisis. Kontur distribusi *safety factor* untuk masing-masing model ditampilkan pada gambar berikut.



Gambar 15. Kontur Safety Factor Model A
Sumber: Penulis



Gambar 16. Kontur Safety Factor Model B
Sumber: Penulis

Berdasarkan hasil simulasi, Model A memiliki nilai *safety factor* minimum sebesar 1,1322, sedangkan Model B menunjukkan nilai *safety factor* minimum yang lebih tinggi yaitu 1,3742. Nilai *safety factor* pada kedua model berada di atas satu (>1), yang menunjukkan bahwa struktur masih bekerja dalam domain elastis dan belum mencapai kondisi luluh material. Model B memiliki margin keamanan yang lebih besar dibandingkan Model A, sejalan dengan nilai tegangan maksimum yang lebih rendah dan deformasi yang lebih kecil. Dalam konteks analisis statis awal, nilai *safety factor* yang lebih tinggi menunjukkan kemampuan struktur dalam menahan variasi beban tanpa mengalami kegagalan, meskipun penilaian kelayakan operasional jangka panjang tetap memerlukan analisis lanjutan seperti kelelahan dan kontak dinamis roda dengan rel.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil *Finite Element Analysis (FEA)* terhadap dua desain roda kereta, dapat disimpulkan bahwa variasi geometri berpengaruh signifikan terhadap performa struktural roda. Model B menunjukkan kinerja yang lebih baik dibandingkan Model A dengan menghasilkan tegangan *Von Mises* maksimum sebesar 160,82 MPa, lebih rendah dibandingkan Model A sebesar 195,19 MPa, serta deformasi maksimum yang lebih kecil yaitu 0,029245 mm dibandingkan 0,045356 mm pada Model A. Selain itu, nilai *safety factor* minimum Model B sebesar 1,3742 lebih tinggi dibandingkan Model A sebesar 1,1322, yang menunjukkan margin keamanan struktural yang lebih baik meskipun kedua model masih berada dalam kondisi elastis dan jauh di bawah batas luluh material ASTM A36 sebesar 250 MPa. Perbedaan performa ini terutama dipengaruhi oleh konfigurasi geometri Model B yang lebih efektif dalam mendistribusikan beban, khususnya pada desain *web plate* dan radius transisi, sehingga Model B dapat direkomendasikan sebagai desain yang lebih optimal untuk menahan pembebangan statis pada roda kereta.

REFERENSI

- [1] A. Alwin, Paryanto, dan Rusnaldi, "Pengaruh Tebal Roda Kereta Terhadap Rasio Slip, Konsumsi Daya, Perubahan Massa Dan Kekasarhan Permukaan," *J. Tek. Mesin*, vol. 10,

- [2] no. 2, hal. 189–196, 2022.
- [3] S. B. Pratomo, H. Taufiq, E. Afrilinda, dan M. Doloksaribu, “Pengembangan Material Tapak Roda Kereta Api Impor dengan Penambahan Paduan dan Perlakuan Panas Normalisasi Pendinginan Kipas,” *J. Ris. Ind.*, vol. 10, no. 2, hal. 83–91, 2016.
- [4] F. R. Priwardana, Triyono, dan Soeharsono, “Analisis Kimia dan Mikrostruktur Rem Blok pada Roda Kereta Rel Listrik dengan Keausan Beralur,” *J. Perkeretaapi. Indones. (Indonesian Railw. Journal)*, vol. 6, no. 1, hal. 53–59, 2022, doi: 10.3736/jpi.v6i1.190.
- [5] D. A. Santoso dan M. Fitri, “Analisis Pengaruh Roda Benjol Terhadap Kekuatan Shaft Pada M-Car Trainset PT. MRT Jakarta,” *J. Tek. Mesin*, vol. 11, no. 2, hal. 111–120, 2022.
- [6] I. M. Ilyasa, I. A. Hendaryanto, Handoko, dan A. Winarno, “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.
- [7] 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.
- [8] I. D. Fahruri, S. Soepriyanto, dan A. S. Tayibnapis, “Pengaruh Perlakuan Panas Terhadap Struktur Mikro dan Tingkat Kekerasan pada Roda Kereta Api Hasil Pengecoran Logam,” *J. Tugas Akhir*, 2021.
- [9] Abdunnaser dan Sumiyanto, “Pengaruh Media Pendingin Terhadap Sifat Mekanik dan Struktur Mikro Plat Baja Karbon ASTM A-36,” *J. Bina Tek.*, vol. 11, no. 2, hal. 155–170, 2015.
- [10] T. Setiazi, M. Tauviqirrahman, dan Muchammad, “Analisis Elemen Hingga Karakteristik Suhu Solid Disc Brake Mobil,” *J. Tek. Mesin S-I*, vol. 10, no. 4, hal. 547–550, 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.01.437.
- [11] 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.*, vol. 1, hal. 1–7, 2021, doi: 10.1088/1742-6596/1845/1/012037.
- [12] R. Z. Rahman, A. D. Putra, dan B. C. Tjiptady, “Analisis Kinerja Connecting Rod Menggunakan MEH (Metode Elemen Hingga) dengan Material Baja Paduan,” *J. Mech. Electr. Technol.*, vol. 1, no. 2, hal. 50–54, 2022.
- [13] K. A. Basyar, A. T. A. Salim, M. Z. Mahfud, I. Yuwono, dan A. P. Utomo, “Analisis Kekuatan Desain Struktur Bogie Frame Kereta
- [14] Ukur pada Kondisi Beban Normal Service dengan Metode Elemen Hingga,” *J. Perkeretaapi. Indones. (Indonesian Railw. Journal)*, vol. 6, no. 2, hal. 1–12, 2022.
- [15] F. Ma’arif dan A. Y. Ismail, “Analisis Kekuatan Rangka Mesin Pencuci Dan Peniris Rumput Laut Menggunakan Metode Elemen Hingga,” *Pros. Semin. Nas. Teknol. Ind. Berkelanjutan V*, hal. 1–19, 2025.
- [16] A. Saepuddin, P. H. Adiwibowo, H. N. Sari, dan Masykur, “Penerapan Simulasi Elemen Hingga untuk Pengujian Kekuatan Sasis Mobil BAJA SAE,” *J. Mekanova Mek. Inov. dan Teknol.*, vol. 10, no. 2, hal. 553–562, 2024.
- [17] A. Zulkarnain, D. I. Kusuma, dan A. Joewono, “Rancang Bangun Prototype Alat Pendekripsi Wheel Flat pada Sarana Kereta K3,” *Bul. Profesi Ins.*, vol. 5, no. 2, hal. 66–71, 2022.
- [18] C. Gao, Y. Zhang, T. Fan, J. Wang, H. Song, dan H. Su, “Microstructure and Mechanical Properties of High-Speed Train Wheels : A Study of the Rim and Web,” *J. Cryst.*, vol. 15, no. 8, hal. 1–19, 2025.
- [19] A. Faza, A. Faridzi, dan Ponidi, “Ketahanan Baja ASTM A36 Terhadap Pengujian Tarik dan Bending dengan Proses Pengelasan SMAW dan Metalografi,” *J. Rekayasa Sist. Eng. dan Manufaktur*, vol. 2, no. 2, hal. 109–118, 2024.
- [20] 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,” *J. Heliyon*, vol. 9, no. 9, hal. 1–12, 2023, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e19708.
- [21] A. Halim, I. Suryapradana, N. S. Radear, Z. S. Gheitsa, dan P. Akbar, “Analisis Struktur Rangka Box Fermentasi Biji Kakao Menggunakan Metode Elemen Hingga,” *J. Rekayasa Mesin*, vol. 20, no. 1, hal. 105–114, 2025.
- [22] F. A. Budiman, A. Septiyanto, A. Dwi, N. Indriawan, 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.
- [23] ANSYS Inc., *ANSYS: Theory Reference*. Southpointe 2600 Ansys Drive Canonsburg, PA 15317: ansys.com, 2025.
- [24] M. N. Rizki, A. Fikri, 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.
- [25] M. R. B. Pradana, C. Anam, I. Yuniwati, M. Lazuardi, E. N. Sari, dan Umar, “Analisis

- Kekuatan Bearing pada Mesin Granulator terhadap Pembebanan Statis Menggunakan Metode Finite Element Analysis (FEA)," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 24, no. 2, hal. 45–49, 2024.
- [24] S. Garindra, R. D. Sampurno, dan Sailon, "Simulasi Tegangan pada Rangka Sepeda Motor ESAF Menggunakan Metode Finite Element Analysis," *J. Sains dan Ilmu Terap.*, vol. 7, no. 2, hal. 101–107, 2024.
- [25] B. Kaur, P. Kaur, dan A. K. Jain, "Analysis of Deformation of RC Beam with Addition of Fly Ash: a Finite Element Based Modeling," *Int. Res. J. Eng. Technol.*, vol. 7, no. 5, hal. 6640–6649, 2020.
- [26] M. D. Mustaqim, D. T. Santoso, dan Ujiburrahman, "Design and Structural Evaluation of an Electric Motorcycle Frame Using FEA," *J. Mech. Electr. Technol.*, vol. 04, no. 03, hal. 168–178, 2025.
- [27] H. Pilargenta, C. M. P., M. D. F. R., M. A. Al Qoroni, dan N. Adyono, "Analisa Faktor Keamanan pada Desain Alat Die Cut Menggunakan Simulasi Finite Element Analysis," *Technol. Mech. Eng. Semin.*, vol. 1, no. 1, hal. 144–155, 2024.
- [28] F. R. Susilo, R. Ismail, dan B. Setiyana, "Analisis Tegangan Von Mises, Deformasi, dan Safety Factor pada Rangka Sepeda Motor Matic 100 CC Menggunakan Metode Elemen Hingga," *J. Tek. Mesin S-1*, vol. 13, no. 4, hal. 13–20, 2025.
- [29] R. Pонсека, I. Akbar, T. P. Sianipar, S. A. Valianta, dan Madagaskar, "Analisis Struktur Kursi Roda Multi Guna Menggunakan Finite Element Analisis dan Analitik," *J. Rekayasa Mesin*, vol. 24, no. 2, hal. 101–109, 2024.
- [30] H. Abbas, D. Juma, dan M. 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. 2, hal. 96–102, 2020.
- [31] 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.