

Analisis Struktur Sederhana Rel Kereta Api: Studi Kasus Balok Rangkaian Rel dengan Beban Merata Roda Kereta

Bima Sakti

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Medan Area

Jl. H. Agus Salim Siregar, Kenangan Baru, Kec. Medan Tembung, Kabupaten Deli Serdang, Sumatera Utara

Email: bima95345@gmail.com

Abstrak — Rel kereta api merupakan komponen struktural penting dalam sistem perkeretaapian yang berfungsi menyalurkan beban dinamis dari roda kereta ke sistem bantalan dan balas. Pemahaman terhadap perilaku struktural rel sangat diperlukan dalam pendidikan teknik sipil, khususnya dalam konteks pembelajaran mekanika struktur. Penelitian ini bertujuan menganalisis gaya dalam dan tegangan yang terjadi pada potongan rel kereta api menggunakan pendekatan balok sederhana dua tumpuan yang diberi beban merata. Metode yang digunakan adalah pendekatan analitis berbasis persamaan mekanika teknik untuk menghitung momen lentur maksimum, gaya geser maksimum, dan tegangan normal maksimum. Parameter yang dianalisis meliputi panjang bentang 0,75 meter, beban merata sebesar 15 kN/m, serta karakteristik penampang baja rel. Hasil analisis menunjukkan bahwa momen lentur maksimum yang terjadi sebesar 1,05 kNm, gaya geser maksimum sebesar 5,63 kN, dan tegangan lentur maksimum sebesar 22,5 MPa. Nilai tegangan tersebut berada jauh di bawah batas tegangan izin material baja, yang menunjukkan bahwa struktur rel dalam studi ini aman secara struktural. Penelitian ini merekomendasikan agar pendekatan balok sederhana tetap digunakan sebagai dasar perhitungan awal dalam pembelajaran maupun perencanaan infrastruktur rel sebelum menggunakan metode analisis lanjutan.

Keywords: rel kereta api; balok sederhana; beban merata; momen lentur; tegangan lentu; pendidikan teknik sipil.

I. PENDAHULUAN

Struktur rel kereta api memainkan peran penting sebagai elemen utama dalam sistem perkeretaapian, menahan beban dinamis dari roda kereta dan menyalurkannya melalui bantalan ke balas dan balas tanah. Secara teknis, rel dapat dimodelkan sebagai balok sederhana pada tumpuan—sebuah model dasar dalam mekanika struktur (Wicaksono, 2012; Razaq, 2011). Model ini terbukti relevan untuk mendesain dan menganalisis perilaku rel di bawah beban, menjadi pendekatan awal sebelum analisis yang lebih kompleks (Aprilia, 2019; Soesilo, 2020). Lebih lanjut, teori "beam-on-elastic-foundation" atau balok pada tumpuan elastis yang diperkenalkan oleh Winkler dan dikembangkan lebih lanjut oleh para peneliti Indonesia digunakan secara luas dalam studi rel dan jembatan, termasuk pada pendekatan numerik dan metode elemen hingga (Fistcar et al., 2020; Wiliyanti, 2018). Misalnya, Viola (2024) melakukan analisis penyebab kegagalan rel menggunakan pendekatan Failure Tree Analysis (FTA) dan Life Cycle Cost (LCC) untuk memetakan biaya perbaikan rel patah. Penelitian Savero dan Syauqi (2023) serta Nugroho (2022) juga menunjukkan bahwa analisis struktur

jembatan kereta membutuhkan pemahaman awal tentang distribusi beban melalui pendekatan balok.

II. TINJAUAN PUSTAKA

Analisis dasar berupa momen lentur, gaya geser, dan tegangan normal sangat krusial dalam praktik perencanaan rel, karena secara langsung berhubungan dengan kapasitas struktural dan keselamatan operasional (Wiradarma, 2022; Pramesti, 2025). Meskipun penelitian terdahulu banyak menggunakan metode numerik dan model kompleks seperti PLAXIS atau SAP2000, analisis manual terhadap balok sederhana tetap berguna dan dapat diandalkan dalam tahapan awal studi struktur (Nugroho, 2022; Ahmad, 2017).

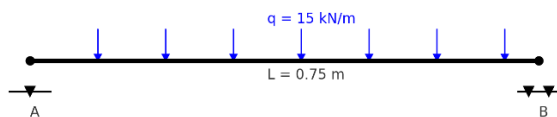
Urgensi penggunaan pendekatan ini dalam tugas mahasiswa teknik sipil sangat tinggi. Dengan menerapkan metode dasar ini, mahasiswa dapat memahami prinsip distribusi beban lokal di balok rel, serta batas aman material baja rel—tanpa memerlukan perangkat lunak analisis elemen hingga (Wiliyanti, 2018; Imran, 2019). Hal ini juga mendidik pemahaman konsep fundamental, sebelum melangkah ke model rel multi-lapis seperti slab track atau jembatan komposit (Abdurrahman et al., 2021; Dewi, 2020).

Novelty dari studi ini terletak pada penyederhanaan aplikasi balok sederhana untuk rel kereta api—secara langsung menghitung momen, geser, dan tegangan berdasarkan parameter global rel tanpa analisis dinamis. Metode ini praktis, mudah direplikasi dalam tugas kelas, serta memadukan teori mekanika struktur klasik dengan standar desain infrastruktur perkeretaapian. Hal ini berbeda dari studi matang yang menggunakan model elemen hingga atau pendekatan berbasis numerik.

Penelitian ini mengadopsi teori balok sederhana klasik—balok profil baja yang dihitung atas beban merata q dan bentang L —dengan asumsi distribusi beban melalui sleepers. Pendekatan ini bahkan masih dapat digunakan sebagai fondasi untuk model lanjutan seperti balok pada tumpuan elastis atau model interaksi tanah-struktur pada rel yang diperkuat (Hendrawan, 2018; Nalole, 2022).

III. METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan analitis berbasis teori balok sederhana untuk mengevaluasi gaya dalam dan tegangan yang timbul pada segmen rel kereta api akibat pembebanan merata dari roda kereta. Model yang digunakan berupa balok dua tumpuan yang merepresentasikan potongan rel di antara dua bantalan (sleeper), dengan beban merata yang diasumsikan berasal dari distribusi tekanan roda melalui balas dan bantalan. Konfigurasi beban dan tumpuan pada balok rel ditampilkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Balok rel kereta api sebagai balok sederhana dengan beban merata

Sebagaimana diperlihatkan dalam Gambar 1, balok dikenai beban merata q sepanjang bentang L , dengan tumpuan sederhana di kedua ujung (titik A dan B). Beban merata ini merupakan idealisasi beban roda kereta api yang disalurkan secara linier sepanjang rel. Tujuan dari analisis ini adalah untuk memperoleh nilai momen lentur maksimum, gaya geser maksimum, dan tegangan normal maksimum yang terjadi pada balok.

Parameter-parameter teknis yang digunakan dalam analisis ini ditunjukkan dalam Tabel 1, yang mencakup panjang bentang, nilai beban,

sifat material baja rel, dan karakteristik penampang. Nilai-nilai tersebut digunakan dalam formulasi analitis untuk menghitung besarnya gaya dalam dan tegangan pada balok rel.

Tabel 1. Parameter teknis studi kasus

Parameter	Simbol	Nilai	Satuan
Panjang bentang antar bantalan	L	0,75	m
Beban merata	q	15	kN/m
Modulus elastisitas baja	E	200	MPa
Momen inersia penampang rel	I	$3,5 \times 10^{-6}$	m^4
Jarak ke serat terluar	y	0,075	m

Untuk menghitung momen lentur maksimum pada balok sederhana akibat beban merata, digunakan Persamaan (1).

$$M_{maks} = \frac{qL^2}{8} \quad \dots 1$$

Sedangkan gaya geser maksimum yang terjadi di masing-masing tumpuan dihitung menggunakan Persamaan (2).

$$V_{maks} = \frac{qL}{2} \quad \dots 2$$

Setelah momen maksimum diketahui, tegangan lentur maksimum pada penampang rel dihitung menggunakan Persamaan (3).

$$\sigma = \frac{m.y}{I} \quad \dots 3$$

Ketiga persamaan ini merupakan rumus dasar dalam mekanika teknik yang digunakan untuk menganalisis perilaku lentur balok akibat beban transversal. Selanjutnya, nilai-nilai gaya dalam dan tegangan hasil perhitungan dari ketiga persamaan tersebut akan disajikan dan dibahas pada Bagian Hasil dan Pembahasan.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

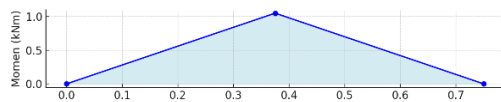
Hasil analisis struktur balok sederhana pada rel kereta api ditampilkan dalam bentuk nilai momen lentur maksimum, gaya geser maksimum, dan tegangan normal maksimum. Ketiga parameter ini dihitung berdasarkan persamaan yang telah dijelaskan pada Bagian Metode, menggunakan parameter teknis yang telah disajikan

sebelumnya. Nilai-nilai hasil perhitungan tersebut dirangkum dalam Tabel 2, yang menunjukkan bahwa momen lentur maksimum yang terjadi adalah 1,05 kNm, gaya geser maksimum sebesar 5,63 kN, dan tegangan normal maksimum mencapai 22,5 MPa.

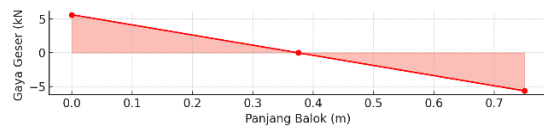
Tabel 2. Hasil perhitungan gaya dalam dan tegangan

Parameter	Simbol	Hasil	Satuan
Momen Lentur Maksimum	Mmax	1,05	kNm
Gaya Geser Maksimum	Vmax	5,63	kN
Tegangan Lentur Maksimum	σ_{max}	22,5	MPa

Visualisasi distribusi gaya dalam sepanjang bentang rel diperlihatkan melalui Gambar 2 dan Gambar 3. Gambar 2 menunjukkan diagram momen lentur (Bending Moment Diagram/BMD) yang berbentuk parabola dengan nilai maksimum berada di tengah bentang, mencerminkan karakteristik umum balok sederhana dengan beban merata. Sedangkan Gambar 3 menampilkan diagram gaya geser (Shear Force Diagram/SFD) yang berbentuk linear menurun dari nilai positif ke negatif, dengan gaya nol di tengah bentang, sebagaimana yang juga diharapkan dari model pembebanan ini.



Gambar 2. Diagram momen lentur (BMD)



Gambar 3. Diagram gaya geser (SFD)

Berdasarkan hasil tersebut, dapat dilihat bahwa nilai tegangan maksimum yang terjadi pada serat terluar penampang rel adalah sebesar 22,5 MPa. Jika dibandingkan dengan nilai tegangan izin baja struktural yang umumnya berada dalam kisaran 240 MPa, maka struktur rel dalam studi kasus ini berada dalam kondisi aman dengan faktor keamanan yang cukup besar. Hal ini menegaskan bahwa model balok sederhana masih sangat relevan untuk dijadikan dasar dalam mengevaluasi kekuatan lokal segmen rel akibat beban roda kereta.

Selain itu, pendekatan ini membuktikan bahwa metode perhitungan gaya dalam secara manual dapat memberikan hasil yang representatif, terutama dalam konteks pendidikan teknik sipil. Dengan demikian, mahasiswa dapat memahami secara langsung hubungan antara pembebanan, respon struktur, dan keamanan material hanya dengan pendekatan dasar yang efisien dan mudah diimplementasikan. Pendekatan ini juga dapat digunakan sebagai verifikasi awal sebelum dilakukan simulasi numerik atau pengujian eksperimental yang lebih kompleks.

V. KESIMPULAN

Penelitian ini telah membahas analisis struktur segmen rel kereta api dengan pendekatan balok sederhana yang menerima beban merata, sebagai representasi beban dari roda kereta yang didistribusikan melalui bantalan. Dengan menggunakan parameter teknis berupa panjang bentang 0,75 m, beban merata sebesar 15 kN/m, serta sifat material baja rel, diperoleh hasil berupa momen lentur maksimum sebesar 1,05 kNm, gaya geser maksimum sebesar 5,63 kN, dan tegangan lentur maksimum sebesar 22,5 MPa.

Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai tegangan yang terjadi masih jauh berada di bawah batas tegangan izin baja struktural yang umum digunakan pada rel kereta api, yaitu sekitar 240 MPa. Hal ini menandakan bahwa secara struktural, segmen rel dalam studi kasus ini berada dalam kondisi aman dan mampu menahan beban kereta api dengan baik dalam skala lokal.

Penerapan metode analitis berbasis teori balok sederhana terbukti efektif sebagai pendekatan awal yang aplikatif dan edukatif dalam pendidikan teknik sipil. Mahasiswa dapat memahami keterkaitan antara beban, gaya dalam, dan kapasitas material tanpa memerlukan perangkat lunak lanjutan. Selain itu, metode ini juga relevan sebagai tahapan awal untuk validasi manual sebelum menggunakan simulasi numerik atau metode elemen hingga. Oleh karena itu, model balok sederhana layak digunakan dalam analisis awal struktur rel dalam konteks tugas kelas dan kajian dasar teknik perkeretaapian.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdurrahman, H., Ferry, D., & Lucyana, L. (2021). Perencanaan struktur atas jembatan komposit (Studi kasus: Sub DAS Sungai Ogan, Desa Lubuk Batang Lama, Kecamatan Lubuk Batang, Kabupaten Ogan Komering Ulu). [Doctoral dissertation, Universitas Baturaja].
- Ahmad, N. F. R. (2017). Perencanaan struktur jalan layang Light Rail Transit (LRT) Jakarta STA 6+652–6+850 menggunakan prestressed box girder dengan metode balance cantilever [Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember].
- Aprilia, E. H. (2019). Analisa numerik tegangan dinamik pada rel kereta api akibat beban impact dengan kenaikan suhu [Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember].
- Dewi, P. (2020). Optimasi grafik perjalanan kereta api rute Surabaya–Yogyakarta dengan analisis cost benefit [Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember].
- Fistcar, W. A., Widyastuti, H., Iranata, D., & Prastyanto, C. A. (2020). Pengaruh parameter Track Quality Index (TQI) terhadap perilaku bantalan beton. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil ITS*, 18(1), 131–138.
- Hendrawan, A. (2018). Prasarana kereta api. *Uwais Inspirasi Indonesia*.
- Herman Soesilo, A. (2020). Perancangan dan analisis carbody lokomotif dengan metode elemen hingga [Doctoral dissertation, Universitas Muhammadiyah Ponorogo].
- Imran, F. (2019). Analisa kestabilan lereng dan metode penanganannya pada tanah lempung berpasir (Studi kasus: STA 208+00 Double Track Kereta Api Martapura–Baturaja).
- Nalole, T. I. M. (2022). Perancangan geometrik jalan rel rute Kota Gorontalo–Bandara Djalaludin Gorontalo (Geometric design of railway in Gorontalo City–Djalaludin Gorontalo Airport).
- Nugroho, M. A. (2022). Analisis struktur atas jembatan rangka baja tipe K-Truss, Pratt Truss, dan Warren Truss [Doctoral dissertation, Universitas Islam Indonesia].
- Pramesti, A. R. (2025). Analisis kapasitas sisa jembatan setelah masa layan (Studi kasus jembatan KA Pangukan) [Doctoral dissertation, Universitas Islam Indonesia].
- Razaq, A. (2011). Penurunan struktur rel kereta api di atas tanah lunak dengan perkuatan geosintetik.
- Savero, A. J., & Syaqui, A. Z. (2023). Perencanaan box girder prategang untuk jembatan kereta api [Doctoral dissertation, Universitas Islam Sultan Agung Semarang].
- Viola, N. A. P. (2024). Analisis penyebab rel patah dengan metode fault tree analysis (FTA) dan analisis biaya perbaikannya dengan metode life cycle cost (LCC).
- Wicaksono, A. W. (2012). Perilaku model tereduksi struktur rel kereta api dengan perkuatan geosintetik dan cerucuk kayu di bawah ballast dengan analisis Plaxis 3D Foundation v1.6.
- Wiliyanti, I. (2018). Pengaruh bahan isolasi getaran terhadap pola lendutan jembatan rel kereta api dalam tinjauan elemen hingga [Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember].
- Wiradarma, L. R. (2022). Analisis struktur atas jembatan kereta api Mbeling I BH. 2034 [Doctoral dissertation, Universitas Islam Indonesia].