

Pemodelan Nilai TQI Berbasis Ketebalan Ballast dan Parameter Geometri pada Jalur Rel 1435 mm

Mochammad Choirusydhia Pratama, Nugroho Utomo*, Achmad Dzulfiqar Alfiansyah

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur

ARTICLE INFO

Kata Kunci:

Track Quality Index, ketebalan *ballast*, prediksi nilai TQI, regresi linear, Jalan Rel.

***Correspondence email:**

nugrohoutomo7577@gmail.com

Submitted: 03 September 2025

Revised: 14 September 2025

Accepted: 07 Januari 2026

Published: 01 Februari 2026

ABSTRAK

Track Quality Index (TQI) merupakan indikator penting dalam mengevaluasi kualitas geometri jalur rel kereta api. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai TQI dan memprediksi degradasinya berdasarkan parameter geometrik serta ketebalan *ballast* pada jalur rel Makassar–Parepare dengan *track gauge* 1435 mm. Data yang digunakan meliputi hasil pengukuran kereta ukur jalan rel, ketebalan *ballast*, serta beban dan frekuensi lalu lintas. Metode analisis yang digunakan adalah regresi linear sederhana untuk mengetahui pengaruh ketebalan *ballast* terhadap TQI. Hasil menunjukkan bahwa 66,66% segmen jalur berada pada kategori “Baik Sekali”. Sementara itu, ketebalan *ballast* juga berpengaruh signifikan dengan R^2 sebesar 0,973, menunjukkan bahwa semakin tebal lapisan *ballast*, kualitas jalur rel semakin baik. Prediksi TQI dalam jangka panjang menunjukkan kenaikan nilai TQI seiring waktu akibat penurunan *ballast*, dengan nilai rata-rata meningkat dari 24,23 pada tahun ke-5 menjadi 69,61 pada tahun ke-25. Hasil ini menegaskan pentingnya intervensi pemeliharaan periodik berbasis prediksi TQI untuk mempertahankan keselamatan dan kenyamanan operasional jalur rel.

ABSTRACT

Keywords:

Track Quality Index, *ballast* thickness, *TQI* prediction, linear regression, Railway.

The Track Quality Index (TQI) is an essential indicator for evaluating the geometric quality of railway tracks. This study aims to analyze TQI values and predict their degradation based on geometric parameters and ballast thickness on the Makassar–Parepare railway line with a 1435 mm track gauge. The data used include track recording car measurements, ballast thickness, as well as traffic load and frequency. The analytical method employed is simple linear regression to determine the effect of ballast thickness on TQI. The results show that 66.66% of the track segments fall into the “Excellent” category. Furthermore, ballast thickness has a significant influence, with an R^2 value of 0.973, indicating that the thicker the ballast layer, the better the track quality. Long-term TQI prediction reveals an increase in TQI values over time due to ballast degradation, with the average value rising from 24.23 in the 5th year to 69.61 in the 25th year. These findings highlight the importance of periodic maintenance interventions based on TQI prediction to sustain the safety and comfort of railway operations.

PENDAHULUAN

Perkembangan infrastruktur perkeretaapian di Indonesia terus mengalami peningkatan signifikan dalam beberapa dekade terakhir, seiring dengan kebutuhan akan moda transportasi yang efisien, aman, dan ramah lingkungan (Karunianingrum & Widyastuti, 2020; Putra et al., 2024). Salah satu proyek strategis nasional yang mendukung peningkatan mobilitas dan konektivitas wilayah Indonesia bagian timur adalah pembangunan jalur kereta api Makassar–Parepare. Jalur ini menggunakan *track gauge* 1435 mm (*standard gauge*), berbeda dengan mayoritas jalur kereta api di Indonesia yang menggunakan lebar 1067 mm, dan dirancang untuk mendukung kapasitas dan kecepatan operasional yang lebih tinggi (Fistcar et al., 2020).

Namun demikian, kesuksesan operasional jalur rel tidak hanya ditentukan oleh spesifikasi teknis saat konstruksi, tetapi juga sangat tergantung pada pemeliharaan kualitas geometrik lintasan selama masa operasional (Kristian & Roesdiana, 2016; Rohim et al., 2010). Salah satu metode kuantitatif yang digunakan secara luas untuk mengevaluasi kondisi geometrik lintasan adalah *Track Quality Index* (TQI). TQI merupakan indeks komposit yang dihitung berdasarkan parameter seperti listriangan (*alignment*), angkatan (*crosslevel*), pertinggian (*profile*), dan lebar jarak antar rel (*track gauge*). Nilai TQI yang rendah menunjukkan kondisi jalur yang baik, sementara nilai TQI yang tinggi menandakan perlunya tindakan perbaikan (Lubis & Widyastuti, 2020; Wantana et al., 2021). Standar nilai TQI yang digunakan PT. Kereta Api Indonesia disajikan pada tabel 1.

Penelitian-penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa analisis TQI dapat memberikan informasi penting dalam merencanakan pemeliharaan preventif, meminimalkan biaya perawatan, dan meningkatkan keselamatan operasi

kereta api (Muhtarom et al., 2021; Yudariansyah et al., 2025). Selain parameter geometri, struktur fisik jalur rel seperti tebal lapisan *ballast* juga berperan penting dalam memengaruhi nilai TQI. *Ballast* berfungsi sebagai pondasi fleksibel yang menopang bantalan dan rel, serta berperan dalam meredam beban dinamis dari lalu lintas kereta api (Utomo, 2009). Oleh karena itu, variasi ketebalan *ballast* dapat berdampak pada kestabilan jalur dan kualitas geometrik lintasan secara keseluruhan.

Mengingat pentingnya aspek geometrik dan struktural dalam penilaian kualitas lintasan, serta terbatasnya kajian terkait hubungan antara parameter geometrik dan ketebalan *ballast* terhadap TQI pada jalur rel *standard gauge* di Indonesia, penelitian ini dilakukan dengan tujuan untuk menganalisis nilai TQI pada jalur rel Makassar–Parepare dan menyusun model prediksi TQI berdasarkan parameter geometri dan tebal *ballast*. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar dalam pengambilan keputusan teknis pemeliharaan berbasis data pada infrastruktur perkeretaapian modern di Indonesia.

Tabel 1 Standar nilai TQI PT. Kereta Api Indonesia

Kategori	Total TQI	Kecepatan (km/jam)	Jenis Kategori
I	$TQI \leq 20$	100 – 120	Baik sekali
II	$20 < TQI \leq 35$	80 – 100	Baik
III	$35 < TQI \leq 50$	60 – 80	Kurang baik
IV	> 50	< 60	Jelek

Sumber: (Subarkah et al., 2021)

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan tujuan menganalisis nilai *Track Quality Index* (TQI) dan membangun model prediksi berdasarkan parameter geometri jalan rel serta ketebalan *ballast* pada jalur rel Makassar–Parepare dengan *track gauge* 1435 mm. Data yang digunakan merupakan data sekunder yang mencakup hasil pengukuran geometri dari kereta ukur jalan rel (*profile*, *alignment*, *crosslevel*, dan *track gauge*), ketebalan *ballast*, serta data lalu lintas berupa frekuensi perjalanan dan beban tonase kereta. Perhitungan TQI dilakukan berdasarkan metode akar kuadrat rata-rata dari lima parameter geometri. Data selanjutnya dianalisis menggunakan regresi linear sederhana untuk mengetahui pengaruh nilai TQI terhadap tebal lapisan *ballast*. Sebelumnya, data diuji asumsi statistik meliputi uji normalitas (*Shapiro-Wilk*) untuk memastikan validitas model. Hasil analisis kemudian digunakan untuk merumuskan model prediksi nilai TQI sebagai dasar evaluasi kualitas jalan rel dan rekomendasi teknis pemeliharaan jalur.

HASIL

Analisis *Track Quality Index* (TQI)

Analisis nilai *Track Quality Index* (TQI) dilakukan pada segmen jalur hulu KM 26+000 hingga KM 29+600 pada lintas Makassar–Parepare. Data yang digunakan merupakan hasil pembacaan kereta ukur yang mencakup parameter *profile*, *alignment*, *crosslevel*, dan *track gauge*. Nilai TQI dihitung dengan menjumlahkan keempat parameter. Contoh perhitungan nilai TQI pada KM 26+400 sampai dengan 26+600 adalah sebagai berikut.

$$TQI = (SD \text{ angk} + SD \text{ list} + SD \text{ pert} + SD \text{ gauge}) \times TQI \text{ Multiplier}$$

$$TQI = (1,55 + 1,86 + 1,40 + 0,78) \times 3$$

$$TQI = 16,78 \text{ (} TQI \leq 20 \text{)}$$

Berdasarkan hasil analisis, diperoleh nilai *Track Quality Index* (TQI) sebesar 16,78 yang mengindikasikan bahwa kondisi geometrik jalur rel pada segmen tersebut berada pada kategori I (Baik Sekali) karena nilai TQI tidak melebihi angka 20. Untuk memberikan gambaran lebih lanjut, sebagian hasil rekapitulasi perhitungan TQI pada KM 26+000 sampai dengan KM 29+600 ditampilkan pada tabel 1 dengan jumlah total data pengamatan sebanyak 18 titik.

Tabel 2 Rekapitulasi Nilai TQI Jalur Kereta Api Lintas Makassar-Parepare KM 26+000 sampai dengan 29+600

Antara	Dari KM	Ke KM	TQI	Pertinggian	Angkatan	Listringan	Track Gauge
MRS-PR	26,0	26,2	37,83	2,95	6,72	2,05	0,88
MRS-PR	26,2	26,4	22,70	2,14	3,15	1,58	0,70
MRS-PR	26,4	26,6	16,78	1,55	1,86	1,40	0,78
MRS-PR	26,6	26,8	12,41	0,90	1,81	0,73	0,70
MRS-PR	26,8	27,0	12,94	0,82	2,22	0,46	0,81
MRS-PR	27,0	27,2	13,09	0,70	1,84	1,14	0,68
MRS-PR	27,2	27,4	10,03	0,61	1,56	0,48	0,69
MRS-PR	27,4	27,6	17,78	0,68	3,88	0,75	0,62
MRS-PR	27,6	27,8	18,60	0,85	3,87	1,00	0,48
MRS-PR	27,8	28,0	19,46	0,75	4,00	1,00	0,74

Antara	Dari KM	Ke KM	TQI	Pertinggian	Angkatan	Listringan	Track Gauge
MRS-PR	28,0	28,2	15,57	1,32	2,40	0,66	0,81
MRS-PR	28,2	28,4	18,07	1,61	2,44	1,07	0,90
MRS-PR	28,4	28,6	26,32	2,36	2,92	2,57	0,92
MRS-PR	28,6	28,8	14,32	0,42	3,33	0,42	0,60
MRS-PR	28,8	29,0	22,56	0,88	5,04	0,83	0,77
MRS-PR	29,0	29,2	41,90	0,48	11,88	0,92	0,69
MRS-PR	29,2	29,4	11,33	0,85	1,46	0,42	1,06
MRS-PR	29,4	29,6	31,53	1,90	6,75	0,93	0,93

Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

Dalam rekapitulasi perhitungan nilai TQI didapatkan hasil persentase sesuai dengan kategori sebagai berikut:

$$\text{Persentase kategori nilai TQI} = \left(\frac{f}{n}\right) \times 100\%$$

Keterangan:

f = frekuensi kategori

n = jumlah data

Berdasarkan hasil analisis, diperoleh distribusi sebagai berikut:

Baik Sekali (TQI ≤ 20) = 12 segmen

Baik (20 < TQI ≤ 35) = 4 segmen

Sedang (35 < TQI ≤ 50) = 2 segmen

Maka, persentasi kategori nilai TQI pada jalur kereta api lintas Makassar-Parepare adalah sebagai berikut.

$$\text{Baik Sekali (TQI} \leq 20) = \frac{12}{18} \times 100 = 66,66\%$$

$$\text{Baik (20 < TQI} \leq 35) = \frac{4}{18} \times 100 = 22,22\%$$

$$\text{Sedang (35 < TQI} \leq 50) = \frac{2}{18} \times 100 = 11,11\%$$

Tabel 3 Rekapitulasi Nilai TQI jalur kereta api lintas Makassar-Parepare segmen Maros-Parepare berdasarkan jenis kategori lintasan

Antara	Dari KM	Ke KM	TQI	Kategori	Jenis Kategori
MRS-PR	26,0	26,2	37,83	III	Sedang
MRS-PR	26,2	26,4	22,70	II	Baik
MRS-PR	26,4	26,6	16,78	I	Baik Sekali
MRS-PR	26,6	26,8	12,41	I	Baik Sekali
MRS-PR	26,8	27,0	12,94	I	Baik Sekali
MRS-PR	27,0	27,2	13,09	I	Baik Sekali
MRS-PR	27,2	27,4	10,03	I	Baik Sekali
MRS-PR	27,4	27,6	17,78	I	Baik Sekali
MRS-PR	27,6	27,8	18,60	I	Baik Sekali
MRS-PR	27,8	28,0	19,46	I	Baik Sekali
MRS-PR	28,0	28,2	15,57	I	Baik Sekali
MRS-PR	28,2	28,4	18,07	I	Baik Sekali
MRS-PR	28,4	28,6	26,32	II	Baik
MRS-PR	28,6	28,8	14,32	I	Baik Sekali
MRS-PR	28,8	29,0	22,56	II	Baik
MRS-PR	29,0	29,2	41,90	III	Sedang
MRS-PR	29,2	29,4	11,33	I	Baik Sekali
MRS-PR	29,4	29,6	31,53	II	Baik

Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

Hasil penghitungan menunjukkan bahwa dari 18 segmen yang dianalisis, sebanyak 12 segmen (66,66%) termasuk dalam kategori “Baik Sekali” dengan nilai TQI ≤ 20. Sebanyak 5 segmen (27,78%) masuk dalam kategori “Baik” (20 < TQI < 35), dan hanya 1 segmen (5,56%) yang berada dalam kategori “Sedang” (35 < TQI < 50). Tidak terdapat segmen dengan nilai TQI di atas 50, yang menandakan bahwa tidak ada lintasan yang masuk dalam kategori “Buruk”.

Distribusi ini menunjukkan bahwa kondisi geometrik jalur rel pada lintas Makassar–Parepare secara umum berada dalam kondisi yang layak operasi dan memenuhi kriteria keselamatan perjalanan kereta api. Namun, pada beberapa

segmen yang mendekati ambang batas kategori sedang, diperlukan evaluasi dan pemantauan lebih lanjut untuk mencegah penurunan kualitas jalur secara progresif.

Dengan demikian, hasil analisis TQI ini menjadi indikator penting dalam perencanaan pemeliharaan jalur rel, khususnya pada lintas *standard gauge* seperti Makassar–Parepare, yang memiliki beban lalu lintas tinggi dan desain kecepatan lebih besar dibandingkan jalur konvensional di Indonesia.

Pengukuran Tebal Lapisan *Ballast*

Pengukuran tebal *ballast* dilakukan pada lokasi yang sama dengan segmen pengamatan nilai *Track Quality Index* (TQI), yaitu di sepanjang lintas jalur hulu Makassar–Parepare dari KM 26+000 hingga KM 29+600 seperti disajikan pada tabel 4. Pengukuran dilakukan pada setiap interval 200 meter, dengan menggunakan metode penggalan dan pengukuran vertikal dari dasar bantalan (*sleepers*) hingga permukaan *subgrade* (tanah dasar).

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa ketebalan lapisan *ballast* pada segmen yang diamati berkisar antara 30 cm hingga 65 cm. Rata-rata ketebalan lapisan *ballast* yang ditemukan adalah sebesar 47,78 cm. Berdasarkan data tersebut, sebagian besar lintasan telah memenuhi spesifikasi teknis minimum yang disarankan untuk jalur *standard gauge*, yaitu ≥ 45 cm, sebagaimana tercantum dalam Pedoman DJKA dan hasil studi terdahulu. Namun demikian, terdapat beberapa segmen dengan ketebalan di bawah standar, yang berpotensi memengaruhi stabilitas geometri jalur dan menurunkan kualitas lintasan dalam jangka panjang.

Selanjutnya, nilai tebal lapisan *ballast* ini dianalisis hubungannya terhadap TQI menggunakan regresi linear sederhana.

Tabel 4 Hasil Pengukuran Tebal Lapisan *Ballast* KM 26+000 sampai dengan KM 29+600

Dari Km	Ke Km	Tebal <i>Ballast</i> Per 5 Titik (cm)					Rata-Rata (cm)
		a	b	c	d	e	
26,0	26,2	49,5	49,5	50,4	50,4	49,3	49,8
26,2	26,4	48,9	49,4	49,2	49,4	49,4	49,3
26,4	26,6	49,6	49,4	49,4	49,4	49,5	49,5
26,6	26,8	49,5	49,5	49,5	49,4	49,4	49,5
26,8	27,0	49,5	49,6	49,6	49,5	49,5	49,5
.
.
.
.
28,6	28,8	49,4	49,4	49,4	49,6	49,4	49,4
28,8	29,0	49,4	49,4	49,4	49,4	49,4	49,4
29,0	29,2	49,4	49,4	49,4	49,4	49,4	49,4
29,2	29,4	49,4	49,4	49,4	49,4	49,4	49,4
29,4	29,6	49,4	49,4	49,4	49,6	49,4	49,4

Sumber: Kementerian Perhubungan Direktorat Jenderal (2025)

Analisis Regresi

Analisis regresi linear sederhana dilakukan untuk mengetahui seberapa besar pengaruh ketebalan *ballast* terhadap nilai *Track Quality Index* (TQI). Variabel independen dalam model ini adalah ketebalan lapisan *ballast* (X), sedangkan variabel dependennya adalah nilai TQI (Y) yang telah dihitung berdasarkan data kereta ukur jalan rel.

Uji Normalitas

Hasil uji normalitas untuk variabel tebal lapisan *ballast* dan nilai TQI (*Track Quality Index*) disajikan pada tabel 5 berikut.

Tabel 5 Hasil Uji Normalitas

	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
TQI	0,085	18	,200*	0,979	18	0,937
<i>Ballast</i>	0,171	18	0,173	0,926	18	0,166

Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

Uji normalitas dengan metode *Shapiro-Wilk* dan *Kolmogorov-Smirnov* menunjukkan bahwa kedua variabel, yaitu TQI dan tebal *ballast*, memiliki nilai signifikansi di atas 0,05, yang mengindikasikan distribusi data bersifat normal.

Oleh karena itu, data dinyatakan memenuhi asumsi kenormalan dan layak untuk dianalisis lebih lanjut menggunakan metode statistik parametrik.

Uji F

Hasil cek uji F untuk mengetahui pengaruh tebal lapisan *ballast* terhadap nilai TQI (*Track Quality Index*) disajikan pada tabel 6 berikut.

Tabel 6 Hasil Cek Uji F

	<i>Model</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F</i>	<i>Sig.</i>
1	Regression	32,587	1	32,587	0,385	,544 ^b
	Residual	1354,013	16	84,626		
	Total	1386,600	17			

Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

Berdasarkan tabel ANOVA, diperoleh nilai F hitung sebesar 496,257 dengan nilai signifikansi <0,001. Nilai signifikansi ini jauh lebih kecil dari taraf signifikansi 0,05 ($\alpha = 5\%$) yang berarti bahwa model regresi yang dibangun secara keseluruhan berpengaruh signifikan secara statistik. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa variabel *ballast* secara simultan berpengaruh signifikan terhadap nilai TQI (*Track Quality Index*).

Uji t

Hasil uji T untuk pengaruh tebal lapisan *ballast* terhadap nilai TQI (*Track Quality Index*) disajikan pada tabel 7 berikut.

Tabel 7 Cek Uji T

	<i>Model</i>	<i>Unstandardized Coefficients</i>		<i>Standardized Coefficients</i>	<i>t</i>	<i>Sig.</i>
		<i>B</i>	<i>Std. Error</i>	<i>Beta</i>		
1	(Constant)	118,714	4,440		26,736	0,000
	<i>Ballast</i>	-1,992	0,089	-0,984	-22,277	0,000

Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

Hasil uji t menunjukkan bahwa variabel ketebalan *ballast* berpengaruh signifikan terhadap nilai TQI dengan nilai t sebesar -22,277 dan signifikansi < 0,001. Koefisien regresi sebesar -1,992 mengindikasikan bahwa setiap peningkatan tebal *ballast* sebesar 1 mm akan menurunkan nilai TQI sebesar 1,992, menandakan hubungan negatif antara kedua variabel. Secara teknis, hal ini menunjukkan bahwa penambahan tebal *ballast* cenderung meningkatkan kualitas lintasan, karena nilai TQI yang lebih rendah merepresentasikan kondisi trek yang lebih baik. Adapun persamaan regresi yang diperoleh adalah sebagai berikut:

$$Y = 118,714 - 1,992X$$

Koefisien Determinasi

Hasil uji koefisien determinasi untuk pengaruh tebal lapisan *ballast* terhadap nilai TQI (*Track Quality Index*) disajikan pada tabel 8 berikut.

Tabel 8 Hasil Uji Koefisien Determinasi

<i>Model</i>	<i>R</i>	<i>R Square</i>	<i>Adjusted R Square</i>	<i>Std. Error of the Estimate</i>
1	,153 ^a	0,024	-0,038	9,19923

Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

Hasil regresi menunjukkan bahwa nilai koefisien determinasi (R^2) sebesar 0,969, yang berarti 96,9% variasi nilai TQI dapat dijelaskan oleh ketebalan *ballast*, sementara 3,1% dipengaruhi oleh faktor lain di luar model. Nilai Adjusted R^2 sebesar 0,967 menunjukkan kestabilan model meskipun disesuaikan dengan jumlah sampel dan variabel. Selain itu, nilai Standard Error of the Estimate sebesar 1,64525 tergolong kecil, yang mengindikasikan bahwa model memiliki akurasi prediksi yang tinggi terhadap nilai TQI berdasarkan ketebalan *ballast*.

Hubungan negatif ini memperkuat dugaan bahwa semakin tebal lapisan *ballast*, maka stabilitas bantalan dan lintasan rel meningkat, sehingga deviasi geometrik lintasan dapat ditekan. Hal ini sejalan dengan fungsi *ballast* sebagai elemen penyebar beban, penahan posisi lintasan, serta peredam getaran yang terjadi akibat lalu lintas kereta api (Cahyaningrum & Leliana, 2023; Fikria Erdiana & Zhafirah, 2023).

Dengan demikian, ketebalan *ballast* terbukti memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai TQI, dan dapat dijadikan salah satu indikator teknis dalam perencanaan atau evaluasi program pemeliharaan jalur rel.

Estimasi Penurunan Lapisan *Ballast*

Penurunan lapisan *ballast* merupakan fenomena geoteknik yang dapat memengaruhi stabilitas geometri jalur rel, terutama pada lintasan dengan intensitas lalu lintas tinggi (Subarkah et al., 2021). Dalam penelitian ini, estimasi penurunan *ballast* dihitung berdasarkan perbedaan antara ketebalan *ballast* rencana dan ketebalan aktual hasil pengukuran lapangan pada segmen jalur hulu KM 26+000 sampai KM 29+600.

Tonase Tahunan (*Passing Tonage*)

Tonase tahunan (*Passing Tonage*) menggambarkan total beban kereta api yang melintasi suatu segmen jalur rel selama satu tahun (Ramadhan et al., 2023). Nilai tonase ini dihitung berdasarkan frekuensi perjalanan kereta api dan bobot total tiap rangkaian yang melintasi jalur kereta api lintas Makassar-Parepare. Berat gerbong pada setiap kereta api yang melintas disajikan pada tabel 9 berikut.

Tabel 9 Berat Gerbong Setiap Kereta

Nama Kereta	Jumlah Gerbong		Tonase (Ton)	
	TeC (Trailer Engine Cabin)	T (Trailer Car)	TeC	T
Lontara	2	1	43,5	38,5
Andalan Celebes	2	1	43,5	38,5

Berdasarkan tabel 8 dapat dihitung total berat sarana kereta api yang melintas pada jalur kereta api lintas Makassar-Parepare dengan mengalikan tonase setiap jenis sarana dengan jumlah gerbong pada masing-masing kereta. Total berat sarana gerbong kereta yang melintas disajikan pada tabel 10 berikut.

Tabel 10 Total Berat Sarana Gerbong Kereta

No.	Jenis Sarana	Total Berat Sarana (Ton)
1	TeC	174
2	T	77

Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

Berdasarkan total berat sarana gerbong kereta maka dapat dilakukan perhitungan tonase tahunan (*passing tonage*) sebagai berikut:

$$T = 360 \times S \times TE$$

$$TE = T_p + T_1$$

Keterangan:

TE : tonase ekivalen (ton/hari)

T_p : tonase kereta penumpang harian (ton)

T₁ : tonase lokomotif harian (ton)

S : koefisien yang besarnya tergantung kualitas lintasan (S = 1,1 untuk lintas dengan V maksimum 120 km/jam)

K₁ : koefisien (K₁ = 1,4)

$$T_1 = \sum \text{Berat Lokomotif} \times K_1$$

$$= 174 \times 1,4$$

$$= 243,6 \text{ ton}$$

$$T_p = 77 \text{ ton}$$

$$TE = T_1 + T_p$$

$$= 243,6 + 77$$

$$= 320,6 \text{ ton/hari}$$

$$T = 360 \times TE \times S$$

$$= 360 \times 320,6 \times 1,1$$

$$= 126.957,6 \text{ ton/tahun}$$

Berdasarkan hasil perhitungan tonase tahunan, didapatkan bahwa pada jalur kereta api lintas Makassar-Parepare memiliki tonase tahunan sebesar 126.957,6 ton/tahun.

Pembebanan Siklik (Siklus Beban)

Pembebanan siklik merupakan efek berulang dari beban gandar kereta api yang memberikan tekanan dinamis pada lapisan *ballast* setiap kali roda kereta melintas (Pradana et al., 2025). Setiap beban gandar yang melintas menyebabkan deformasi kecil yang bersifat akumulatif. Jumlah siklus beban dalam setahun berkorelasi langsung dengan tonase tahunan. Hasil perhitungan pembebanan siklik (Jumlah Siklus Beban) disajikan pada tabel 11 berikut.

Tabel 11 Hasil Perhitungan Pembebanan Siklik (Jumlah Siklus Bebas)

Nama Kereta	Jumlah Gerbong	Berat (Ton)	Jumlah Roda	Berat Roda Statis (ton)		Jumlah Siklus Beban	
				$P_s = \frac{\text{Berat Lokomotif}}{\text{Jumlah Roda}}$	$N_b = \frac{T}{4 \times P_s}$		
Lontara	3	43,5	8	5,44		5837,13	
Andalan Celebes	3	43,5	8	5,44		5837,13	
TOTAL						11674,26	

Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

Berdasarkan perhitungan pembebanan siklik didapatkan bahwa jalur kereta api lintas Makassar-Parepare menerima pembebanan sebesar 11.674,26 siklus dari semua kereta yang melintas. Pembebanan siklik ini merupakan faktor terjadinya penurunan lapisan *ballast*.

Estimasi penurunan lapisan *ballast* tahunan dihitung berdasarkan hubungan empiris antara jumlah siklus pembebanan dan penurunan vertikal lapisan *ballast*. Perhitungan deformasi atau regangan plastis menggunakan persamaan Selig & Waters (1994).

$$\begin{aligned} \epsilon N &= \epsilon l \times N_b \\ &= 0,35\% \times 126.957,6 \times 0,21 \\ &= 4,13 \% \end{aligned}$$

Nilai deformasi tersebut memengaruhi penurunan lapisan *ballast* (S_b) yang terjadi pada jalur kereta api lintas Makassar-Parepare dengan ketebalan (H_b) yang berbeda disetiap titik yang sudah dilakukan pengukuran. Selig & Waters juga menuliskan persamaan untuk menghitung penurunan lapisan *ballast* dengan pengaruh dari deformasi plastis dan ketebalan *ballast* yang diteliti. Contoh perhitungan pada KM 26+000 sampai dengan KM 26+200 di bagian hulu adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} S_b &= \epsilon N \times H_b \\ &= 4,13 \% \times 49,82 \\ &= 2,06 \end{aligned}$$

Sedangkan untuk contoh perhitungan pada bagian hilir adalah sebagai berikut.

$$\begin{aligned} S_b &= \epsilon N \times H_b \\ &= 4,13 \% \times 49,82 \\ &= 2,06 \end{aligned}$$

Hasil perhitungan penurunan lapisan *ballast* pada jalur kereta api lintas Makassar-Parepare disajikan pada tabel 12 berikut.

Tabel 12 Hasil perhitungan estimasi penurunan lapisan *ballast*

Titik	KM		Tebal Bawah Bantalan (cm)		Penurunan <i>Ballast</i> (cm)	
	Hulu	Hilir	Hulu	Hilir	Hulu	Hilir
1	26,00	26,20	49,82	49,26	2,06	2,03
2	26,20	26,40	49,26	49,46	2,03	2,04
3	26,40	26,60	49,46	49,46	2,04	2,04
4	26,60	26,80	49,46	49,54	2,04	2,05
5	26,80	27,00	49,54	49,50	2,05	2,04
6	27,00	27,20	49,50	49,50	2,04	2,04
7	27,20	27,40	49,50	49,40	2,04	2,04
8	27,40	27,60	49,40	49,50	2,04	2,04
9	27,60	27,80	49,50	49,50	2,04	2,04
10	27,80	28,00	49,50	49,56	2,04	2,05
11	28,00	28,20	49,56	49,48	2,05	2,04
12	28,20	28,40	49,48	49,48	2,04	2,04
13	28,40	28,60	49,48	49,44	2,04	2,04
14	28,60	28,80	49,44	49,40	2,04	2,04
15	28,80	29,00	49,40	49,40	2,04	2,04
16	29,00	29,20	49,40	49,40	2,04	2,04
17	29,20	29,40	49,40	49,44	2,04	2,04
18	29,40	29,60	49,44	49,82	2,04	2,06

Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

Estimasi penurunan lapisan *ballast* terbesar diperkirakan terjadi pada segmen KM 26+000 hingga KM 26+200 pada jalur hulu, dengan nilai penurunan mencapai 2,06 cm per tahun. Sehingga perlu mendapat perhatian khusus dalam kegiatan pemeliharaan jalan rel. Penurunan ini dipengaruhi oleh faktor tonase lalu lintas kereta api serta kondisi awal

ketebalan lapisan *ballast* pada segmen tersebut. Untuk mempermudah estimasi/prediksi penurunan lapisan *ballast* dilakukan perhitungan per 5 juta ton/tahun tonase tahunan dengan ketebalan lapisan *ballast* di lapangan yang disajikan pada tabel 13 berikut.

Tabel 13 Estimasi penurunan lapisan *ballast* per 5 juta ton/tahun

T (ton/tahun) x 10 ⁶	εN	Hb (cm)		Penurunan Balas (Sb = εN x Hb)	
		Hulu	Hilir	Hulu (cm)	Hilir (cm)
5	0,0893	49,82	49,26	4,45	4,40
10	0,1033	49,82	49,26	5,15	5,09
15	0,1125	49,82	49,26	5,60	5,54
20	0,1195	49,82	49,26	5,95	5,89
25	0,1252	49,82	49,26	6,24	6,17

Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

Penurunan lapisan *ballast* yang tidak seragam dapat menimbulkan ketidakseimbangan dukungan terhadap bantalan rel (sleeper), yang pada akhirnya menyebabkan deviasi geometri yang berlebihan . Oleh karena itu, segmen-segmen dengan nilai penurunan tinggi perlu menjadi prioritas dalam program perawatan atau pengisian kembali lapisan *ballast* untuk menjaga kualitas dan keselamatan operasi jalur rel.

Prediksi Nilai TQI

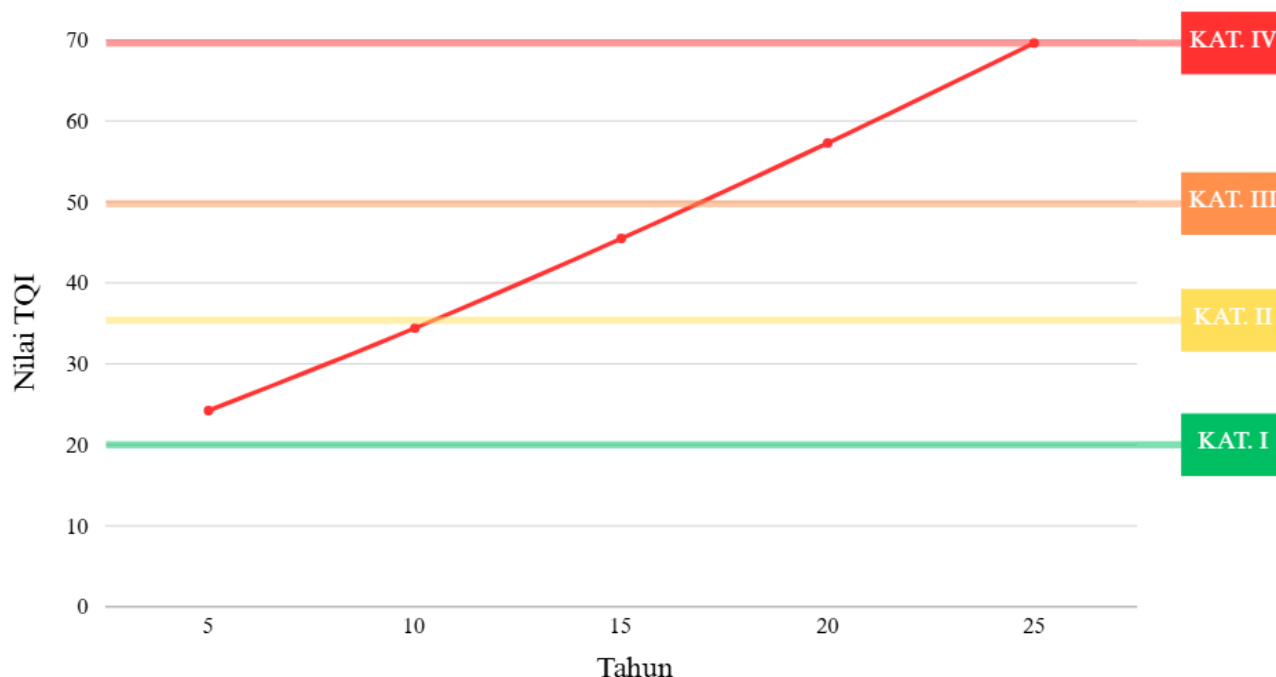
Setelah dilakukan perhitungan estimasi penurunan lapisan *ballast*, selanjutnya dilakukan perhitungan untuk memprediksi nilai TQI pada setiap segmen berdasarkan persamaan yang sudah ditetapkan pada regresi linear berganda yang disajikan pada tabel 14 berikut.

Tabel 14 Prediksi Nilai TQI setiap segmen

KM	Tahun				
	5	10	15	20	25
26,0	23,57	33,82	44,98	56,84	69,27
26,2	24,64	34,78	45,81	57,54	69,82
26,4	24,26	34,43	45,52	57,29	69,62
26,6	24,26	34,43	45,52	57,29	69,62
26,8	24,10	34,30	45,40	57,19	69,54
27,0	24,18	34,37	45,46	57,24	69,58
27,2	24,18	34,37	45,46	57,24	69,58
27,4	24,37	34,54	45,60	57,36	69,68
27,6	24,18	34,37	45,46	57,24	69,58
27,8	24,18	34,37	45,46	57,24	69,58
28,0	24,07	34,26	45,37	57,16	69,52
28,2	24,22	34,40	45,49	57,26	69,60
28,4	24,22	34,40	45,49	57,26	69,60
28,6	24,30	34,47	45,55	57,31	69,64
28,8	24,37	34,54	45,60	57,36	69,68
29,0	24,37	34,54	45,60	57,36	69,68
29,2	24,37	34,54	45,60	57,36	69,68
29,4	24,30	34,47	45,55	57,31	69,64
AVG	24,23	34,41	45,49	57,27	69,61

Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

Berdasarkan prediksi nilai TQI di atas, perubahan nilai TQI setiap 5 tahun menjadi lebih besar yang mengindikasikan bahwa kondisi TQI semakin memburuk akibat penurunan tebal lapisan *ballast*. Terjadi perubahan pada kategori jalan rel yang semula berada pada Kategori II (Baik) menjadi Kategori III (Kurang Baik) pada tahun ke 15 yang disajikan pada gambar 1 berikut.



Gambar 1 Grafik prediksi nilai TQI setiap 5 tahun
Sumber: Hasil Perhitungan (2025)

Gambar 1 menunjukkan bahwa nilai *Track Quality Index* (TQI) mengalami peningkatan seiring bertambahnya usia jalan rel apabila tidak disertai intervensi pemeliharaan berupa penambahan *ballast*. Pada tahun ke-5 dan ke-10, TQI masih berada dalam kategori II (baik), namun mulai tahun ke-15 hingga ke-25, terjadi lonjakan nilai yang signifikan. Nilai TQI mencapai kategori III pada tahun ke-20 dan mendekati kategori IV pada tahun ke-25, yang mencerminkan penurunan kualitas jalur secara progresif. Peningkatan ini disebabkan oleh degradasi struktural akibat beban lalu lintas dan faktor lingkungan. Oleh karena itu, penambahan *ballast* secara berkala diperlukan sebagai bentuk perawatan preventif. Berdasarkan tren grafik, waktu optimal untuk melakukan penambahan *ballast* adalah pada tahun ke-15, sebelum TQI melampaui ambang batas kategori II, sehingga kualitas geometrik jalur dapat dipertahankan dan mencegah terjadinya penurunan yang lebih parah.

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa nilai *Track Quality Index* (TQI) pada jalur kereta api lintas Makassar–Parepare, khususnya segmen Maros–Parepare KM 26+000 hingga KM 29+600, sebagian besar berada dalam kondisi baik hingga sangat baik, dengan 66,66% segmen masuk kategori “Baik Sekali”. Hasil analisis regresi linear sederhana menunjukkan bahwa ketebalan lapisan *ballast* memiliki pengaruh signifikan terhadap nilai TQI, dengan hubungan negatif yang kuat ($R^2 = 0,969$), menunjukkan bahwa peningkatan ketebalan lapisan *ballast* berdampak pada penurunan nilai TQI, atau peningkatan kualitas jalur. Model prediktif TQI yang dibangun juga menunjukkan peningkatan nilai TQI secara progresif dalam rentang 25 tahun tanpa adanya intervensi pemeliharaan, di mana rata-rata TQI meningkat dari 24,23 menjadi 69,61. Estimasi penurunan lapisan *ballast* akibat pembebanan lalu lintas juga menunjukkan kontribusi terhadap degradasi geometrik lintasan. Berdasarkan hasil ini, disarankan agar penambahan lapisan *ballast* dilakukan secara berkala, idealnya pada tahun ke-15, untuk menjaga kualitas dan keselamatan operasi jalur rel jangka panjang.

DAFTAR PUSTAKA

- Cahyaningrum, A. E., & Leliana, A. (2023). Kajian Anjlokkan Kereta Api Pada Lintas Rangkasbitung-Tanah Abang Berdasarkan *Track Quality Index* (TQI). *Journal of Sustainable Civil Engineering (JOSCE)*, 5(02), 134–143. <https://doi.org/10.47080/josce.v5i02.2828>
- Fikria Erdiana, Y., & Zhafirah, A. (2023). *Penilaian Track Quality Index Jalan Rel Rancaekek-Haurpugur*. <https://jurnal.itg.ac.id/>
- Fistcar, W. A., Widyastuti, H., Iranata, D., & Prastyanto, C. A. (2020). Pengaruh Parameter *Track Quality Indeks* (TQI) Terhadap Perilaku Bantalan Beton. *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil*, 18(1), 131. <https://doi.org/10.12962/j2579-891x.v18i1.6274>

- Karunianingrum, D. I., & Widyastuti, H. (2020). Penilaian *Track Quality Index* (TQI) berdasarkan Standar Perkeretaapian Indonesia (Studi Kasus : Cirebon-Cikampek). In *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil* (Vol. 18, Issue 1).
- Kristian, Y., & Roesdiana, T. (2016). Analisis Kerusakan Jalan Rel Wilayah UPT Resor Jalan Rel 3.13 Tanjung Berdasarkan Hasil Kereta Ukur. In *CIREBON Jurnal Konstruksi* (Issue 1).
- Lubis, R. R. A., & Widyastuti, H. (2020). Penentuan Rekomendasi Standar *Track Quality Index* (TQI) untuk Kereta Semcepat di Indonesia (Studi Kasus: Surabaya-Cepu). In *Jurnal Aplikasi Teknik Sipil* (Vol. 18, Issue 1).
- Muhtarom, Z., Yulita Ratih, S., & Program Studi Sipil, A. (2021). *Analisis Kondisi Jalan Rel Kereta Api Pada Lintas Sragen-Solo Berdasarkan Nilai Track Quality Indeks (TQI)*. 1–13.
- Pradana, P. A. C., Purnamasari, F., & Alfiansyah, A. D. (2025). Analisis Penurunan *Ballast* Akibat Beban Tahunan Kereta Api (*Passing Tonnage*) Pada Segmen Jember - Kalisat. *Media Ilmiah Teknik Sipil*, 13(1), 9–17.
- Putra, D. A. M., Utomo, N., & Estikhamah, F. (2024). Studi Probabilitas Pemilihan Moda Transportasi Kereta Api Eksekutif Gajayana dan Kereta Api Eksekutif Jayabaya dengan Rute Jakarta-Malang. *Jurnal Talenta Sipil*, 7(2), 641. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v7i2.568>
- Ramadhan, D., Setiadji, H., & Riyanto, B. (2023). Analisis *Track Quality Index* (TQI) Berdasarkan Standar Kereta Api Indonesia, Polandia Dan India (Studi Kasus Lintas Brumbung-Kedungjati). *Jurnal Darma Agung*, 31, 253–262. <https://doi.org/10.46930/ojsuda.v31i5.3727>
- Rohim, A., Berawi, B., Delgado, R., Calçada, R., & Vale, C. (2010). *Evaluating Track Geometrical Quality through Different Methodologies*. *Article in International Journal of Technology*, 1, 38–47. <https://doi.org/10.14716/ijtech.v1i1.35>
- Subarkah, U., Widyastuti, H., & Prastyanto, C. A. (2021). *Analysis Effect Of Thick Ballast On Track Quality Index (TQI) Value Route Wonokromo – Mojokerto*. *Jurnal Penelitian Transportasi Darat*, 23(1), 30–36. <https://doi.org/10.25104/jpjd.v23i1.1589>
- Utomo, S. H. T. (2009). *Jalan Rel* (3rd ed., Vol. 3). Beta Offset.
- Wantana, A. H., Widyastuti, H., & Prastyanto, C. A. (2021). Prediksi Nilai *Track Quality Index* (TQI) Berdasarkan Data Frekuensi dan Beban Lalu Lintas untuk Lebar Sepur 1067. *Jurnal Penelitian Transportasi Darat*, 22(2), 131–142. <https://doi.org/10.25104/jpjd.v22i2.1590>
- Yudariansyah, H., Ismiyati, I., & Narendera, A. (2025). *Prediction Model for Track Quality Index Categories on the Northern and Southern Railway Lines of Java*. *Periodica Polytechnica Transportation Engineering*, 53(2), 184–193. <https://doi.org/10.3311/PPtr.38115>