

Evaluasi rel dan bantalan berdasarkan beban angkut lintas dan kinerja operasi kereta api (studi kasus: jalan rel Tanjung Karang-Rejosari)

Andry Yuliyanto^{1,*}, Galih Rio Prayogi¹, Michael¹, Frans Dermanto Hutabarat¹,
Muhammad Abi Berkah Nadi¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, Lampung, Indonesia

*Corresponding authors: andry.yuliyanto@si.ita.ac.id

Submitted: 16 February 2024, Revised: 14 June 2024, Accepted: 22 June 2024

ABSTRACT: In the railway sector, its development has received quite important attention from the government, especially with the establishment of railways as a national strategic plan. The railway network on the island of Sumatra stretches for 1,544 km, including those operating in Lampung Province which is overseen by Regional Division IV Tanjung Karang. Rail transportation in Lampung province is overseen by Regional Division IV Tanjung Karang. In 2022, train services at Tanjung Karang Station recorded services to 556,219 passengers, this data increased by 150.461% from the previous year. This research is important in order to understand how different cross loads affect the condition of rails and sleepers, train operators can plan more effective maintenance, identify vulnerable points, and reduce the risk of operational disruption. This research aims to determine the amount of cross haul loads annually and what is the condition of the ability of rail services and sleepers to accept the traffic loads on them and the impact on operational performance, especially on the realization of train trip scheduling. This research uses a descriptive quantitative method, namely evaluating the condition of the railroad based on secondary data obtained from related agencies. The results of this research show that the Tanjung Karang-Rejosari railroad is categorized as class I railroad, the condition of the installed rails is not in accordance with standards because the basic stress of the rail exceeds the basic stress permitted, so it is necessary to upgrade the rail from R.54 to R.60, to the current condition of the installed bearings is good to serve the annual traffic loads that occur. The operational realization of train travel schedules for both arrival and departure times has been well programmed based on the maximum planned delay time limit. In general, train delays in Regional Division IV Tanjung Karang generally originate from the infrastructure aspect with the percentage of causes of delays being 81.49%. This value illustrates that aspects of railroad infrastructure or structure are the biggest contributor to train delays.

KEYWORDS: concrete sleeper; operational performance; rails; traffic load; train.

ABSTRAK: Dalam bidang perkeretaapian, perkembangannya cukup mendapat perhatian penting dari pemerintah terutama dengan penetapan kereta api sebagai rencana strategis nasional. Jaringan kereta api di Pulau Sumatera terbentang sepanjang 1,544 km, termasuk yang beroperasi di Provinsi Lampung yang dinaungi oleh Divisi Regional IV Tanjung Karang. Transportasi kereta api di provinsi lampung dinaungi oleh Divisi Regional IV Tanjung Karang. Pada tahun 2022 tercatat pelayanan layanan kereta api tepatnya pada Stasiun Tanjung Karang mencatatkan pelayanan kepada 556,219 penumpang, data ini meningkat sebanyak 150.461 % dari tahun sebelumnya. Penelitian ini menjadi penting guna memahami bagaimana beban lintas yang berbeda mempengaruhi kondisi rel dan bantalan, operator kereta api dapat merencanakan pemeliharaan yang lebih efektif, mengidentifikasi titik-titik rentan, dan mengurangi risiko gangguan operasional. Penelitian ini bertujuan menentukan besar beban angkut lintas tahunan dan bagaimana kondisi kemampuan layanan rel dan bantalan menerima beban lintas diatasnya serta pengaruhnya terhadap kinerja operasional khususnya pada realisasi penjadwalan perjalanan kereta api. Penelitian ini menggunakan metode kuantitatif deskriptif yaitu melakukan evaluasi kondisi jalan rel berdasarkan data sekunder yang diperoleh dari instansi terkait. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa jalan rel Tanjung Karang-Rejosari dikategorikan kedalam kelas jalan rel I, kondisi rel terpasang tidak sesuai dengan standar karena tegangan dasar rel melebihi tegangan dasar yang diizinkan untuk itu perlu dilakukan peningkatan rel dari R.54 menjadi R.60, untuk kondisi bantalan terpasang saat ini sudah baik untuk melayani beban lintas tahunan yang terjadi. Realisasi operasional jadwal perjalanan kereta api baik pada waktu kedatangan dan waktu keberangkatan sudah terprogram dengan baik berdasarkan batas maksimal waktu keterlambatan yang direncanakan. Terlambatnya kereta api pada Divisi Regional IV Tanjung Karang secara garis besar umumnya berasal dari aspek prasarana dengan persentase penyebab waktu keterlambatan yaitu 81.49 %. Nilai ini menggambarkan bahwa aspek prasarana atau struktur jalan rel sebagai penyumbang terbesar dalam keterlambatan kereta api.

KATA KUNCI: bantalan; kinerja operasi; rel; beban lintas; kereta api.

© The Author(s) 2024. This article is distributed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International license.

1 PENDAHULUAN

Sistem transportasi kereta api merupakan sebuah sistem yang mengandalkan kereta api menjadi opsi utama dalam memindahkan penumpang dan barang dari satu lokasi ke lokasi lain dalam kerangka sistem transportasi, yang bergantung pada infrastruktur seperti rel, stasiun, dan jalur ganda sebagai prasarana utama, serta mematuhi berbagai persyaratan teknis, regulasi keselamatan, dan peraturan operasional yang ditetapkan untuk menjaga keamanan dan efisiensi operasionalnya (Menteri Perhubungan Republik Indonesia, 2019). Dalam bidang perkeretaapian di Indonesia perkembangannya cukup mendapat perhatian penting dari pemerintah, khususnya dengan penetapan kereta api sebagai rencana strategis nasional. Pengembangan sarana dan prasarana perkeretaapian di wilayah nasional dapat meningkatkan pertumbuhan perekonomian (Setiawan, 2022). Jaringan kereta api di Pulau Sumatera terbentang sepanjang 1.544 km, termasuk yang beroperasi di Provinsi Lampung yang dinaungi oleh Divisi Regional IV Tanjung Karang (Kementerian Perhubungan, 2018). Meskipun frekuensi perjalanan kereta api lebih rendah di Pulau Sumatera daripada di Pulau Jawa, volume lalu lintas yang tinggi dipertahankan oleh aktivitas operasional kereta api barang yang membawa muatan dalam jumlah besar (Wantana et al., 2020). Dengan kondisi jaringan kereta api Pulau Sumatera yang cukup panjang maka harus dipastikan keamanan dari perjalanan moda kereta api. Untuk memenuhi hal tersebut perlu tinjauan terhadap kondisi pemeliharaan geometrik jalan rel (Muhtarom & Ratih, 2021).

Transportasi kereta api di provinsi Lampung dinaungi oleh Divisi Regional IV Tanjung Karang. Pada tahun 2022 tercatat pelayanan transportasi kereta api tepatnya pada mencatatkan pelayanan kepada 556,219 penumpang (BPS, 2023), data ini meningkat sebanyak 150.461 % dari tahun sebelumnya. Pertumbuhan ini menggambarkan pergerakan masyarakat dan pertumbuhan ekonomi yang cukup tinggi dan tentunya akan memberikan pertumbuhan beban lintas yang meningkat. Peningkatan jumlah layanan ini akan memberikan pengaruh besar terhadap kemampuan layanan jalan rel dalam hal ini akan memerlukan kekuatan struktur akibat peningkatan layanan jalan rel tersebut. Tuntutan perkembangan teknologi dan permintaan akomodasi perkeretaapian yang semakin meningkat menjadikan pentingnya penyesuaian beban lintas terhadap rel (Wahab & Afriyani, 2017). Evaluasi yang cermat terhadap hubungan rel dan bantalan dalam sistem transportasi merupakan hal yang krusial untuk memahami kinerja serta keandalan infrastruktur tersebut. Dalam konteks transportasi, rel dan bantalan berperan sebagai elemen kunci yang memungkinkan pergerakan yang efisien dan aman bagi kendaraan serta penumpang (Jaya & Miswanto, 2018).

Operasional kereta api akan dihadapkan pada berbagai kendala yang dapat berdampak signifikan pada penerapan jadwal perjalanan yang kompleks dan ketepatan waktu. Menurut Laporan Pemantauan Pencapaian Kinerja pada Triwulan I Tahun 2022, yang diterbitkan oleh (Kementerian Perhubungan, 2022), disebutkan bahwa kejadian anjlok kereta api, kerusakan pada rel, fluktuasi temperatur kendaraan yang tidak terkendali, kendala pada lokomotif, dan waktu tunggu bongkar muat merupakan beberapa insiden yang dapat terjadi dan memengaruhi operasional kereta api. Semakin tinggi kelas jalan rel dan semakin sedikit ketersediaan sinyal, risiko anjlok dan kecelakaan meningkat. Sebaliknya, jalur dengan kepadatan tinggi memiliki risiko kecelakaan lebih kecil dibandingkan jalur dengan kepadatan rendah. Oleh karena itu, evaluasi sumber masalah perlu dilakukan untuk meminimalkan kecelakaan (Wang et al., 2020). Kegagalan jalur dan peralatan menjadi penyebab utama kecelakaan keluar jalur kereta api di jalur utama, sedangkan penggunaan wesel (percabangan rel) dan aturan wesel memiliki pengaruh besar terhadap frekuensi kecelakaan keluar jalur di jalur *siding* dan *yard* (Liu et al., 2012).

Peningkatan volume lalu lintas kereta api akan terus terjadi sejalan dengan pertumbuhan ekonomi dan industri, yang berpotensi memengaruhi keadaan geometri jalur dan menurunkan standar kualitas jalur kereta (Karunianingrum & Widyastuti, 2020). Divisi Regional IV Tanjung Karang sering mengalami berbagai kendala dalam menjalankan operasional kereta api khususnya terkait jalan rel itu sendiri seperti kerusakan rel, anjlok dan pemeliharaan diluar waktu rencana. Hambatan ini tentu berdampak terhadap terganggunya kinerja operasional kereta api. Dengan merinci isu-isu yang telah disebutkan di atas, peneliti menganggap penting untuk melakukan studi ini untuk memberikan pemahaman mendalam mengenai pengaruh berbagai faktor terhadap operasional sistem transportasi kereta api. Penelitian ini dilengkapi dengan analisis mendetail terkait kondisi rel terpasang di jalur Tanjung Karang-Rejosari yang tentunya belum banyak dibahas pada penelitian terdahulu. Informasi terkait tegangan dasar yang diizinkan akan menjadi tolak ukur apakah perlu dilakukan peningkatan spesifikasi rel yang digunakan atau tidak pada lokasi penelitian. Tentu penelitian ini berbeda dengan yang disampaikan (Muspitasari et al., 2017) di mana dalam penelitian tersebut analisis yang dilakukan lebih mengarah pada perbedaan beban serta jarak gandar lokomotif yang memberi pengaruh terhadap gaya dalam struktur rel. Selain itu, penelitian ini juga berfokus pada kondisi eksisting rel yang jalurnya aktif dilintasi kereta, berbeda dengan yang disampaikan (Yusuf et al., 2022) terkait evaluasi reaktivasi struktur rel sepanjang 47 kilometer dengan hasil bahwa kondisi tegangan dasar struktur rel masih memenuhi nilai tegangan izin. Lebih lanjut lagi, penelitian yang

dilakukan kali ini tidak meninjau sambungan pengelasan rel seperti yang dilakukan oleh (Ihlas, 2017) di mana beban angkutan batu bara yang masif membuat rel lambat laun mengalami lelah dan berpotensi patah apabila sambungan tidak dilakukan pengelasan dengan baik.

Penelitian evaluasi ini akan secara mendalam membahas aspek-aspek penting dalam hubungan antara kondisi rel dan bantalan, serta implikasinya terhadap kinerja operasional yang menjadi fokus utama dalam memastikan keberlanjutan dan keselamatan sistem transportasi. Penelitian ini memiliki tujuan dalam menentukan besar beban angkut lintas tahunan dan bagaimana kondisi kemampuan jalan rel dan bantalan dalam menanggung beban dari lalu lintas serta pengaruhnya terhadap kinerja operasional khususnya pada realisasi penjadwalan perjalanan kereta api. Penelitian ini menjadi penting untuk dilakukan yaitu dengan memahami bagaimana beban lintas yang berbeda mempengaruhi kondisi rel dan bantalan, operator kereta api dapat merencanakan pemeliharaan yang lebih efektif, mengidentifikasi titik-titik rentan, dan mengurangi risiko gangguan operasional. Dengan memahami secara mendalam bagaimana interaksi antara rel dan bantalan berpengaruh terhadap beban lintas, dapat ditemukan solusi-solusi inovatif untuk meningkatkan efisiensi operasional serta mengurangi risiko kegagalan infrastruktur, menjadikan sistem transportasi lebih handal dan berkelanjutan bagi masyarakat. Hasil penelitian ini juga dapat memberikan wawasan yang diperlukan untuk pengembangan infrastruktur kereta api di masa depan, memastikan bahwa jaringan rel dapat menangani beban lintas yang semakin besar dengan efisien dan aman. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya membantu

meningkatkan keselamatan, tetapi juga mengoptimalkan kinerja operasional dan mengurangi biaya pemeliharaan jangka panjang.

2 METODOLOGI

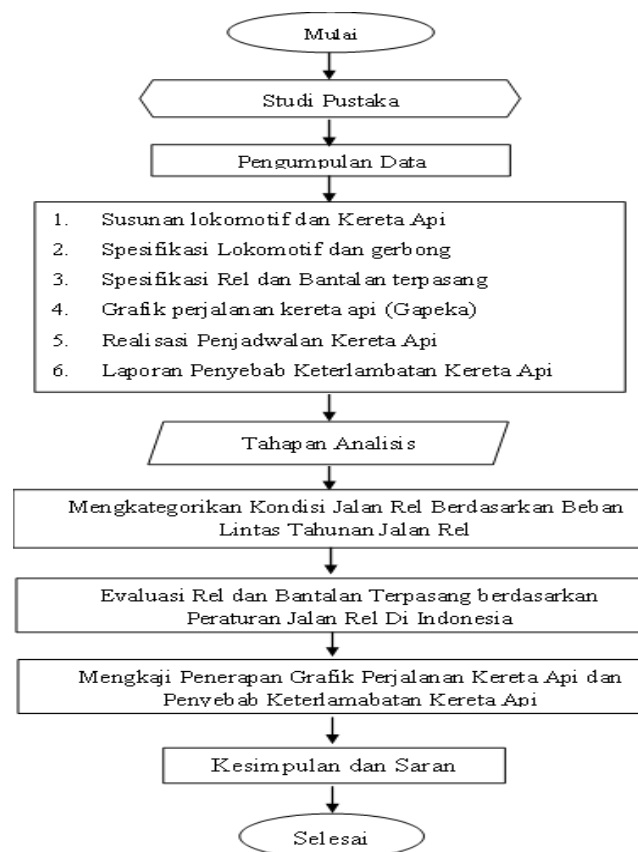
Penelitian ini berlokasi tepatnya pada daerah operasional Divisi Regional IV Tanjung Karang, tepatnya pada jalan rel lintas Stasiun Tanjung Karang - Rejosari. Penelitian dilaksanakan dengan memanfaatkan data tahun 2023. Penelitian ini mengadopsi metode deskriptif kuantitatif yaitu melakukan evaluasi kondisi rel dan bantalan dengan menggunakan data sekunder dari instansi terkait. Metode deskriptif kuantitatif digunakan dalam penelitian ini karena memungkinkan pengukuran yang akurat terhadap parameter-parameter tertentu seperti kondisi rel dan bantalan dan penerapan jadwal perjalanan kereta api sehingga memberikan data yang jelas dan terukur untuk analisis kondisi struktur dengan fenomena yang diamati.

Tahapan dalam penelitian ini yaitu pertama melakukan perhitungan beban angkut lintas mengacu pada data stamformasi rangkaian kereta sesuai dengan grafik perjalanan kereta api (GAPEKA) yang dikeluarkan oleh (PT. Kereta Api Indonesia, 2023) dan mengkategorikan kelas jalan rel melalui pedoman Peraturan Dinas No.10 Tahun 1986. Pengkategorian kelas jalan rel berdasarkan beban angkut lintas diperlukan untuk memastikan keamanan dan efisiensi operasional sistem perkeretaapian. Hal ini karena berat dan volume lalu lintas yang berbeda dapat mempengaruhi kebutuhan infrastruktur, pemeliharaan, dan pengaturan operasional. Berikut adalah kelas jalan rel dengan lebar jalan rel 1067 mm yang disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Kelas jalan rel dengan lebar jalan rel 1067 mm

No	Beban Angkut Lintas	V.maks	Beban Gandar Maksimum	Jenis Rel	Jenis Bantalan	Penambat
					Jarak Antara Bantalan	
I	$> 20 \times 10^6$ ton/tahun	120 km/jam	18 ton	R.60/R.54	Beton 60 cm	Penambat Elastis Ganda
II	$0-20 \times 10^6$ ton/tahun	110 km/jam	18 ton	R.54/R.50	Kayu/Beton 60	Penambat Elastis Ganda
III	$5-10 \times 10^6$ ton/tahun	100 km/jam	18 ton	R.54/R.50/R.42	Kayu/Baja/Beton 60	Penambat Elastis Ganda
IV	$2.5-5 \times 10^6$ ton/tahun	90 km/jam	18 ton	R.54/R.50/R.42	Baja/Beton/Kayu 60	Penambat Elastis Ganda / Tunggal
IV	$< 2.5 \times 10^6$ ton/tahun	80 km/jam	18 ton	R.42	Baja/ Kayu	Penambat Elastis Tunggal

Sumber: Kementerian Perhubungan, 2012



Gambar 1. Diagram alir

Tahapan berikutnya yaitu analisis terhadap kondisi rel dan bantalan mengacu pada Peraturan Dinas No.10 Tahun 1986. Analisis ini dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan infrastruktur rel dalam menopang beban lintas yang didistribusikan oleh kereta secara aman juga efisien. Dengan memahami dampak peningkatan beban lintas terhadap kondisi rel dan bantalan, operator dapat mengidentifikasi potensi kerusakan, keausan, atau kelelahan material yang dapat mengancam keamanan operasional dan memerlukan perbaikan atau pemeliharaan yang tepat waktu. Analisis ini juga membantu dalam menentukan langkah-langkah perawatan preventif yang diperlukan untuk memastikan keandalan dan kinerja sistem perkeretaapian yang optimal. tahap ketiga atau tahap terakhir yaitu mengkaji kinerja operasi kereta api yaitu pada penerapan realisasi jadwal perjalanan kereta api dan data faktor penyebab keterlambatan kereta api. Berikutnya dilakukan analisis pengaruh kondisi rel dan bantalan terhadap keterlambatan kereta api dengan mengacu pada Penerapan Standar dan Prosedur Keselamatan (SOP) (Djajasinga, 2015). Hasil dari analisis ini nantinya akan memberikan rekomendasi atau usulan sebagai upaya dalam meningkatkan layanan dan kinerja operasi kereta api. Evaluasi ini dilakukan sesuai dengan peraturan jalan rel di Indonesia karena untuk memastikan keamanan, kinerja, dan keandalan sistem transportasi kereta api. Dengan mengikuti peraturan tersebut, dapat dipastikan bahwa jalan rel memenuhi standar keselamatan dan

kualitas yang ditetapkan, sehingga dapat mencegah terjadinya kecelakaan atau gangguan operasional yang dapat membahayakan penumpang, kargo, dan lingkungan sekitar. Selain itu, evaluasi juga membantu dalam mengidentifikasi area-area yang memerlukan perbaikan atau pemeliharaan untuk meningkatkan efisiensi dan keandalan sistem kereta api secara keseluruhan. Gambar 1 menampilkan tahapan analisis yang dilakukan dalam penelitian ini.

3 HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Evaluasi Rel dan Bantalan

3.1.1 Mengkategorikan kelas jalan rel

Desain jalan rel sangat dipengaruhi oleh berbagai faktor, termasuk beban yang terjadi, kecepatan kereta, beban gandar, dan pola operasional yang digunakan atas dasar tersebut maka dilakukan pengklasifikasian jalan rel, sehingga nantinya perencanaan maupun pemeliharaan dapat terencana tepat guna (Aulia, 2019). Perhitungan beban lintas jalan rel ditinjau pada kereta api penumpang barang, tahapan ini dilakukan sesuai dengan pedoman peraturan jalan rel yang berlaku di Indonesia yaitu Peraturan Dinas No.10 Tahun 1986. Berdasarkan data kereta api yang melintas, diperoleh hasil beban lintas harian kereta api yaitu:

Kereta api penumpang: 2,786 ton

Kereta api barang: 166,592 ton

Selanjutnya perhitungan beban lintas tahunan dihitung dengan menggunakan rumus:

$$T = 360 \text{ hari} \times S \times TE$$

dengan:

$$TE = T_p + (K_b \times T_b) + (K_1 \times T_1)$$

$$TE = 2,786 \text{ ton} + (1.5 \times 166,592 \text{ ton}) + (1.4 \times 17,408 \text{ ton})$$

$$TE = 277,045 \text{ ton/hari}$$

diperoleh:

$$T = 360 \text{ hari} \times 1.1 \times 277,045 \text{ ton/hari}$$

$$T = 109,709,899 \text{ ton/Tahun}$$

Dari perhitungan di atas diperoleh bahwa beban lintas tahunan di Stasiun Tanjung Karang-Rejosari dengan nilai tonase tahunan yaitu 109,709,899 ton/Tahun dan digolongkan pada kategori kelas jalan rel I (Perusahaan Jawatan Kereta Api, 1986).

3.1.2 Evaluasi kondisi rel

1. Spesifikasi teknis

- a. V_{maks} = 120 km/jam
- b. V_{renc} = 150 km/jam
- c. Beban gandar = 18 ton
- d. Tipe rel = R.54
- e. I_x (momen inersia) = 2.346 cm⁴
- f. A (luas penampang) = 69.34 cm²
- g. Y_b = 76.2 mm
- h. K = 180 kg/cm²
- i. E = 210,000 MPa

2. Rel

a. Analisis beban dinamis

$$Pd = (P_s) [1 + 0.01(\frac{V_{rencana}}{1.609} - 5)]$$

$$\text{Dengan: } P_s = 0.5 P$$

$$= 9000 [1 + 0.01(88.225606)]$$

$$= 1,6940.304 \text{ kg}$$

$$Pd_{ijin} = \text{Kelas Jalan I}$$

$$= 19,940 \text{ kg (Perusahaan Jawatan Kereta Api, 1986)}$$

Sehingga, 16,940.304 kg < 19,940 kg (OK)

b. Dumping faktor

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}}$$

$$= \sqrt[4]{\frac{180 \text{ kg/cm}^2}{4 \times 210,000 \text{ kg/cm}^2 \times 2,346 \text{ cm}^4}}$$

$$= \sqrt[4]{\frac{180 \text{ cm}^{-4}}{1970640000}}$$

$$= 0.00977 \text{ cm}^{-1}$$

c. Momen maksimum dan defleksi maksimum

$$\begin{aligned} M_{maksimum} &= \frac{Pd}{4\lambda} \\ &= \frac{16940.304 \text{ kg}}{4 \times 0.0097 \text{ cm}^{-1}} \\ &= 433,206.455 \text{ kg.cm} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Y_{maksimum} &= \frac{Pd\lambda}{2k} \\ &= \frac{16,940.304 \text{ kg} \times 0.0097 \text{ cm}^{-1}}{2 \times 180 \text{ kg/cm}^2} \\ &= 0.0046 \text{ m} \end{aligned}$$

d. Momen akibat superposisi gandar

$$\begin{aligned} Ma &= 0.85 \times M_{maksimum} \\ &= 0.85 \times 433,206.455 \\ &= 368,225.4868 \text{ kg.cm} \end{aligned}$$

e. Analisa tegangan pada rel

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{Ma \times Y}{I} \\ &= \frac{368,225.4868 \times 7.62}{2346} \\ &= 1,196.026 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \sigma_{base} &= \frac{Ma}{Wb} \\ &= \frac{368,225.4868 \text{ kg.cm}}{297 \text{ cm}^3} \\ &= 1,239.8164 \text{ kg/cm}^2 \end{aligned}$$

$$\sigma_{izin} = 1,325 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{base} = 1,176.8 \text{ kg/cm}^2$$

Berdasarkan hasil analisis, selanjutnya dilakukan validasi tegangan yang diperoleh dengan tegangan izin berdasarkan (Perusahaan Jawatan Kereta Api, 1986) diperoleh tegangan pada rel mencapai nilai 1,196.026 kg/cm² nilai tegangan yang didapat telah sesuai tegangan izin rel berdasarkan kelas jalan rel I, yaitu 1,325 kg/cm². Namun, untuk tegangan dasar rel tidak sesuai dengan tegangan yang diizinkan pada dasar rel dikarenakan nilainya yaitu sebesar 1,239.8164 kg/cm² melebihi nilai tegangan izin pada dasar rel kelas jalan rel I yaitu 1,176.8 kg/cm². Berdasarkan hasil evaluasi yang telah diuraikan sebelumnya dan analisis data laporan penyebab keterlambatan, peneliti merekomendasikan peningkatan rel terpasang yaitu rel tipe R.54 menjadi rel tipe R.60.

3.1.3 Peningkatan rel

Kondisi rel yang tidak memenuhi standar akan memberikan banyak kerugian bagi proses pengoperasian dan kinerja operasional kereta api. Untuk itu sangat penting dilakukan peningkatan rel sebagai upaya meningkatkan keamanan serta menghindari segala kemungkinan kerugian yang terjadi akibat struktur jalan rel yang tidak memadai. Berikut adalah analisis penggunaan rel tipe R.60 pada jalan rel Stasiun Tanjung Karang-Rejosari.

1. Spesifikasi teknis R60

$$I_x \text{ (Momen Inersia)} : 3,055 \text{ cm}^4$$

$$Y_b : 8,095 \text{ cm}$$

$$W_b : 377.393 \text{ cm}^3$$

2. Analisis beban dinamis

$$\begin{aligned}
 P_d &= (P_s)[1 + 0.01(\frac{V_{rencana}}{1.609} - 5)] \\
 \text{Di mana, } P_s &= 0.5 \times P \\
 &= 9,000 \text{ kg} \\
 &= 9,000 [1 + 0.01(88.225606)] \\
 &= 16,940.304 \text{ kg} \\
 P_d \text{ izin} &= \text{Kelas Jalan I} \\
 &= 19,940 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

$$P_d < P_d \text{ izin}$$

Sehingga beban dinamis yang terjadi yaitu $16,940.304 < 19,940$ (OK)

3. Dumping faktor

$$\begin{aligned}
 \lambda &= \sqrt[4]{\frac{k}{4EI}} \\
 &= \sqrt[4]{\frac{180 \text{ kg/cm}^2}{4 \times 210,000 \text{ kg/cm}^2 \times 3055 \text{ cm}^4}} \\
 &= \sqrt[4]{\frac{180 \text{ cm}^{-4}}{1,970,640,000}} \\
 &= 0.0091 \text{ cm}^{-1}
 \end{aligned}$$

4. Defleksi dan momen maksimum

$$\begin{aligned}
 M_{\text{maksimum}} &= \frac{P_d}{4\lambda} \\
 &= \frac{16,940.304 \text{ kg}}{4 \times 0.0091 \text{ cm}^{-1}} \\
 &= 462,770.55 \text{ kg.cm} \\
 Y_{\text{maksimum}} &= \frac{P_d \lambda}{2k} \\
 &= \frac{16,940.304 \text{ kg} \times 0.0091 \text{ cm}^{-1}}{2,180 \text{ kg/cm}^2} \\
 &= 0.43 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

5. Momen (kondisi superposisi gandar)

$$\begin{aligned}
 M_a &= 0.85 \times M_{\text{maksimum}} \\
 &= 0.85 \times 462,770.55 \text{ kg.cm} \\
 &= 393,354.9740 \text{ kg.cm}
 \end{aligned}$$

6. Analisa tegangan pada rel

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \frac{M_a \times Y}{I} \\
 &= \frac{393,354.974 \text{ kg.cm} \times 8.095 \text{ cm}}{3055 \text{ cm}^4} \\
 &= 1,042.2941 \text{ kg/cm}^2 \\
 \sigma_{\text{dasar}} &= \frac{M_a}{W_b} \\
 &= \frac{393,354.9740 \text{ kg.cm}}{377.393 \text{ cm}^3} \\
 &= 1,042.2940 \text{ kg/cm}^2
 \end{aligned}$$

Berdasarkan Peraturan Dinas No.10 tahun 1986 tegangan ijin R.60 kelas jalan Rel I yaitu (Perusahaan Jawatan Kereta Api, 1986):

$$\sigma_{\text{ijin}} = 1,325 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_{\text{dasar}} = 1,042.3 \text{ kg/cm}^2$$

Dari hasil analisis ini menunjukkan bahwa peningkatan rel menjadi R.60 telah memenuhi standar.

3.1.4 Evaluasi bantalan terpasang

Evaluasi kondisi bantalan dilakukan sebagai upaya mengetahui tingkat layanan bantalan terpasang berdasarkan standarisasi peraturan jalan rel di Indonesia yaitu Peraturan Dinas No.10 Tahun 1986 dalam menerima peningkatan beban lintas tahunan. Berikut adalah analisis kondisi bantalan terpasang yaitu bantalan tipe N-67 produksi wika beton dengan Gambar 2 menunjukkan momen yang terjadi pada bantalan.

1. Pembebanan

$$\begin{aligned}
 Q &= 0.6 \times P_d \\
 &= 0.6 \times 16,940.3 \text{ kg} \\
 &= 10,164.180 \text{ kg} \\
 E &= 6,400\sqrt{F_c'} \\
 &= 6,400 \sqrt{600} \text{ kg/cm}^2 \\
 &= 160,192.6551 \text{ kg/cm}^2
 \end{aligned}$$

2. Dumping faktor

Bagian bantalan bawah rel

$$\begin{aligned}
 \lambda_{r1} &= \sqrt[4]{\frac{K}{4 \times E \times I}} \\
 &= \sqrt[4]{\frac{180 \text{ kg/cm}^2}{4 \times 160,192.655 \text{ kg/cm}^2 \times 15,139.09 \text{ cm}^4}} \\
 &= 0.011671 \text{ cm}^{-1}
 \end{aligned}$$

Bagian tengah bantalan

$$\begin{aligned}
 \lambda_{r2} &= \sqrt[4]{\frac{K}{4 \times E \times I}} \\
 &= \sqrt[4]{\frac{180 \text{ kg/cm}^2}{4 \times 160,192.655 \text{ kg/cm}^2 \times 10,190.02 \text{ cm}^4}} \\
 &= 0.012885 \text{ cm}^{-1}
 \end{aligned}$$

3. Momen

Momen desain:

$$\begin{aligned}
 \text{Pada bawah rel} &: - 750 \text{ kg. m} \\
 &: + 1,500 \text{ kg. m} \\
 \text{Pada tengah bantalan} &: - 930 \text{ kg. m} \\
 &: + 660 \text{ kg. m}
 \end{aligned}$$

Bagian bawah pada rel

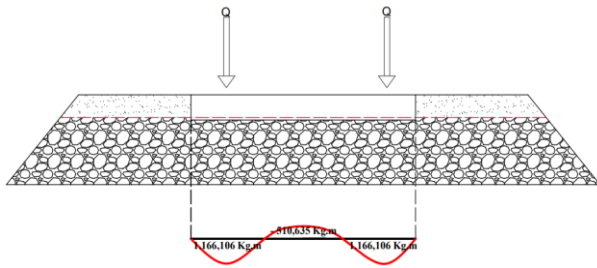
$$\begin{aligned}
 M &= \frac{Q}{4\lambda} \times \frac{1}{\sin\lambda L + \sinh\lambda L} [2\cosh^2\lambda a (\cosh\lambda L + \cos2\lambda c) - 2\cos^2\lambda a (\cos\lambda L + \cosh2\lambda c) - \sinh^2\lambda a (\sin\lambda L + \sin2\lambda c) - \sin^2\lambda a (\sinh\lambda L + \sinh2\lambda c)] \\
 &= \frac{10,164.182}{4 \times 0.011} \times \frac{1}{0.675 + 5.466} [2.69 \times (5.557 + 0.248) - 1.43 \times (1.738 + 2.005) - 1.303 \times (5.466 + 0.969) - 0.882 \times (5.446 + 1.738)] \\
 &= 1,166.106 \text{ kg.m [OK]}
 \end{aligned}$$

Bagian tengah pada bantalan

$$M = - \frac{Q}{2\lambda} \times \frac{1}{\sin\lambda L + \sinh\lambda L} [\sinh\lambda c (\sin\lambda (L-c) + \sin\lambda c + \sinh\lambda c (\sinh\lambda (L-c) + \sinh\lambda c) + \sinh\lambda c)$$

$$\begin{aligned}
 & \cos \lambda (L-c) \cdot \cosh \lambda c - \cosh \lambda (L-c) \cdot \cos \lambda c \\
 (12) \\
 & = -\frac{10,164.182}{2 \times 0.012} \times \frac{1}{6.695+0.516} [0.777 (0.951+0.656) \\
 & + 0.656 (3.217+0.777) + (-0.309) \times 1.267 \\
 & - 3.369 \times (-0.755)] \\
 & = -510.635 \text{ kg.m}
 \end{aligned}$$

Gambar 2 menunjukkan diagram momen pada bantalan.



Gambar 2. Diagram momen pada bantalan

4. Analisis tegangan

Perhitungan untuk mengetahui besar tegangan dilakukan pada 2 kondisi yaitu pratekan awal dan efektif.

$$\begin{aligned}
 P_{\text{initial}} &= f_i \times A_s = 10,122 \text{ kg/cm}^2 \times 5.0868 \text{ cm}^2 \\
 &= 51,480.4920 \text{ kg} \\
 P_{\text{efektif}} &= 55\% \cdot F_{pu} \cdot A_s \\
 &= 55\% \times 14,460 \text{ kg/cm}^2 \times 5.0868 \text{ cm}^2 \\
 &= 40,488.9581 \text{ kg} \\
 \sigma_{\text{ijin}} &= 0.4 \times F_c' = 0.4 \times 5,200,000 \text{ kg/cm}^2 \\
 &= 2,080,000 \text{ kg/cm}^2
 \end{aligned}$$

Pratekan awal

Pada tahap pratekan awal rumus yang digunakan yaitu:

$$\sigma = \frac{P_{\text{Initial}}}{A_1} - \frac{P_{\text{Initial}} \times e}{W_1}$$

a. Bagian bawah pada rel

i. Bantalan sisi atas

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \frac{51,480.4920 \text{ kg}}{430 \text{ cm}^2} - \frac{51,480.4920 \text{ kg} \times 0.135}{1,460.60 \text{ cm}^2} \\
 &= 114.963 \text{ kg/cm}^2 \text{ [OK]}
 \end{aligned}$$

ii. Bantalan sisi bawah

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \frac{51,480.4920 \text{ kg}}{430 \text{ cm}^2} - \frac{51,480.4920 \text{ kg} \times 0.135}{1,571.26 \text{ cm}^2} \\
 &= 115.298 \text{ kg/cm}^2 \text{ [OK]}
 \end{aligned}$$

b. Bagian tengah pada bantalan

i. Sisi atas bantalan

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \frac{51,480.4920 \text{ kg}}{351.5 \text{ cm}^2} - \frac{51,480.4920 \text{ kg} \times 1.055}{1,125.35 \text{ cm}^2} \\
 &= 98.197 \text{ kg/cm}^2 \text{ [OK]}
 \end{aligned}$$

ii. Sisi bawah bantalan

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \frac{51,480.4920 \text{ kg}}{351.5 \text{ cm}^2} - \frac{51,480.4920 \text{ kg} \times 1.055}{1,125.35 \text{ cm}^2} \\
 &= 103.376 \text{ kg/cm}^2 \text{ [OK]}
 \end{aligned}$$

Pratekan efektif

Pada tahap pratekan efektif rumus yang digunakan yaitu:

$$\sigma = \frac{P_{\text{Efektif}}}{A_1} - \frac{P_{\text{Efektif}} \cdot e}{W_1} + \frac{M}{W_1}$$

a. Bagian bawah rel

i. Sisi atas bantalan

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \frac{40,448.9581 \text{ kg}}{430 \text{ cm}^2} - \frac{40,448.95 \times 0.135}{1,460.60 \text{ cm}^2} + \frac{116,610.609}{1,460.60} \\
 &= 170.166 \text{ kg/cm}^2 \text{ [OK]}
 \end{aligned}$$

ii. Sisi bawah bantalan

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \frac{40,448.9581 \text{ kg}}{430 \text{ cm}^2} - \frac{40,448.95 \times 0.135}{1,571.26 \text{ cm}^2} + \frac{116,610.609}{1,571.26} \\
 &= 23.327 \text{ kg/cm}^2 \text{ [OK]}
 \end{aligned}$$

b. Bagian tengah bantalan

i. Sisi atas bantalan

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \frac{40,448.9581 \text{ kg}}{351.5 \text{ cm}^2} - \frac{40,448.95 \times 1.055}{1,125.35 \text{ cm}^2} + \frac{51,063.599}{1,125.35} \\
 &= 107.619 \text{ kg/cm}^2 \text{ [OK]}
 \end{aligned}$$

ii. Sisi bawah bantalan

$$\begin{aligned}
 \sigma &= \frac{40,448.9581 \text{ kg}}{351.5 \text{ cm}^2} - \frac{40,448.95 \times 1.055}{1,260.63 \text{ cm}^2} + \frac{51,063.599}{1,260.63} \\
 &= 121.730 \text{ kg/cm}^2 \text{ [OK]}
 \end{aligned}$$

5. Regangan

Untuk menghitung regangan yang terjadi pada bantalan digunakan persamaan yaitu:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E}$$

Bagian bawah rel

a. Sisi atas bantalan

$$\epsilon = \frac{170.1661 \text{ kg/cm}^2}{160,192.655 \text{ kg/cm}^2} = 0.106$$

b. Sisi bawah bantalan

$$\epsilon = \frac{23.3270 \text{ kg/cm}^2}{160,192.655 \text{ kg/cm}^2} = 0.0145$$

Bagian tengah bantalan

a. Sisi atas bantalan

$$\epsilon = \frac{107.6191 \text{ kg/cm}^2}{160,192.6552 \text{ kg/cm}^2} = 0.067$$

b. Sisi bawah bantalan

$$\epsilon = \frac{121.73 \text{ kg/cm}^2}{160,192.655 \text{ kg/cm}^2} = 0.075$$

6. Analisis lendutan

$$\text{Panjang } (l_o) \text{ bawah rel} = 0.7520 \text{ mm}$$

$$\text{Panjang } (l_o) \text{ tengah bantalan} = 0.4960 \text{ mm}$$

Untuk menghitung lendutan yang terjadi pada bantalan digunakan persamaan yaitu:

$$\Delta l = \epsilon \times L_0$$

Bagian bawah rel

a. Sisi atas

$$\Delta l = 0.106 \times 0.752 = 0.0798 \text{ m}$$

b. Sisi bawah

$$\Delta l = 0.0145 \times 0.752 = 0.0109 \text{ m}$$

Bagian tengah bantalan

a. Sisi atas

$$\Delta l = 0.496 \times 0.0671 = 0.0332 \text{ m}$$

b. Sisi bawah

$$\Delta l = 0.496 \times 0.0759 = 0.0376 \text{ m}$$

3.2 Kajian Kinerja Operasi Kereta Api

3.2.1 Realisasi jadwal perjalanan kereta api

Analisis tentang implementasi waktu perjalanan kereta api dilakukan dengan mempertimbangkan waktu keberangkatan dan kedatangan kereta api dituliskan pada Tabel 2 dan Tabel 3.

Tabel 2. Realisasi waktu keberangkatan

Nama KA	Frek	Tepat (X)	Tepat (%)
S1	-	0	0
S2	-	0	0
S5	31	31	100
S6	31	31	100
S7	31	31	100
S8	31	31	100
S9	30	30	100
S10	31	31	100
S11	30	30	100
S12	31	31	100

Sumber: PT. Kereta Api Indonesia, (2023)

Tabel 3. Realisasi waktu kedatangan

Nama KA	Frek	Tepat (X)	Tepat (%)
S1	0	0	
S2	0	0	
S5	31	29	93.55
S6	31	28	90.32
S7	31	27	87.1
S8	31	29	93.55
S9	30	30	100
S10	31	31	100
S11	30	29	96.67
S12	31	31	100

Sumber: PT. Kereta Api Indonesia, (2023)

Salah satu faktor penentu kepuasan pengguna jasa kereta api terhadap kinerja operasi kereta api adalah faktor ketepatan waktu pada jadwal kedatangan dan keberangkatan kereta api (Lathif, 2017). Dari informasi

yang terdokumentasi pada tabel, dapat ditarik kesimpulan bahwa pelaksanaan jadwal keberangkatan perjalanan kereta penumpang menunjukkan kinerja kategori sangat baik. Hal ini dapat diamati dari realisasi bahwa semua kereta api melaksanakan keberangkatan kereta api tidak melebihi waktu yang direncanakan yang tercantum dalam GAPEKA, dengan tingkat ketepatan yang mencapai 100% untuk seluruh kereta api penumpang. Di sisi lain, realisasi jadwal kedatangan kereta api terealisasi dengan baik. Penilaian dilandaskan pada observasi bahwa waktu kedatangan kereta api cenderung lebih cepat daripada jadwal yang tercantum dalam GAPEKA. Tingkat ketepatan perjalanan terendah, yaitu 87.10%, tercatat pada kereta api S7. Ketetapan jadwal perjalanan kereta api penting bagi pengelola karena memungkinkan efisiensi operasional dan pengaturan sumber daya, sementara bagi pengguna, ketetapan jadwal memberikan kepastian waktu dan kemudahan perencanaan perjalanan.

3.2.2 Faktor-faktor penyebab keterlambatan

Menurut (Wibowo et al., 2015a) untuk meningkatkan kinerja operasi kereta api maka kecepatan operasi kereta harus sesuai dengan profil panduan perjalanan masinis. Apabila kecepatan operasi tidak sesuai dengan yang disyaratkan maka akan terjadi keterlambatan. Disampaikan dalam (Hastuti et al., 2020) bahwa beberapa faktor seperti roda yang tergelincir, pengaruh hujan deras, keterbatasan pandangan, penundaan karena proses naik-turun penumpang, dan penundaan sinyal masuk, serta hal-hal lainnya, dapat mengakibatkan ketidaksesuaian jadwal keberangkatan perjalanan kereta api. Berdasarkan data dari laporan penyebab keterlambatan kereta menunjukkan bahwa penyebab tersebut dapat dikategorikan menjadi beberapa aspek sesuai dengan Penerapan Standar dan Prosedur Keselamatan (SOP) (Djajasinga, 2015), sebagian besar penyebab keterlambatan yang berasal dari prasarana terjadi akibat pertumbuhan layanan penumpang kereta api setiap tahunnya dan dipicu tegangan yang terjadi pada dasar rel yang melewati batas standar yang diizinkan. Keadaan rel yang kurang optimal memerlukan perawatan berkala yang lebih intensif, yang tentu saja akan menimbulkan biaya yang lebih tinggi. Selain itu, kondisi ini juga dapat mengganggu kenyamanan dan keamanan perjalanan kereta api. Hal ini tercermin melalui tinjauan terhadap 3 aspek utama, di mana aspek terbesar penyumbang keterlambatan kereta api adalah aspek prasarana, mencapai 81.49%. Indikasi ini menunjukkan bahwa aspek prasarana menjadi faktor utama yang menyebabkan terhambatnya pengoperasian kereta api. Kondisi gradien pada jalur eksisting kereta api juga dapat memengaruhi tidak tercapainya kecepatan operasi sesuai yang telah diskemakan sehingga terjadi keterlambatan (Wibowo et al., 2015b). Berikut adalah Tabel 4 yang berisi aspek-aspek penyebab keterlambatan pada kereta api.

Tabel 4. Aspek-aspek penyebab keterlambatan kereta api

No.	Aspek	Kereta Tertahan (Jam)	Frek	Waktu Terhambat (Jam)	Kereta Api Terganggu	Keterlambatan (%)
1	Prasarana	577.48	62	104.18	257	81.49
2	Operasional	34.96	22	28.75	25	4.93
3	Sarana	96.18	73	48.17	86	13.57
	Total	708.63	157	181.10	368	100

3.3 Kajian Kondisi Rel dan Bantalan Terpasang Terhadap Kinerja Operasi

Salah satu elemen kritis dalam infrastruktur jalan rel adalah rel itu sendiri. Rel berperan sebagai permukaan tempat roda kereta bergerak, sehingga merupakan titik kontak langsung. Karena itu, rel rentan mengalami kerusakan seperti deformasi, keausan, retak, bahkan patah (Adi, 2019). Kondisi tegangan dasar rel yang melebihi batas tegangan izin akan menimbulkan berbagai kerugian, hal ini berbanding lurus dengan beberapa penyebab keterlambatan pengoperasian kereta api, dimana beberapa gangguan terjadi pada rel yaitu seperti rel patah dan retak. Upaya dalam mengatasi kondisi yang terjadi, usulan atau langkah yang bisa diambil adalah melakukan peningkatan rel R.54 yang saat ini terpasang menjadi rel R.60. Peningkatan rel akan memberikan beberapa keuntungan yang dapat dicapai antara lain mencakup:

1. Peningkatan rel ini akan memberikan peningkatan layanan struktur jalan rel untuk menerima beban yang lebih besar dan mampu melayani pertumbuhan layanan kereta api baik barang maupun penumpang (Rosyidi, 2015).
2. Sebagai struktur pengikat, rel juga memiliki peran penting dalam membentuk konstruksi jalan rel yang solid (Fistcar et al., 2020). Peningkatan rel ini akan memberikan kekuatan struktural yang lebih optimal dan meningkatkan keamanan perjalanan kereta api.
3. Meminimalkan pengeluaran dari pemeliharaan di luar rencana yang terjadi saat rel belum diganti, di mana sering kali dilakukan pemeliharaan jalan rel di luar jadwal yang telah ditetapkan

4 KESIMPULAN

Berdasarkan pedoman (Kementerian Perhubungan, 2012) nilai beban lintas tahunan diperoleh yaitu 109,709,899 ton/Tahun, nilai ini menunjukkan bahwa kondisi jalan rel Stasiun Tanjung Karang - Rejosari dikategorikan dalam kelas jalan rel I.

Berdasarkan evaluasi kondisi rel yang terpasang, tegangan pada rel telah memenuhi tegangan yang

diizinkan, namun tegangan pada dasar rel tidak sesuai dengan izin, sehingga diperlukan peningkatan dari rel tipe R.54 menjadi R.60. Analisis terhadap bantalan menunjukkan nilai momen pada tengah bantalan sebesar 510.635 kg.cm dan bagian bawah rel 1,166 kg.cm, keduanya masuk kategori baik. Tegangan pratekan awal pada sisi atas bawah rel adalah 1,149,630 kg/m² dan sisi bawah 1,241,450 kg/m², sementara di tengah bantalan, sisi atas mencapai 1,947,210 kg/m² dan sisi bawah 1,033,760 kg/m², semua dalam kategori baik. Tegangan pratekan efektif di bawah rel menunjukkan nilai 1,701,660 kg/m² pada sisi atas dan 233,270 kg/m² pada sisi bawah. Di tengah bantalan, nilai tegangan sisi atas adalah 1,076,190 kg/m² dan sisi bawah 1,217,300 kg/m², semuanya dalam kategori baik. Regangan di bawah rel menunjukkan nilai 0.106 m di sisi atas dan 0.0145 m di sisi bawah, sedangkan di tengah bantalan 0,0671 m di sisi atas dan 0.0759 m di sisi bawah. Lendutan di bawah rel menunjukkan nilai 0.798 m di sisi atas dan 0.109 m di sisi bawah, sementara di tengah bantalan nilai lendutan adalah 0.333 m di sisi atas dan 0.376 m di sisi bawah. Evaluasi kinerja operasional menunjukkan tingkat ketepatan waktu keberangkatan kereta api mencapai 100%. Namun, aspek prasarana atau struktur jalan rel menjadi penyebab terbesar keterlambatan, yang disebabkan oleh pertumbuhan layanan penumpang kereta api yang meningkat setiap tahunnya, sehingga berdampak pada penurunan kualitas layanan prasarana jalan rel.

Dari penelitian ini diperoleh bahwa tegangan dasar rel tidak memenuhi nilai yang diizinkan sehingga perlu dilakukan peningkatan spesifikasi rel yang digunakan. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan variasi beban dan jarak gandar yang berbeda untuk meninjau gaya dalam yang terjadi pada struktur atas rel. Pertimbangan sistem perawatan secara prediktif dapat memberi informasi keandalan bantalan rel, meski demikian pemeliharaan seperti ini masih sangat terbatas dilakukan (Jing et al., 2021).

DAFTAR PUSTAKA

- Adi, W. T. (2019). *Kajian Umur Jalan Rel Berdasarkan Keausan Dengan Metode Dari Area dan Perjana*. III (November).

- Aulia, A. Z. (2019). *Perancangan Aspek Teknis Dan Operasional Jalur Rel Sebagai Penunjang Proyek Revitalisasi Jembatan Perlintasan Kereta Api Koridor Kayu Tanam – Padang Panjang – Batu Tabal*.
- BPS. (2023). *Lalu Lintas Penumpang Melalui Stasiun Kereta Api Tanjung Karang*. Retrieved from Provinsi Lampung Dalam Angka 2023.
- Djajasinga, N. D. (2015). *Keselematan Perkeretaapian*.
- Fistcar, W. A., Widyastuti, H., & Prastyanto, C. A. (2020). Pengaruh Parameter Track Quality Indeks (Tqi) Terhadap Perilaku Bantalan Beton (Studi kasus: Track Quality Indeks (TQI) penyimpangan geometri 25 mm-40 mm). *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 18(1), 131–138.
- Hastuti, U. J., Hidayat, M., & Firdaus, M. I. (2020). *Ketepatan Waktu dan Okupansi Terhadap Kinerja Kereta Api Joglosemarkerto Punctuality and Load Factor of Joglosemarkerto Rail Transport's Performance*.
- Ihlas, A. (2017). Analisis kerusakan rel kereta api angkutan batubara. *Jurnal Teknologi Bahan Dan Barang Teknik*, 7(1), 7–16.
- Jaya, F. H., & Miswanto. (2018). Evaluasi Struktur Atas Komponen Jalan Rel Berdasarkan Passing Tonnage (Studi Kasus : Jalan Rel Lintas Tanjung Karang – Bekri). *Tapak Vol. 8 No. 1*, 8(1), 33–45.
- Jing, G., Siahkouhi, M., Edwards, J. R., Dersch, M. S., & Hoult, N. A. (2021). Smart railway sleepers-a review of recent developments, challenges, and future prospects. *Construction and Building Materials*, 271, 121533.
- Karunianingrum, D. I., & Widyastuti, H. (2020). Penilaian Indeks Kualitas Jalan Rel (Track Quality Index) berdasarkan Standar Perkeretaapian Indonesia (Studi Kasus : Cirebon-Cikampek). *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 18(1), 81. <https://doi.org/10.12962/j2579-891x.v18i1.5710>
- Kementerian Perhubungan. (2022). *Laporan Monitoring Capaian Kinerja Triwulan I Tahun 2022*. Kementerian Perhubungan Direktorat Jenderal Perkeretaapian
- Kementerian Perhubungan (2018). *Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor KP 2128 Tahun 2018 Tentang Rencana Induk Perkeretaapian Nasional*. Kementerian Perhubungan Direktorat Jenderal Perkeretaapian Nasional Republik Indonesia, 1–8.
- Kementerian Perhubungan. (2012). *Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api*. Kementrian Perhubungan Republik Indonesia, 1–57. https://peraturan.bpk.go.id/Download/138947/pm_no_60_tahun_2012.pdf
- Kementerian Perhubungan. (2019). *Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor Pm 18 Tahun 2019*. Menteri Perhubungan Republik Indonesia, 0–23.
- Lathif, M. R. (2017). *Analisa Kinerja Operasional Kereta Api Penataran Jurusan Surabaya Gubeng – Malang – Blitar*.
- Liu, X., Saat, M. R., & Barkan, C. P. L. (2012). Analysis of Causes of Major Train Derailment and Their Effect on Accident Rates. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2289(1), 154–163. <https://doi.org/10.3141/2289-20>
- Muhtarom, Z., & Ratih, S. Y. (2021). Analisis Kondisi Jalan Rel Kereta Api Pada Lintas Sragen-Solo Berdasarkan Nilai Track Quality Indeks (TQI). *Jurnal Teknik Sipil*, 17(1), 01–13. <https://doi.org/10.28932/jts.v17i1.3440>
- Muspitasari, T., Sulistyowati, I., & Kumara, W. (2017). Evaluasi peraturan pembebanan gandar kereta api di pulau Jawa terhadap kondisi aktual. *Jurnal Teknik Sipil*, 14(3), 182–187.
- Perusahaan Jawatan Kereta Api. (1986). Peraturan Dinas No. 10 Tahun 1986 Tentang Perencanaan Kontruksi Jalan Rel. *Perusahaan Jawatan Kereta Api*.
- PT. Kereta Api Indonesia. (2023). *Grafik Perjalanan Kereta Api*.
- Rosyidi, S. A. (2015). *Rekayasa Jalan Kereta Api Tinjauan Struktur Jalan Rel*. 53–54.
- Setiawan, Y. (2022). Evaluasi Kondisi Jalan Rel Lintas Kroya-Kutoarjo Jawa Tengah berdasarkan Track Quality Index (TQI). *ISMETEK*, 14(1).
- Wahab, W., & Afriyani, S. (2017). Analisis kelayakan konstruksi bagian atas jalan rel dalam kegiatan revitalisasi jalur kereta api lubuk alung-kayu tanam (km 39,699-km 60,038). *Jurnal Teknik Sipil Institut Teknologi Padang*, 4(2), 1–8.
- Wang, B. Z., Barkan, C. P. L., & Rapik Saat, M. (2020). Quantitative Analysis of Changes in Freight Train Derailment Causes and Rates. *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems*, 146(11). <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000453>
- Wantana, A. H., Widyastuti, H., & Prastyanto, C. A. (2020). Prediksi Nilai Track Quality Index (TQI) Berdasarkan Data Frekuensi dan Beban Lalu Lintas untuk Lebar Sepur 1067 Arisma. *Jurnal Penelitian Transportasi Darat*, 20(1), 17–32.
- Wibowo, A., Wicaksono, A., & Djakfar, L. (2015a). Evaluasi kinerja waktu tempuh kereta api segmen bojonegoro-kandangan. *Rekayasa Sipil*, 9(1), 74–80.
- Wibowo, A., Wicaksono, A., & Djakfar, L. (2015b). Kinerja Waktu Tempuh Kereta Api Segmen Bojonegoro-Kandangan. *Jurnal Transportasi*, 15(3).
- Yusuf, M. A., Roestaman, R., & Walujodjati, E. (2022). Evaluasi Struktur Atas Komponen Jalan Rel dalam Kegiatan Reaktivasi Jalur Cibatut Cikajang. *Jurnal Konstruksi*, 20(1), 30–40. <https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.20-1.926>