

Analisis Pembebaan Rel Kereta Api PNM Menggunakan Finite Element Method (FEM)

Bi Asngali¹, Rakhmad Gusta Putra Bagus¹, Daris Itsar Samudra¹, Aldi Ika Saputra¹

¹Jurusan, Teknik, Politeknik Negeri Madiun

¹biasngalimt@gmail.com, ²

ABSTRACT

Repeated loading on railway rails can trigger structural failure, leading to a reduction in strength if not carefully analyzed. This study aims to analyze the strength of PNM Railway rails using the Finite Element Method (FEM). The rail analyzed is the UIC-54 type with a length of 750 mm. The analysis begins with the calculation of elliptical contact between the wheel and rail based on Hertzian theory and standards from the European Committee for Standardization (2011). Simulation results show that the maximum deflection on the straight rail, at 1.3713 mm, remains within the safe limit—below 3% of the original length. The maximum von Mises stress recorded is 888.82 MPa on the inner curved rail, which is still below the material yield strength (877 MPa), indicating structural safety. However, the minimum safety factor in this condition is 0.9867, which falls short of the minimum static load standard of 1.25, rendering it unsafe under these specific conditions. Conversely, the safety factor values on the straight rail and outer curved rail exceed the standard and fall within the safe zone. Thus, the PNM Railway rail structure is generally safe for use, except in specific conditions on the inner curved rail, which require further attention.

INTISARI

Pembebaan berulang pada rel kereta dapat memicu kegagalan struktural yang berdampak pada penurunan kekuatan jika tidak dianalisis secara cermat. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kekuatan rel Kereta Api PNM menggunakan metode elemen hingga (finite element method/FEM). Rel yang dianalisis adalah tipe UIC-54 sepanjang 750 mm. Analisis dimulai dengan perhitungan kontak elips roda dan rel berdasarkan teori Hertzian serta acuan dari European Committee for Standardization (2011). Hasil simulasi menunjukkan bahwa defleksi maksimum pada rel lurus sebesar 1,3713 mm berada dalam batas aman, yaitu di bawah 3% dari panjang awal. Tegangan von Mises maksimum tercatat sebesar 888,82 MPa pada rel dalam lengkung horizontal, yang masih berada di bawah batas yield strength material (877 MPa), menunjukkan bahwa struktur masih tergolong aman. Namun, nilai faktor keamanan minimum pada kondisi tersebut adalah 0,9867, lebih rendah dari standar minimum 1,25 untuk beban statis, sehingga dinyatakan tidak aman pada kondisi spesifik tersebut. Sebaliknya, pada rel lurus dan rel luar lengkung horizontal, nilai faktor keamanan melebihi standar dan berada dalam zona aman. Dengan demikian, struktur rel Kereta Api PNM secara umum aman digunakan, kecuali pada kondisi tertentu pada rel dalam lengkung horizontal yang memerlukan perhatian lebih lanjut.

Kata kunci: Rel kereta api UIC 54, Metode elemen hingga, Defleksi, dan Safety factor.

I. Pendahuluan

Laju pertumbuhan kendaraan pribadi perlu perhatian pemerintah. Untuk masalah ini pemerintah mendorong peningkatan kualitas transportasi umum, salah satunya adalah moda transportasi kereta api. Transportasi didefinisikan sebagai kegiatan mengangkut barang atau penumpang dari satu tempat ke tempat lain [1]. Kereta api menjadi pilihan utama masyarakat karena efisiensi dan kapasitasnya. Namun, berbagai kecelakaan masih terjadi, seperti akibat baut pengikat rel yang longgar, bantalan rel yang rapuh, serta keausan rel yang berlebih, yang berpotensi menyebabkan roda keluar dari jalur (derailment).

Sebagai bagian dari sistem transportasi nasional, kereta api memerlukan pengawasan dan desain prasarana yang sesuai standar, terutama dalam merancang rel yang mampu menahan beban dan kecepatan operasional. Salah satu teknologi kereta yang berkembang adalah Kereta Api PNM buatan PT INKA, yang digerakkan oleh empat sumber energi: diesel, pantograf (LAA), baterai, dan fuel cell. Kereta ini memiliki dua car dengan bogie penggerak dan melaju pada lintasan single track sepanjang 700 meter menggunakan rel jenis UIC-54.

Karena rel mengalami beban berulang, penting dilakukan analisis terhadap potensi kelelahan material (fatigue). UIC-54

termasuk rel kelas I dengan kapasitas 2×10^6 ton/tahun (Permenhub No. 60 Tahun 2012). Untuk itu, metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM) digunakan dalam simulasi pembebaan, frekuensi alami, tegangan, dan defleksi, dengan dukungan perangkat lunak Inventor. Penelitian ini bertujuan menganalisis momen inersia, tegangan, defleksi, dan faktor keamanan pada rel Kereta Api PNM.

II. Metodologi Penelitian

Penelitian dengan cara deskriptif kuantitatif yang kemudian dilakukan simulasi ulang berdasar data-data yang didapat. Dalam masalah ini ditujukan untuk menjelaskan peristiwa pembebaan roda statis terhadap Rel Kereta Api PNM dengan melihat fakta di lapangan yang diimplementasikan dengan simulasi menggunakan software metode elemen hingga sehingga dapat diambil kesimpulan untuk analisis kekuatan terhadap Rel Kereta Api PNM. Dari hasil penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai acuan.

A. Metode

Penelitian melakukan simulasi menggunakan metode elemen hingga (FEM), dilanjutkan dengan studi literatur mengenai tipe rel Kereta Api PNM dan wawancara dengan PT

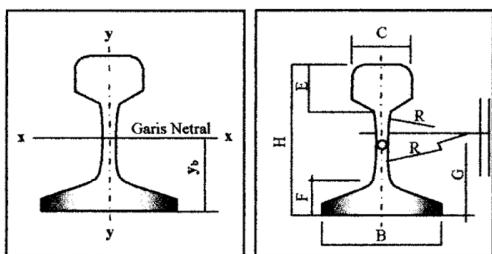
INKA untuk memperoleh data beban operasional. Berdasarkan data tersebut, dirumuskan masalah penelitian, yakni: analisis defleksi, tegangan normal, kegagalan struktur (von Mises), dan safety factor pada rel Kereta Api PNM menggunakan FEM. Tahap selanjutnya adalah merumuskan batasan, tujuan, serta manfaat penelitian, dan menyusun tinjauan pustaka dari berbagai sumber relevan. Rel UIC-54 simulasi sepanjang 750 mm dimodelkan sesuai spesifikasi dan dibebani gaya dari berat penuh Kereta Api PNM. Simulasi FEM digunakan untuk memperoleh tegangan, defleksi, dan safety factor. Harapannya penelitian ini sebagai evaluasi kesesuaian hasil simulasi terhadap standar teknis yang berlaku.

B. Metode deskriptif kuantitatif

Pembebanan yang berulang-ulang dari Kereta Api yang melewati rel akan menghasilkan fatigue. Berdasarkan klasifikasi, rel kereta UIC 54 termasuk dalam kelas I dimana kapasitas angkut rel yaitu sebesar 20×10^6 ton/tahun, kecepatan maksimal 120 km/jam, dengan beban gandar maksimal 18 ton [2]. Penamaan tipe rel untuk tujuan klasifikasi di Indonesia didasarkan pada beratnya (dalam kilogram, kg) per meter panjang. Sebagai contoh, tipe R54 menunjukkan bahwa rel memiliki berat sekitar 54 kg per meter panjang.

Tabel 1 Besaran Geometrik Rel [2]

Besaran Geometri Rei	Tipe Rei			
	R42	R50	R54	R60
H (mm)	138,00	153,00	159,00	172,00
B (mm)	110,00	127,00	140,00	150,00
C (mm)	68,50	65,00	70,00	74,30
D (mm)	13,50	15,00	16,00	16,50
E (mm)	40,50	49,00	49,40	51,00
F (mm)	23,50	30,00	30,20	31,50
G (mm)	72,00	76,00	74,79	80,95
R (mm)	320,00	500,00	508,00	120,00
A (cm ²)	54,26	64,20	69,34	76,86
W(kg/m)	42,59	50,40	54,43	60,34
I _x (cm ⁴)	1369	1960	2346	3055
Y _b (mm)	68,50	71,60	76,20	80,95
A	= luas penampang			
W	= berat rei permeter			
I _x	= momen inersia terhadap sumbu x			
Y _b	= jarak tepi bawah rei ke garis netral			



Gbr 1 Gambar Dimensi Profil Tipe R54 [2]

Teknologi perkeretaapian pada dasarnya merupakan sistem bogie yang berjalan di atas rel. Rel kereta api sendiri memiliki spesifikasi teknis yang disesuaikan dengan karakteristik dan kebutuhan operasional kereta api [3]. PT INKA (Persero), sebagai perusahaan manufaktur sarana perkeretaapian terbesar di Indonesia, memegang peran penting dalam mendukung pengembangan teknologi ini [4]. Untuk pertama kalinya, PT

INKA telah memproduksi Kereta Api PNM, yaitu kereta yang digerakkan oleh gabungan empat sumber daya: mesin diesel, pantograf (LAA), baterai, dan fuel cell. Kereta ini terdiri atas dua car, masing-masing dilengkapi dengan bogie penggerak mandiri, dan mampu mencapai kecepatan maksimum 35 km/jam serta kecepatan operasional hingga 25 km/jam.

Salah satu aspek penting dalam perancangan konstruksi rel adalah memastikan bahwa fondasi rel mampu menahan beban dengan baik, yang dapat diketahui melalui pengujian defleksi. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat kelenturan rel saat menerima beban. Dari hasil kelenturan tersebut, dapat diperoleh informasi mengenai kekakuan (*stiffness*) dan kekuatan (*strength*) rel terhadap defleksi. Parameter-parameter ini harus berada dalam batas aman yang telah ditetapkan, karena jika melebihi batas tersebut dapat menyebabkan kerusakan pada elemen struktur [5]. Selain itu, beban berulang yang dihasilkan oleh Kereta Api PNM saat melintasi rel dapat memicu kegagalan struktur seperti retak, korosi, aus, patah, atau deformasi permanen. Karena penelitian ini difokuskan pada pengaruh beban eksternal, maka tegangan yang ditimbulkan dari pembebahan tersebut menjadi faktor utama penyebab potensi kegagalan. Teori kegagalan yang digunakan dalam penelitian ini adalah teori energi distorsi atau teori von Mises, yang dikenal lebih akurat dan dapat diterapkan pada material bersifat ulet maupun getas.

Faktor keselamatan juga menjadi pertimbangan penting dalam perancangan struktur. Nilai faktor keamanan (*safety factor*) dapat dihitung untuk memastikan bahwa struktur rel mampu bekerja dengan aman dalam kondisi operasional. Salah satu metode yang mampu menangani geometri kompleks dan digunakan dalam perhitungan defleksi, tegangan, faktor keamanan, serta berbagai kriteria kegagalan adalah metode elemen hingga (Finite Element Method/FEM)[6]. Metode ini bekerja berdasarkan prinsip diskritisasi, yakni membagi struktur kompleks menjadi bagian-bagian kecil (elemen hingga), sehingga memungkinkan analisis numerik yang lebih terperinci [7].

III. Hasil dan Pembahasan

A. Analisis Defleksi pada Rel Kereta Api PNM

Defleksi pada struktur rel merupakan salah satu indikator penting dalam penilaian kekakuan dan kekuatan material saat menerima pembebahan vertikal. Dalam simulasi menggunakan Metode Elemen Hingga (Finite Element Method/FEM), defleksi diketahui melalui parameter directional deformation dengan arah utama pada sumbu vertikal (Y). Analisis ini dilakukan dengan lima posisi pembebahan yang berbeda terhadap rel, baik pada kondisi rel lurus maupun lengkung horizontal, dan hasilnya divalidasi berdasarkan standar yang dikeluarkan oleh European Committee for Standardization [7], di mana batas maksimum defleksi yang diperbolehkan adalah 3% dari panjang awal.

Dengan panjang awal rel simulasi sepanjang 750 mm, maka nilai defleksi maksimum yang diizinkan adalah:

$$\text{Defleksi Izin} = 3\% \times 750 \text{ mm} = 2,25 \text{ mm}$$

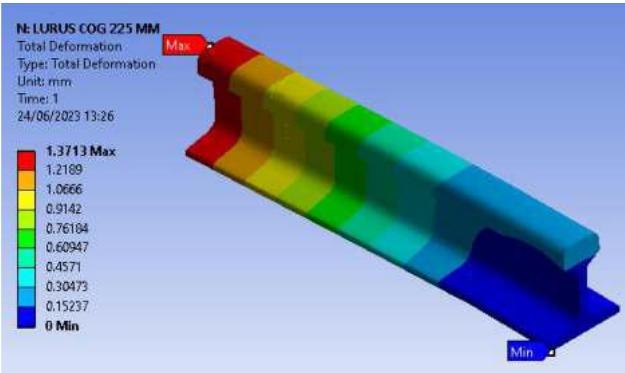
1) Defleksi pada Rel Lurus

Simulasi defleksi dilakukan pada lima kondisi kontak roda dengan rel, sebagai berikut:

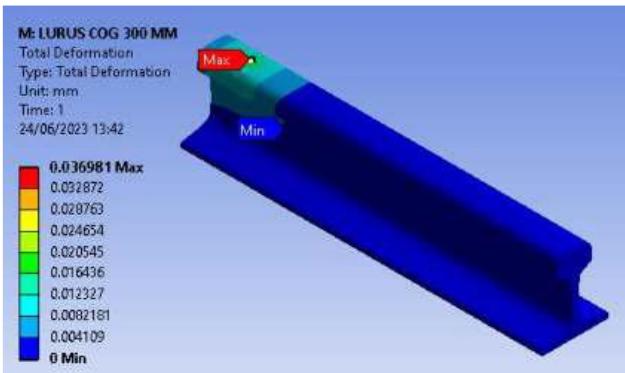
- Kondisi 1: di COG 0 mm, Defleksi: 0,061807 mm

- Kondisi 2: di COG 100 mm Defleksi: 0,055401 mm
- Kondisi 3: di COG 200 mm Defleksi: 0,041674 mm
- Kondisi 4: di COG 225 mm (di tepi bantalan) Defleksi: 1,3713 mm
- Kondisi 5: di COG 300 mm (di tengah bantalan) Defleksi: 0,036981 mm

Sebagai contoh gambar hasil simulasi dari defleksi yang terkecil dan terbesar



Gbr 2 Hasil Defleksi Rel Lurus pada Kondisi 4



Gbr 3 Hasil Defleksi Rel Lurus pada Kondisi 5

Pada semua kondisi, nilai defleksi yang diperoleh masih berada jauh di bawah batas aman yang ditetapkan. Visualisasi simulasi memperlihatkan dominasi warna biru pada tumpuan, menandakan area dengan deformasi minimum, serta warna hijau pada kepala rel, yang mengindikasikan titik defleksi maksimum.

Semua kondisi pada rel lurus dinyatakan aman, dengan nilai defleksi maksimum hanya mencapai 1,3713 mm, jauh di bawah batas 2,25 mm.

2) Defleksi pada Rel Lengkung Horizontal

Analisis dibagi menjadi dua bagian: rel dalam dan luar.

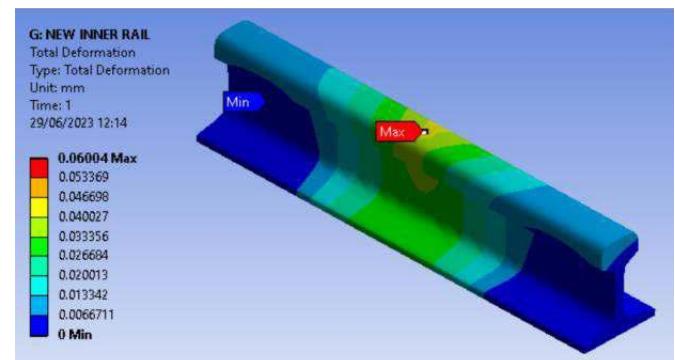
a. Rel Dalam

- Kondisi 1 (0 mm): 0,06004 mm
- Kondisi 2 (100 mm): 0,053332 mm
- Kondisi 3 (200 mm): 0,039191 mm
- Kondisi 4 (225 mm): 0,036534 mm
- Kondisi 5 (300 mm): 0,032838 mm

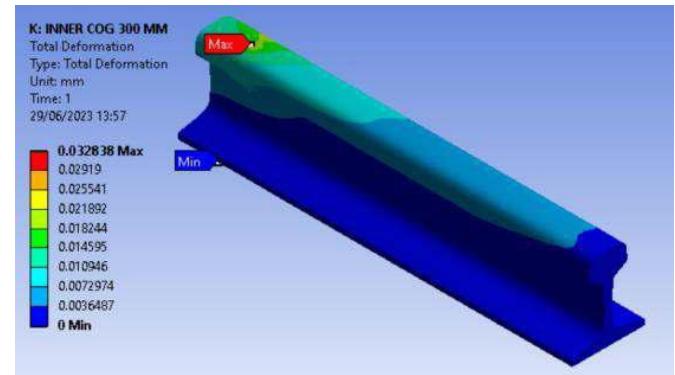
b. Rel Luar

- Kondisi 1 (0 mm): 0,064757 mm
- Kondisi 2 (100 mm): 0,074338 mm
- Kondisi 3 (200 mm): 0,044649 mm
- Kondisi 4 (225 mm): 0,042554 mm
- Kondisi 5 (300 mm): 0,042237 mm

Defleksi maksimum: 0,074338 mm pada kondisi 2
Defleksi minimum: 0,042237 mm pada kondisi 5



Gbr 4 Defleksi maksimum: 0,06004 mm pada kondisi 1



Gbr 5 Defleksi minimum: 0,032838 mm pada kondisi 5

Dari hasil di atas, seluruh nilai defleksi untuk rel lengkung, baik rel dalam maupun luar, masih di bawah 2,25 mm, sehingga dinyatakan aman.

B. Analisis Tegangan Normal (Normal Stress)

Tegangan normal adalah gaya yang bekerja tegak lurus terhadap bidang penampang, dalam konteks ini diorientasikan pada sumbu Y (vertikal) akibat gaya dari roda kereta yang menekan rel. Analisis ini bertujuan untuk mengevaluasi seberapa besar respons material terhadap pembebanan langsung di setiap posisi roda.

Validasi dilakukan dengan mengacu pada Permenhub KM 43 Tahun 2010, yang menetapkan bahwa tegangan normal harus berada di bawah 75% dari nilai yield strength. Adapun berdasarkan Tabel 2.3, yield strength material head hardened rail adalah 877 MPa, sehingga nilai batas aman tegangan normal adalah:

$$\text{Tegangan izin} = 75\% \times 877 \text{ MPa} = 657,75 \text{ MPa}$$

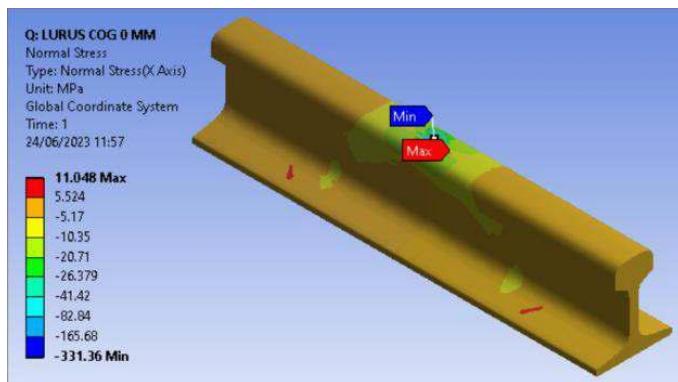
1) Normal Stress pada Rel Lurus

Simulasi menghasilkan nilai tegangan normal maksimum sebagai berikut:

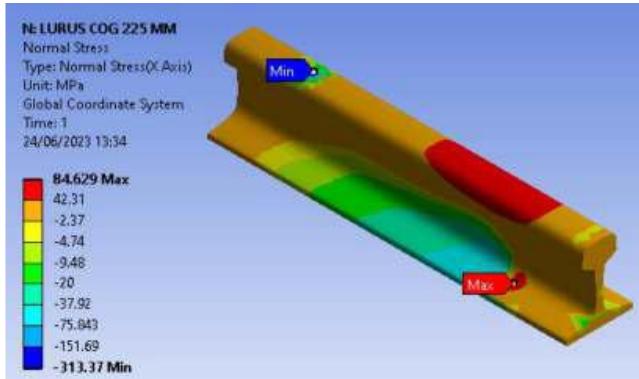
- Kondisi 1 (0 mm): 11,048 MPa
- Kondisi 2 (100 mm): 13,597 MPa
- Kondisi 3 (200 mm): 16,863 MPa
- Kondisi 4 (225 mm): 84,629 MPa
- Kondisi 5 (300 mm): 18,749 MPa

Nilai maksimum terjadi pada kondisi 4 saat roda bersentuhan pada posisi tepi bantalan. Meskipun nilai ini

paling tinggi dalam simulasi, namun masih jauh di bawah batas aman sebesar 657,75 MPa.



Gbr 6: Hasil Normal Stress Rel Lurus pada Kondisi 1



Gbr 7: Hasil Normal Stress Rel Lurus pada Kondisi 4

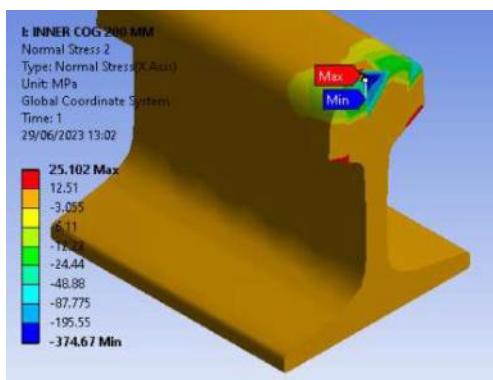
Visualisasi tegangan menunjukkan dominasi warna merah dan oranye pada bagian kepala dan badan rel yang menandakan konsentrasi tegangan tertinggi di area tersebut. Warna hijau dan kuning menunjukkan tegangan yang lebih rendah, umumnya tersebar di bagian penopang atau kaki rel.

Seluruh kondisi tegangan normal pada rel lurus memenuhi standar keamanan dan dinyatakan aman terhadap kegagalan material.

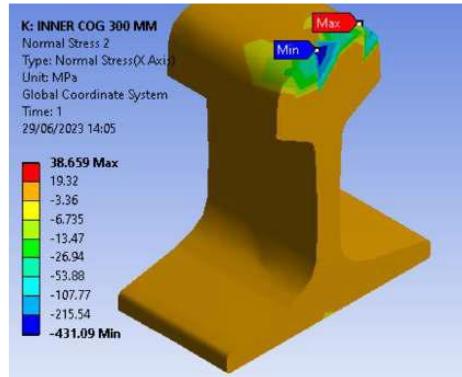
2) Normal Stress pada Rel Lengkung Horizontal

a. Rel Dalam

- Kondisi 1 (0 mm): 27,93 MPa
- Kondisi 2 (100 mm): 29,166 MPa
- Kondisi 3 (200 mm): 25,102 MPa
- Kondisi 4 (225 mm): 30,716 MPa
- Kondisi 5 (300 mm): 38,659 MPa



Gbr 8: Irisan Normal Stress Rel Dalam pada Kondisi 3



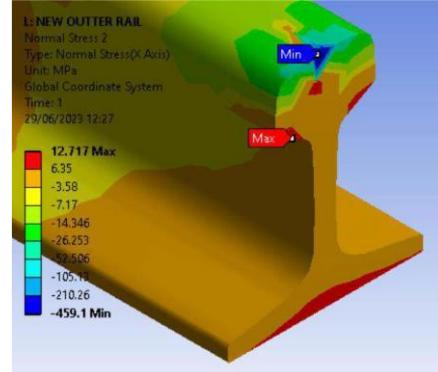
Gbr 9: Irisan Normal Stress Rel Dalam pada Kondisi 5

Nilai maksimum tegangan normal pada rel dalam terjadi pada kondisi 5, dan pada rel luar pada kondisi 4. Namun, semua hasil berada jauh di bawah batas tegangan izin, yaitu 657,75 MPa.

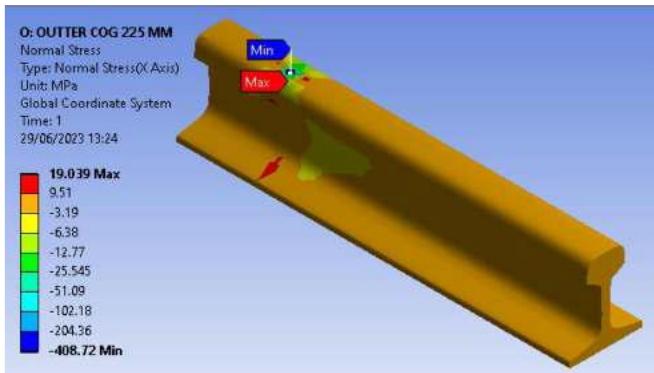
b. Rel Luar

- Kondisi 1 (0 mm): 12,717 MPa
- Kondisi 2 (100 mm): 16,670 MPa
- Kondisi 3 (200 mm): 17,039 MPa
- Kondisi 4 (225 mm): 19,039 MPa
- Kondisi 5 (300 mm): 17,763 MPa

Simulasi menunjukkan pola distribusi tegangan serupa seperti pada rel lurus, dengan warna dominan merah dan oranye pada titik kontak antara roda dan rel, serta distribusi tegangan menurun seiring menjauhnya dari titik kontak.



Gbr 10 Irisan Normal Stress Rel Luar pada Kondisi 1



Gbr 11 Hasil Normal Stress Rel Luar pada Kondisi 4

Seluruh nilai tegangan normal pada rel lengkung horizontal berada dalam batas aman, sehingga struktur dinyatakan tidak mengalami risiko kegagalan akibat tegangan normal.

C. Analisis Equivalent Stress (Von Mises Stress)

Tegangan ekuivalen atau equivalent stress yang sering digunakan dalam analisis kekuatan struktur adalah tegangan Von Mises. Teori kegagalan Von Mises menyatakan bahwa suatu material dianggap gagal apabila nilai tegangan ekuivalennya melebihi yield strength dari material tersebut [9]. Oleh karena itu, tegangan Von Mises menjadi parameter krusial dalam menilai keamanan struktur rel ketika menerima beban dinamis maupun statis.

Yield strength material rel: 877 MPa

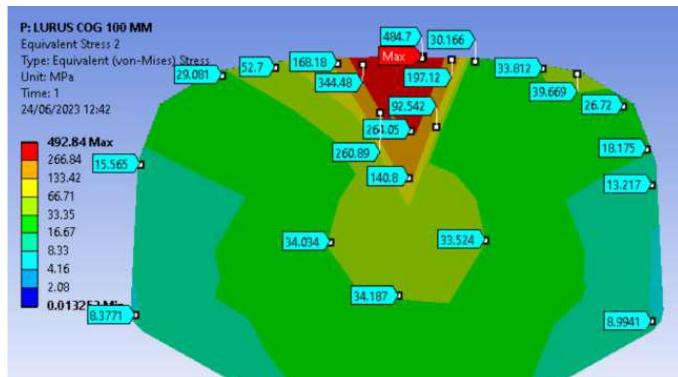
Batas kegagalan von Mises: ≤ 877 MPa

1) Tegangan Von Mises pada Rel Lurus

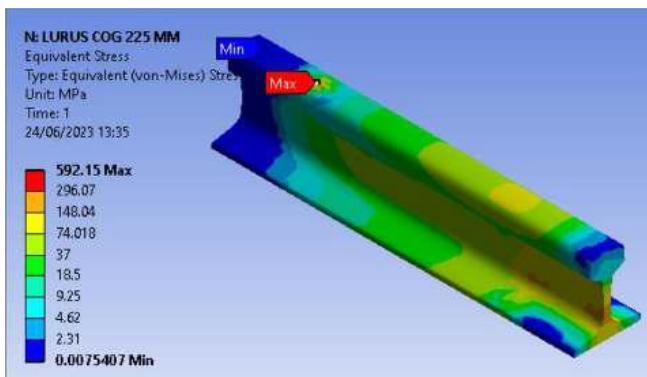
Simulasi dilakukan pada lima kondisi pembebahan roda terhadap rel lurus dengan hasil sebagai berikut:

- Kondisi 1 (0 mm): 567,38 MPa
- Kondisi 2 (100 mm): 492,84 MPa
- Kondisi 3 (200 mm): 503,26 MPa
- Kondisi 4 (225 mm): 592,15 MPa
- Kondisi 5 (300 mm): 558,30 MPa

Nilai maksimum tegangan Von Mises terjadi pada kondisi 4, sedangkan nilai minimum pada kondisi 2. Visualisasi simulasi menunjukkan dominasi warna biru pada area luar rel dan warna merah di sekitar area kontak roda sebagai lokasi akumulasi tegangan tertinggi.



Gbr 10: Irisan Equivalent (Von Mises) Stress Rel Lurus pada Kondisi 2



Gbr 11 Hasil Equivalent (Von Mises) Stress Rel Lurus pada Kondisi 4

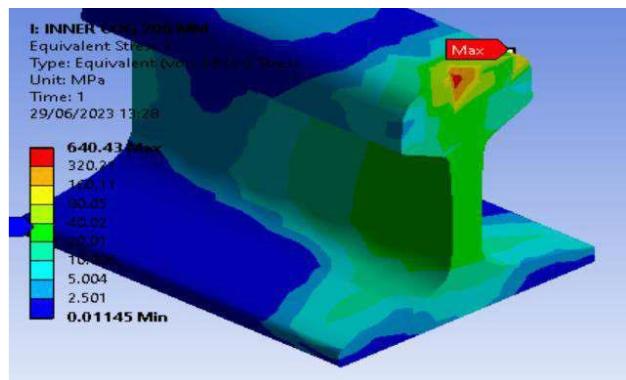
Seluruh kondisi menunjukkan nilai *Von Mises stress* < 877 MPa, sehingga rel dinyatakan aman dari risiko kegagalan akibat tegangan ekuivalen.

2) Tegangan Von Mises pada Rel Lengkung Horizontal

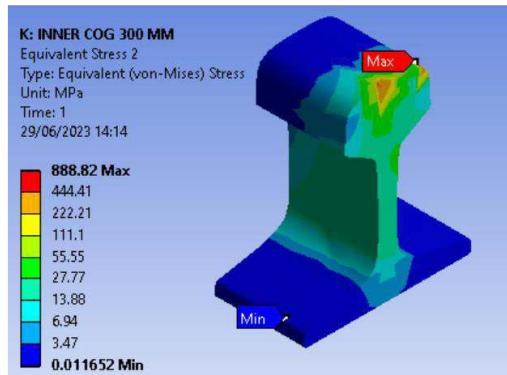
a. Rel Dalam

- Kondisi 1 (0 mm): 672,16 MPa
- Kondisi 2 (100 mm): 833,44 MPa
- Kondisi 3 (200 mm): 640,43 MPa
- Kondisi 4 (225 mm): 823,96 MPa
- Kondisi 5 (300 mm): 888,82 MPa

Nilai maksimum pada kondisi 5 melebihi yield strength, sehingga secara teknis dianggap memasuki batas risiko kegagalan struktur. Kondisi ini mengindikasikan bahwa rel dalam di lengkung horizontal menerima beban paling berat, khususnya saat roda berada di tengah bantalan pada jarak 300 mm dari pusat gravitasi (COG). Sesuai teori rel dalam pada lintasan lengkung mengalami tekanan lebih besar karena menerima gaya sentrifugal [10].



Gbr 12 Irisan Equivalent Von Mises Stress Rel Dalam, Kondisi 3



Gbr 13: Irisan Equivalent (Von Mises) Stress Rel Dalam, Kondisi 5

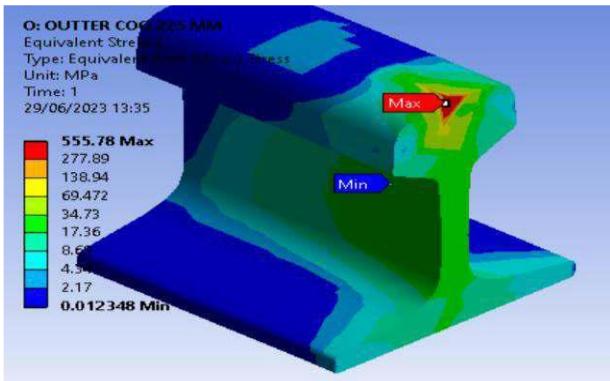
Meskipun hanya satu kondisi melebihi batas yield strength, secara umum struktur ini memerlukan perhatian khusus pada rel dalam di tikungan, terutama pada desain pemeliharaan.

b. Rel Luar

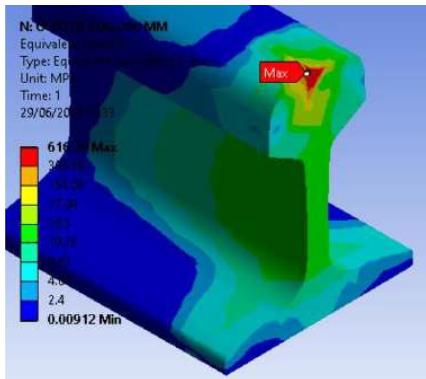
- Kondisi 1 (0 mm): 577,86 MPa
- Kondisi 2 (100 mm): 579,86 MPa
- Kondisi 3 (200 mm): 616,35 MPa
- Kondisi 4 (225 mm): 555,78 MPa
- Kondisi 5 (300 mm): 585,53 MPa

Nilai maksimum terjadi pada kondisi 3, namun masih berada di bawah batas aman (877 MPa). Dengan demikian,

semua simulasi pada rel luar dinyatakan aman dari risiko kegagalan akibat tegangan ekuivalen.



Gbr 14 Irisan Equivalent Von Mises Stress Rel Luar pada Kondisi 4



Gbr 15: Irisan Equivalent Von Mises Stress Rel Luar pada Kondisi 3

Pada rel luar, seluruh nilai tegangan Von Mises masih aman. Namun, pada rel dalam khususnya kondisi 5 (888,82 MPa), nilai Von Mises melebihi batas yield strength, sehingga memerlukan evaluasi lebih lanjut dan perkuatan desain pada jalur tikungan.

D. Analisis Faktor Keamanan (Safety Factor)

Faktor keamanan (Safety Factor) merupakan perbandingan antara kekuatan material (yield strength) dengan tegangan yang bekerja (biasanya tegangan Von Mises) pada struktur. Nilai ini digunakan untuk menilai tingkat keandalan dan batas aman struktur terhadap risiko kegagalan.

Menurut jenis pembebanan untuk beban statis, nilai faktor keamanan ideal berada pada rentang 1,25–2. Jika nilai SF di bawah 1, maka struktur dianggap tidak aman, karena beban kerja melebihi kemampuan material.

Yield Strength rel = 877 MPa

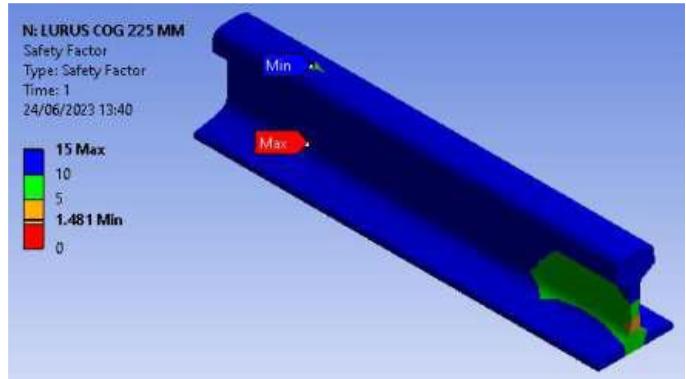
1) Faktor Keamanan pada Rel Lurus

Nilai faktor keamanan dari lima kondisi pembebanan pada rel lurus adalah sebagai berikut:

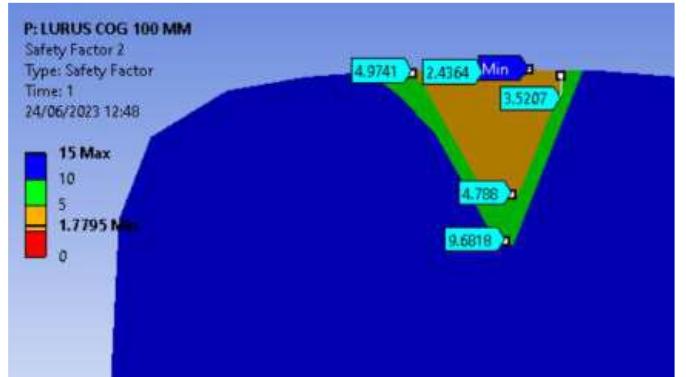
Kondisi Safety Factor

Kondisi 1 (0 mm)	1,5457
Kondisi 2 (100 mm)	1,7795
Kondisi 3 (200 mm)	1,7426
Kondisi 4 (225 mm)	1,4814
Kondisi 5 (300 mm)	1,5708

Seluruh nilai safety factor berada dalam rentang 1,4 – 1,78, dan dengan demikian struktur rel lurus dinyatakan aman terhadap pembebanan statik.



Gbr 16: Hasil Safety Factor Rel Lurus pada Kondisi 4

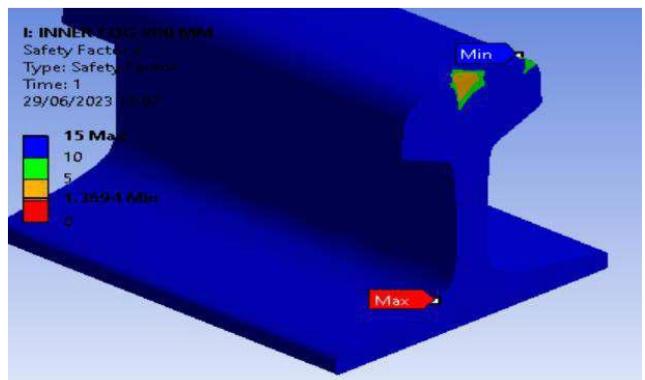


Gbr 17: Irisan Faktor Keamanan Rel Lurus pada Kondisi 2

2) Faktor Keamanan pada Rel Lengkung Horizontal

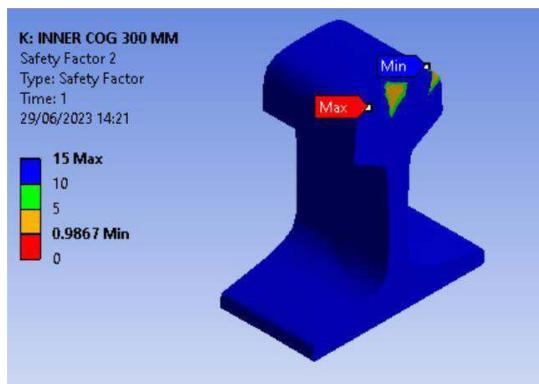
a) Rel Dalam

Kondisi	Safety Factor
Kondisi 1 (0 mm)	1,3048
Kondisi 2 (100 mm)	1,0523
Kondisi 3 (200 mm)	2,1545 (tertinggi)
Kondisi 4 (225 mm)	1,0644
Kondisi 5 (300 mm)	0,9867 (terendah, tidak aman)



Gbr 18: Irisan Safety Factor Rel Dalam pada Kondisi 3

Kondisi 5 menunjukkan nilai < 1, yang berarti struktur pada rel dalam tidak aman jika menerima pembebanan berulang di titik tersebut. Meskipun kondisi 3 sangat ideal (SF > 2), kondisi 2, 4, dan terutama 5 perlu menjadi perhatian khusus untuk dilakukan penguatan struktur atau perencanaan ulang.

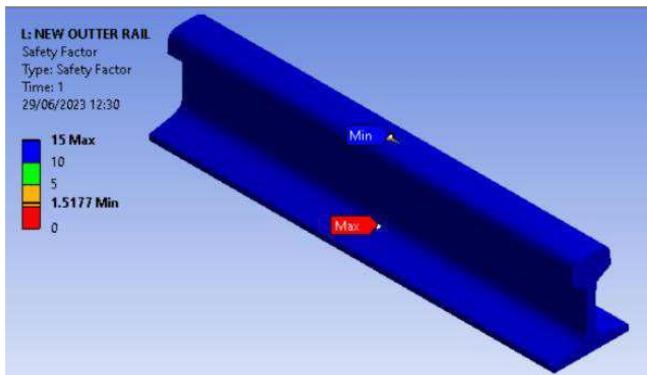


Gbr 19: Irisan Safety Factor Rel Dalam pada Kondisi 5

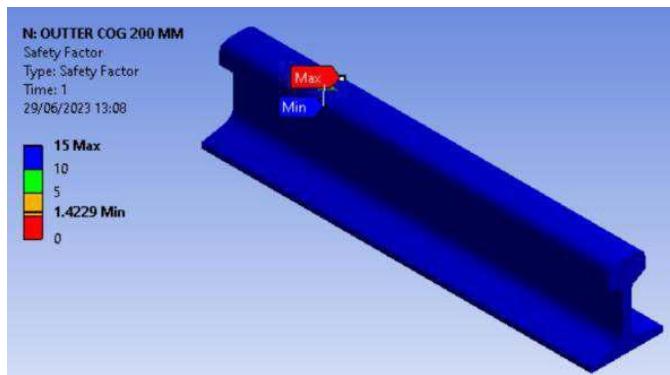
b) Rel Luar

Kondisi Safety Factor

Kondisi 1 (0 mm)	1,5177
Kondisi 2 (100 mm)	1,5122
Kondisi 3 (200 mm)	1,4229 (terendah)
Kondisi 4 (225 mm)	1,5780
Kondisi 5 (300 mm)	1,4978



Gbr 20: Hasil Safety Factor Rel Luar pada Kondisi 1



Gbr 21: Hasil Safety Factor Rel Luar pada Kondisi 3

Semua nilai safety factor pada rel luar berada dalam rentang aman (1,42 – 1,75). Dengan demikian, struktur rel luar pada lengkung horizontal secara umum aman, meskipun kondisi 3 menunjukkan margin keamanan paling rendah.

IV. Kesimpulan

Defleksi pada semua kondisi baik rel lurus maupun lengkung masih di bawah batas maksimum 2,25 mm, sehingga aman terhadap deformasi elastis.

Tegangan Normal tidak ada kondisi yang melebihi batas 657,75 MPa, seluruh struktur dinyatakan aman.

Tegangan Von Mises hanya rel dalam kondisi 5 yang melebihi yield strength 888,82 MPa > 877 MPa, sehingga memerlukan perhatian khusus.

Faktor Keamanan Rel lurus dan rel luar dalam semua kondisi aman, namun rel dalam kondisi 5 memiliki faktor keamanan < 1, menunjukkan potensi kegagalan.

REFERENSI

- [1] Kadir, H. A., & Olong. 2006. "Transportasi: Peran dan Dampaknya Dalam Pertumbuhan Ekonomi Nasional." *Jurnal Perencanaan dan Pengembangan Wilayah Wahana Hijau*. 17(2) : 264 – 269.
- [2] Peraturan Menteri "PM No. 60 Tahun 2012. Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api". Jakarta : Kementerian Perhubungan RI.
- [3] Ihlas, Apriardi. 2017. "Analisis Kerusakan Rel Kereta Api Angkut Batubara". Bandung: Balai Besar Bahan dan Barang Teknik, Jl. Sangkuriang No.14 Bandung.
- [4] PT. INKA (Persero) 2022 Tentang Spesifikasi Teknis Kereta Api PNM.
- [5] Suharwanto, Syafrizal & Basori. 2015. Analisis Defleksi Batang Lentur Menggunakan Tumpuan Jepit dan Rol pada Material Aluminium 6063 Profil U dengan Beban Terdistribusi. *Jurnal Konversi Energi dan Manufaktur* : 1, 50 – 58.
- [6] Setiono, Joko., Sugiarto, Agus., & Wahiddin. 2015. Pengaruh Dimensi Penampang Terhadap Rasio Desain dan Lentutan pada Inverted Beam. *Jurnal Teknik Ilmu dan Aplikasi* : 130 – 134.
- [7] Pranata, Yosafat Aji. 2019. Diktat Kuliah Metode Elemen Hingga. Bandung, Universitas Kristen Maranatha.
- [8] European Committee for Standardization. 2011. EN 12 663-2: Railway applications. Structural requirements of railway vehicle bodies. Part 2: Freight wagons.
- [9] Agus, Choirin Moch. 2014. Modul Ajar Metode Elemen Hingga. Universitas Brawijaya.
- [10] Utomo, Suryo, H. T. 2009. Jalan Rel. Yogyakarta: Beta Offset Yogyakarta.
- [11] TCP/IP," M. Eng. thesis, Indian Institute of Science, Bangalore, India, Jan. 1999.
- [12] J. Padhye, V. Firoiu, dan D. Towsley, "A Stochastic Model of TCP Renocongestion Avoidance and Control," Univ. of Massachusetts, Amherst, MA, CMPSCI Tech. hal. 99-02, 1999.
- [13] *Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification*, IEEE Std. 802.11, 1997.