



Analisis Pengaruh Kegagalan Sambungan Rel Dengan Menggunakan Metode AHP, FMECA, WRPN (Studi Kasus Lintas Stasiun Tanjung Karang – Stasiun Rejosari)



Febriyadi^{1,*}, Hadyan Arifin Bustam¹, Arif Setyaji¹, Elyabet Melyta¹,
Nurmagita Pamursari¹, Ananda Agneshia Putri²

¹Program Studi Teknik Perkeretaapian Institut Teknologi Sumatera

²Program Studi Teknologi Rekayasa Kontruksi Jembatan dan Jalan Politeknik Negeri Banjarmasin

*Email febriyadi@ka.itera.ac.id

DOI: <https://doi.org/10.33369/pendipa.9.3.701-710>

ABSTRACT

Rail joints are critical points in railway track infrastructure that affect passenger train ride comfort and safety. This study analyzes their impact along the Tanjung Karang – Rejosari line through Track Quality Index (TQI) and International Roughness Index (IRI Roadbump) measurements, passenger perception surveys using the Analytic Hierarchy Process (AHP), and failure risk evaluation using Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis (FMECA) with Weighted Risk Priority Number (WRPN). Results indicate that joints with high TQI and IRI values produce significant impacts, reducing comfort. AHP identified impacts as the dominant factor, while FMECA found the highest RPN in thermite welded joints with the failure mode of “joint corrosion.” The study recommends replacing thermite welding with flash butt welding and converting mechanical joints to permanent welded joints to improve track geometry, reduce failure risk, and enhance comfort and safety.

Keywords: Rail Joint, comfort, safety, TQI, IRI, AHP, FMECA, WRPN, flash butt welding.

ABSTRAK

Sambungan rel merupakan titik kritis pada infrastruktur jalan rel yang memengaruhi kenyamanan dan keselamatan perjalanan kereta api penumpang. Penelitian ini menganalisis pengaruh sambungan rel pada lintas Stasiun Tanjung Karang – Stasiun Rejosari melalui pengukuran nilai dari *Track Quality Index* (TQI) dan Indeks ketidak rataan Longitudinal (IRI Roadbump), survei persepsi penumpang dengan *Analytic Hierarchy Process* (AHP), serta evaluasi risiko kegagalan menggunakan Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis (FMECA) dan *Weighted Risk Priority Number* (WRPN). Hasil menunjukkan sambungan dengan TQI dan IRI tinggi menghasilkan hentakan besar yang menurunkan kenyamanan. AHP mengidentifikasi hentakan sebagai faktor dominan, sedangkan FMECA menunjukkan nilai RPN tertinggi pada sambungan las thermit dengan mode kegagalan “korosi pada sambungan”. Penelitian ini merekomendasikan penggantian las thermit menjadi flash butt welding serta penggantian sambungan mekanis menjadi sambungan las permanen untuk memperbaiki kualitas geometri rel, menurunkan risiko kegagalan, dan meningkatkan kenyamanan serta keselamatan.

Kata kunci: Sambungan Rel, Kenyamanan, Keselamatan, TQI, IRI, AHP, FMECA, WRPN, *Flash Butt Welding*.

PENDAHULUAN

Kereta api merupakan moda transportasi yang memegang peranan vital dalam sistem mobilitas nasional, baik untuk pergerakan penumpang maupun distribusi barang. Keunggulan kereta api terletak pada kapasitas angkut yang besar, ketepatan waktu, serta

efisiensi energi yang relatif lebih baik dibandingkan moda transportasi darat lainnya (S, Atmaja, 2016). Di wilayah Sumatera, khususnya pada lintas Tanjung Karang – Rejosari, kereta api berfungsi sebagai tulang punggung transportasi dengan melayani perjalanan penumpang (KA Kuala Stabas dan KA Express Rajabasa)

sekaligus angkutan barang, terutama batubara. Berdasarkan data beban lintas, jalur ini dikategorikan sebagai jalan rel kelas I sesuai PM No. 60 Tahun 2012, karena memiliki volume lintas tahunan di atas 20 juta ton. Kondisi tersebut menuntut infrastruktur jalan rel dengan kualitas tinggi, andal, dan terpelihara dengan baik.

Salah satu komponen paling krusial dalam infrastruktur perkeretaapian adalah sambungan rel, yaitu titik penghubung antara dua batang rel. Sambungan merupakan lokasi dengan tingkat kerentanan tinggi terhadap berbagai jenis kerusakan akibat beban dinamis berulang, getaran, perubahan suhu, maupun kualitas konstruksi yang kurang sempurna (A. Ikhlas, 2017).

Meskipun metode las thermit banyak digunakan karena lebih praktis di lapangan, kualitas hasil pengelasan ini sangat dipengaruhi oleh keterampilan pekerja, kondisi lingkungan, serta proses pencampuran material (Holland, L.P. 2025). Akibatnya, cacat las seperti porositas, retakan, maupun korosi dini masih sering ditemukan. Kondisi lapangan di lintas Tanjung Karang – Rejosari menunjukkan adanya sambungan dengan kualitas di bawah standar teknis yang ditetapkan, seperti PM No. 60 Tahun 2012 maupun standar internasional EN 14587, khususnya terkait kerataan dan celah sambungan (O.K.Y Fernando, 2024).

Untuk memahami secara menyeluruh dampak sambungan rel terhadap operasi kereta api, penelitian ini menggunakan tiga pendekatan analitis. Pertama, dilakukan pengukuran kondisi fisik sambungan melalui indikator teknis, seperti Track Quality Index (TQI) dan International Roughness Index (IRI). Data ini digunakan untuk mengevaluasi keterkaitan antara kecepatan operasional kereta dengan kualitas geometri sambungan, serta mengidentifikasi segmen kritis yang berpotensi mengganggu kenyamanan perjalanan.

Ketiga, untuk menilai risiko teknis yang ditimbulkan oleh sambungan rel, penelitian ini menerapkan *Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis* (FMECA). Metode ini digunakan untuk mengidentifikasi berbagai potensi kegagalan sambungan, mengevaluasi dampaknya terhadap operasi, serta menetapkan prioritas penanganan (D.M. Sumarta, 2017).

Dengan menilai tiga parameter utama Severity (tingkat keparahan), Occurrence (kemungkinan terjadinya), dan Detection (kemampuan deteksi) dihitung nilai Risk Priority Number (RPN). Selanjutnya, analisis diperkuat menggunakan pendekatan Weighted RPN (WRPN) yang memberikan bobot lebih besar pada parameter severity, sehingga hasil penilaian risiko menjadi lebih proporsional dan realistis (A. Rahman, 2021).

Ketiga pendekatan tersebut analisis teknis (TQI dan IRI), persepsi penumpang (AHP), serta evaluasi risiko kegagalan (FMECA dan WRPN) memberikan gambaran komprehensif mengenai kondisi sambungan rel di lintas Tanjung Karang – Rejosari. Hasilnya diharapkan dapat menjadi dasar rekomendasi teknis bagi pengelola infrastruktur dalam menentukan strategi perawatan maupun penggantian metode penyambungan, sehingga tercapai peningkatan keselamatan, kenyamanan, dan efisiensi operasional kereta api penumpang maupun barang.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini diklasifikasikan sebagai penelitian deskriptif yang bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai kondisi aktual di lapangan, khususnya terkait dampak sambungan rel terhadap aspek keselamatan dan kenyamanan dalam operasi kereta api penumpang. Studi ini dilaksanakan melalui kombinasi metode observasi lapangan dan wawancara pada penumpang, dengan menerapkan pendekatan campuran (*mixed methods*) yang mengintegrasikan analisis kualitatif dan kuantitatif (Sugiyono, 2013).

Menentukan jumlah responden dalam penyebaran kuesioner, digunakan rumus slovin yang bertujuan untuk menghitung ukuran sampel yang representatif dari suatu populasi dengan batas toleransi kesalahan tertentu. Rumus slovin dinyatakan sebagai berikut:

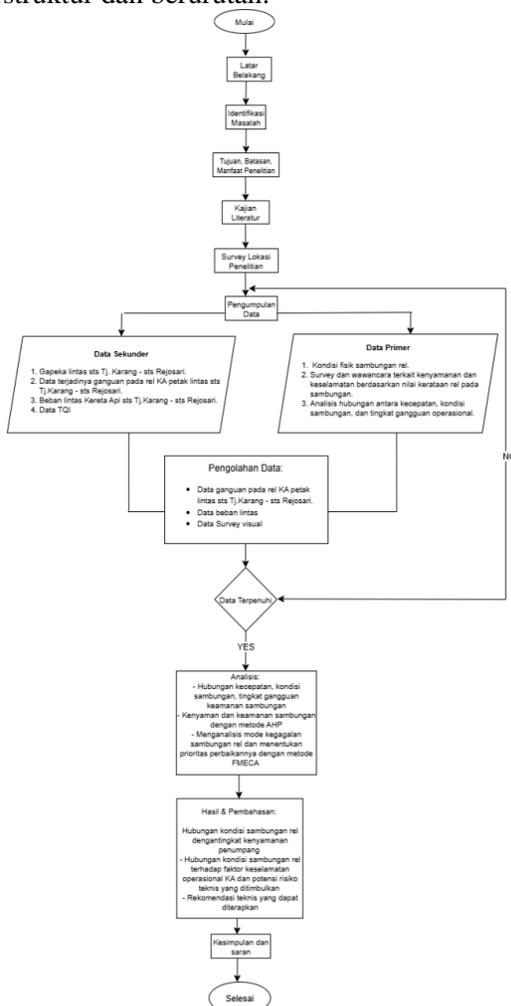
$$n = \frac{N}{1 + N \cdot e^2}$$

Keterangan:

n : ukuran sampel
 N : jumlah populasi
 e : tingkat kesalahan (*error tolerance*) yang dapat ditoleransi, misalnya 5% atau 0,05 untuk tingkat kepercayaan 95%

Metode analisis data yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari dua pendekatan utama, yaitu pendekatan kuantitatif berbasis persepsi pengguna menggunakan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP), serta pendekatan teknis berbasis risiko menggunakan metode *Failure Mode, Effects and Criticality Analysis* (FMECA). Kedua pendekatan ini saling melengkapi dalam mengevaluasi pengaruh sambungan rel terhadap keselamatan dan kenyamanan operasi kereta api penumpang.

Untuk memberikan gambaran yang sistematis mengenai tahapan dalam pelaksanaan penelitian ini, digunakan sebuah diagram alir yang menggambarkan alur proses penelitian dari awal hingga akhir. Diagram alir ini bertujuan untuk mempermudah pemahaman terhadap metodologi yang diterapkan serta menunjukkan hubungan antara setiap langkah penelitian secara terstruktur dan berurutan.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian pada Gambar 1. menunjukkan tahapan yang digunakan dalam analisis pengaruh sambungan rel terhadap keselamatan dan kenyamanan operasi kereta api penumpang pada lintas Tanjung Karang–Rejosari. Tahap awal penelitian dimulai dengan penyusunan latar belakang, identifikasi masalah, serta perumusan tujuan, batasan, dan manfaat penelitian. Selanjutnya dilakukan kajian literatur yang bertujuan untuk memperoleh dasar teori, standar teknis, serta referensi dari penelitian terdahulu yang relevan.

Data yang dianalisis diperoleh melalui survei lapangan, observasi langsung pada lintas Stasiun Tanjung Karang – Stasiun Rejosari, serta penyebaran kuesioner kepada penumpang yang pernah melalui lintas tersebut. Kuesioner disusun menggunakan pendekatan metode *stated preference*, yaitu metode yang digunakan untuk mengetahui persepsi responden terhadap kondisi aktual atau nyata di lapangan, seperti keselamatan dan kenyamanan saat melintasi sambungan rel.



Gambar 2. Lokasi Penelitian

Tahap berikutnya adalah survei lokasi penelitian untuk memastikan kondisi lapangan dan menentukan titik-titik pengamatan. Setelah itu, dilakukan pengumpulan data yang terbagi menjadi dua jenis, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer meliputi kondisi fisik sambungan rel, hasil survei dan wawancara terkait kenyamanan dan keselamatan penumpang berdasarkan kerataan rel, serta analisis hubungan antara kecepatan, kondisi sambungan, dan tingkat gangguan operasional. Data sekunder mencakup grafik perjalanan kereta api (*gapeka*), data gangguan perjalanan pada lintas, beban

lintas kereta api, serta data *Track Quality Index* (TQI).

Metode Failure Mode, Effects and Criticality Analysis (FMECA) digunakan untuk menganalisis potensi kegagalan pada sambungan rel yang dapat memengaruhi keselamatan dan kenyamanan perjalanan kereta api. Setiap mode kegagalan kemudian dievaluasi berdasarkan tiga parameter (S O D). Ketiga nilai tersebut dikalikan untuk mendapatkan nilai *Risk Priority Number* (RPN) dengan rumus:

$$RPN = S \times O \times D$$

Keterangan :

Severity (S) : tingkat keparahan dampak bagi kegagalan terhadap keselamatan dan kenyamanan

Occurance (O) : tingkat kemungkinan kegagalan terjadi

Detection (D) : tingkat kemampuan sistem untuk mendeteksi kegagalan sebelum terjadi dampak.

Semakin tinggi nilai RPN, semakin kritis mode kegagalan tersebut dan perlu penanganan prioritas. Hasil dari metode FMECA digunakan untuk memberikan rekomendasi teknis terkait inspeksi, perawatan, atau perbaikan sambungan rel guna meningkatkan keselamatan dan kenyamanan operasional kereta api.

Road Bump merupakan aplikasi berbasis Android yang dirancang untuk mendeteksi ketidakrataan permukaan jalan atau rel dengan memanfaatkan sensor akselerometer internal pada *smartphone Road Bump* terdiri dari fitur *recordings* yang akan menampilkan beberapa pilihan tombol perekaman dan fitur Map yang akan menampilkan peta lokasi, grafik IRI dan kecepatan kendaraan. Contoh tampilan aplikasi Road Bump ditunjukkan pada Gambar 3 di bawah ini:



Gambar 3. Tampilan Aplikasi Road Bump

Warna yang muncul pada *stripmap* memudahkan kita melihat kondisi permukaan jalan sesuai hasil IRI yang diperoleh. Selain nilai IRI, aplikasi Road Bump juga dapat menampilkan nilai *Present Serviceability Rating* (PSR). Nilai ini digunakan sebagai salah satu tolak ukur tingkat keselamatan dan kenyamanan jalan (Kurnia & Nugraha, 2021).

Hasil dari analisis tersebut kemudian dibahas untuk menguraikan hubungan antara kondisi sambungan rel dengan tingkat kenyamanan penumpang, pengaruhnya terhadap faktor keselamatan operasional kereta api serta potensi risiko teknis yang ditimbulkan. Tahap akhir berupa penyusunan rekomendasi teknis yang dapat diterapkan untuk meningkatkan kualitas sambungan rel. Penelitian ditutup dengan penarikan kesimpulan dan penyusunan saran sebagai masukan bagi pengelola infrastruktur perkeretaapian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengolahan data dalam penelitian ini bertujuan untuk memperoleh gambaran menyeluruh mengenai kondisi sambungan rel, beban lintas, gangguan operasional, serta persepsi penumpang terhadap kenyamanan dan keselamatan perjalanan kereta api.

Data Gangguan Sambungan Rel. Berdasarkan data sekunder dari laporan teknis dan Gapeka lintas Tanjung Karang–Rejosari, teridentifikasi 20 titik gangguan operasional yang berkaitan dengan sambungan rel. Jenis gangguan meliputi las-las an keropos, rel putus pada sambungan maupun wesel, serta lendutan (genjotan) pada plat sambung baik di jalur utama maupun area wesel. Jenis gangguan dominan adalah lendutan pada plat sambung dengan total 12 kasus (60% dari total gangguan), terdiri dari 6 titik pada jalur utama dan 6 titik pada area wesel. Gangguan berat yang berpotensi mengancam keselamatan ditemukan sebanyak 4 titik, meliputi rel putus pada sambungan, rel putus pada wesel, dan las-las an keropos. Jika diklasifikasikan berdasarkan tingkat keparahan:

1. Ringan : 8 titik, umumnya berupa lendutan ringan pada plat sambung.
2. Sedang : 8 titik, mencakup lendutan di area wesel, plat sambung turun, atau las korosi.

3. Berat : berupa rel putus pada sambungan/wesel dan las keropos.

Area wesel muncul sebagai lokasi rawan, dengan 6 gangguan teridentifikasi. Mengingat wesel merupakan komponen vital peralihan jalur, kerusakan di area ini dapat menimbulkan hentakan besar dan menurunkan stabilitas lintasan. Secara umum, mayoritas gangguan tergolong ringan hingga sedang, namun keberadaan gangguan berat menegaskan perlunya pemeliharaan preventif dan inspeksi rutin. Upaya korektif terutama harus difokuskan pada sambungan dengan indikasi retak, keropos, dan deformasi untuk menjamin keselamatan dan kenyamanan operasi, sejalan dengan amanat UU No. 23 Tahun 2007 tentang Perkeretaapian

Data Beban Lintas berdasarkan data tonase lintas digunakan untuk mengetahui jumlah total beban (muatan) kereta api yang melintasi suatu jalur dalam periode satu tahun. Informasi ini dimanfaatkan sebagai acuan dalam mengevaluasi kapasitas daya angkut jalur, terutama dalam kaitannya dengan identifikasi potensi risiko atau bahaya yang dapat timbul akibat penerapan Grafik Perjalanan Kereta Api (GAPEKA). Secara umum, daya angkut lintas menggambarkan kemampuan jalur rel untuk melayani angkutan kereta api berdasarkan total berat muatan yang melewati jalur tersebut dalam satu tahun. Evaluasi ini penting dilakukan untuk memastikan bahwa frekuensi perjalanan dan beban muatan tidak melebihi batas aman operasional, serta untuk mendukung keselamatan dan kelancaran operasional kereta api.

Tabel 1. Beban Lintas Harian KA

	Tonnage Kereta/Gerbong (Ton)	Tonnage Lokomotif (Ton)	Tonnage Total (Ton)
Beban Lintas Harian Kereta Api Penumpang (Ton/Hari)	1.338	504	1.842
Beban Lintas Harian Kereta Api Barang (Ton/Hari)	152.476	12.069	164.545

a. Perhitungan Tonnage Equivalen (TE)

Perhitungan ini bertujuan untuk menentukan jumlah total beban yang dihasilkan oleh lokomotif dan kereta barang yang melintas setiap hari pada petak jalur rel Tanjung Karang - Rejosari

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

Diketahui:

TE = Tonase ekuivalen (ton/hari).

T_p = Tonase penumpang dan kereta harian.

T_b = Tonase barang dan gerbong harian.

K_b = Koefisien yang beratnya pada beban gandar:

1,5 untuk beban gandar < 18 ton.

1,3 untuk beban gandar > 18 ton.

K₁ = Koefisien yang besarnya 1,4.

T₁ = Tonase Lokomotif harian.

Jawab :

$$T_p = 1.338 \text{ ton}$$

$$K_b = 1,5$$

$$T_b = 152.476 \text{ ton}$$

$$K_1 = 1,4$$

$$T_1 = 12.573 \text{ ton}$$

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

$$TE = 1.338 + (1,5 \times 152.476 \text{ ton})$$

$$+ (1,4 \times 12.576 \text{ ton})$$

$$TE = 247.654 \text{ ton}$$

b. Perhitungan Daya Angkut Lintas

Perhitungan *passing tonnage* dilakukan untuk mengetahui total akumulasi berat seluruh sarana kereta api, baik lokomotif maupun rangkaiannya yang melintasi petak jalan rel Tanjung Karang – Rejosari selama periode satu tahun. Nilai ini mencerminkan kapasitas aktual jalur dalam menampung lalu lintas angkutan kereta api, serta menjadi salah satu indikator penting dalam mengevaluasi ketahanan infrastruktur rel terhadap beban operasional yang terjadi secara berkelanjutan.

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

Diketahui :

T = Daya angkut lintas (ton/tahun)

S = Koefisien yang besarnya tergantung kualitas lintas:

- 1,1 untuk lintas kereta penumpang berkecepatan maksimum 120 km/jam dan
- 1,0 untuk lintas tanpa kereta penumpang.

TE = Tonase Ekuivalen (ton/hari).

Jawab :

$$S = 1,1$$

$$TE = 247.658 \text{ ton}$$

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

$$T = 360 \times 1,1 \times 247.658 \text{ ton}$$

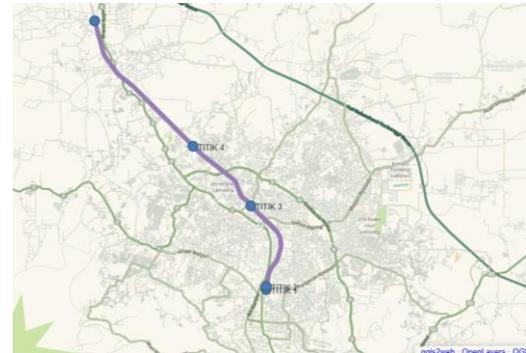
$$T = 98.070.952 \text{ ton/tahun}$$

Hasil perhitungan menunjukkan nilai passing tonnage lintas Tanjung Karang–Rejosari mencapai 98,07 juta ton per tahun, jauh melampaui standar jalan rel kelas I menurut PM No. 60 Tahun 2012 yang mensyaratkan >20 juta ton/tahun. Meskipun memenuhi standar, tingginya volume angkutan menimbulkan tekanan signifikan pada infrastruktur rel. Beban berulang berpotensi memicu kerusakan seperti patah rel, keausan, mud pumping, dan degradasi struktur jalan rel lainnya. Oleh karena itu, keseimbangan antara intensitas operasi dengan frekuensi pemeliharaan menjadi krusial. Inspeksi dan perawatan rutin diperlukan untuk menjamin keselamatan, keandalan, serta kenyamanan layanan kereta api penumpang maupun barang di lintas tersebut. Meskipun memenuhi standar, tingginya volume angkutan menimbulkan tekanan signifikan pada infrastruktur rel. Beban berulang berpotensi memicu kerusakan seperti patah rel, keausan, mud pumping, dan degradasi struktur jalan rel lainnya. Oleh karena itu, keseimbangan antara intensitas operasi dengan frekuensi pemeliharaan menjadi krusial. Inspeksi dan perawatan rutin diperlukan untuk menjamin keselamatan, keandalan, serta kenyamanan layanan kereta api penumpang maupun barang di lintas tersebut.

Analisis Hubungan Kecepatan dengan Kondisi Sambungan

Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan operasi (>70 km/jam) berdampak langsung pada peningkatan gaya dinamis yang ditransmisikan ke sambungan rel. Kondisi ini memicu gangguan seperti getaran tinggi, hentakan suara, dan gangguan suspensi. Observasi lapangan mengungkap adanya celah sambungan yang melebar serta retakan mikro pada lokasi berkecepatan tinggi, menandakan percepatan kerusakan akibat beban dinamis berulang. Pendekatan deskriptif komparatif memperlihatkan bahwa sambungan pada segmen berkecepatan tinggi lebih rentan terhadap kerusakan dibandingkan segmen berkecepatan

rendah. Temuan ini menjadi dasar penting untuk penentuan batas kecepatan serta prioritas perawatan sambungan rel di lintas Tanjung Karang–Rejosari.



Gambar 4. Peta Lokasi Titik Ketidakrataan Jalur Rel berdasarkan Nilai IRI

Temuan bahwa peningkatan kecepatan berbanding lurus dengan nilai TQI yang lebih tinggi dan kondisi sambungan yang lebih buruk. Oleh karena itu, TQI dapat dijadikan dasar tambahan untuk menentukan penyesuaian kecepatan operasional dan prioritas perawatan sambungan dapat dilihat pada tabel dibawah ini.

Tabel 2. Total Nilai TQI

Lin tas	KM	PER T	AN GK T.	LE ST R	LB. SP	Total TQI	Kat. TQI	V GAPEKA
TJ	12+23	11,95	19,	8,4	3,86	43,88	3	$60 \leq V < 80$
K -	0 -		65	0				
RJ	28+55							
S	4							

Jika ditinjau dari akumulasi nilai TQI pada beberapa segmen kritis, didapatkan total nilai TQI sebesar 43,88 yang berada dalam kategori 3 atau kualitas sedang mendekati buruk. Hal ini mengindikasikan bahwa secara umum, kualitas lintasan di lintas Tanjung Karang – Rejosari masih memerlukan perhatian khusus, terutama dalam segmen-segmen berkecepatan tinggi. Hasil analisis menunjukkan bahwa sebagian besar lintasan Tanjung Karang–Rejosari berada pada kategori kualitas sedang hingga buruk (TQI kategori 3–4), terutama pada segmen dengan geometri jalur yang tidak memenuhi standar kenyamanan. Pemantauan dengan aplikasi IRI RoadBump juga mengidentifikasi empat titik kritis dengan nilai >5 m/km, yang sering menimbulkan hentakan dan getaran saat dilalui kereta. Kondisi ini dipicu oleh sambungan aus, geometri rel tidak rata, serta degradasi las

thermit. Respons penumpang turut mengonfirmasi adanya ketidaknyamanan pada titik-titik tersebut. Integrasi data TQI, IRI, dan observasi lapangan menegaskan perlunya perbaikan sambungan rel dan evaluasi kecepatan operasi, sekaligus menjadikan IRI RoadBump sebagai alat bantu penting dalam penentuan prioritas perbaikan.

Analisis Keselamatan dan Kenyamanan dengan metode AHP.

Sebanyak 70 responden KA Kuala Stabas diminta menilai tiga aspek utama kenyamanan: guncangan, hentakan, dan perlambatan. Penilaian dilakukan menggunakan skala fundamental AHP (1–5), yang menggambarkan tingkat dominasi satu kriteria terhadap kriteria lain. Setiap aspek dinilai melalui dua indikator, yaitu:

1. Terasa → seberapa sering gangguan dirasakan.
2. Mengganggu → seberapa besar dampak gangguan menimbulkan ketidaknyamanan.

a. Hasil Persepsi Responden

- Dari kuesioner, diperoleh rata-rata skor:
- Guncangan terasa = 4,07 dan mengganggu = 3,60
- Hentakan terasa = 3,83 dan mengganggu = 3,86
- Perlambatan terasa = 3,31 dan mengganggu = 3,46

Rata-rata gabungan dihitung:

- Guncangan = $(4,07 + 3,60)/2 = 3,84$
- Hentakan = $(3,83 + 3,86)/2 = 3,84$
- Perlambatan = $(3,31 + 3,46)/2 = 3,39$

Nilai ini menunjukkan bahwa secara umum penumpang lebih banyak merasakan guncangan dan hentakan, sedangkan perlambatan relatif kurang dominan.

b. Matriks Perbandingan Berpasangan

Untuk menentukan prioritas antar kriteria, nilai rata-rata dibandingkan secara berpasangan:

- Guncangan vs Perlambatan = $3,84 / 3,39 = 1,13$
- Guncangan vs Hentakan = $3,84 / 3,84 = 0,998$
- Hentakan vs Perlambatan = $3,84 / 3,39 = 1,14$

Tabel 3. Matriks Perbandingan Berpasangan

Kriteria	Guncangan	Hentakan	Perlambatan
Guncangan	1	0,998	1,133
Hentakan	1,002	1	1,135
Perlambatan	0,883	0,881	1

c. Normalisasi Matriks

Langkah berikutnya adalah normalisasi, yaitu setiap elemen dibagi dengan jumlah kolom

masing-masing. Dari proses ini, diperoleh bobot prioritas:

- Hentakan = 0,3474
- Guncangan = 0,3466
- Perlambatan = 0,3060

Hasil menunjukkan bahwa hentakan memiliki bobot tertinggi, diikuti guncangan, sedangkan perlambatan paling rendah.

d. Uji Konsistensi

Untuk memastikan konsistensi penilaian responden, dihitung nilai *Consistency Ratio* (CR):

λ maks = 3,005

$CI = (\lambda \text{ maks} - n) / (n - 1) = (3,005 - 3) / 2 = 0,0025$

$CR = CI / RI = 0,0025 / 0,58 = 0,0043$

Karena $CR < 0,1$, maka penilaian responden dinyatakan konsisten dan valid.

e. Interpretasi Hasil

Berdasarkan hasil AHP, faktor kenyamanan yang paling dominan adalah:

- Hentakan (0,3474) → paling berpengaruh terhadap ketidaknyamanan penumpang.
- Guncangan (0,3466) → berada di peringkat kedua dan juga signifikan.
- Perlambatan (0,3060) → paling rendah, tetapi tetap relevan.

Meskipun perbedaan bobot antar kriteria relatif kecil, hasil ini menunjukkan bahwa perbaikan teknis harus difokuskan pada pengurangan hentakan dan guncangan.

Analisis Mode Kegagalan Sambungan Rel dengan Metode FMECA.

Analisis mode kegagalan sambungan rel pada lintas Tanjung Karang–Rejosari dilakukan dengan metode Failure Mode, Effects, and Criticality Analysis (FMECA) untuk mengidentifikasi jenis kegagalan, penyebab, dampak, serta tingkat kritikalitasnya terhadap operasi kereta api. Tiga parameter utama yang digunakan adalah *Severity* (S), *Occurrence* (O), dan *Detection* (D), yang selanjutnya dikombinasikan untuk memperoleh nilai *Risk Priority Number* (RPN) melalui rumus:

$RPN = S \times O \times D$

a. Sambungan Plat (fishplate)

Pada sambungan plat, lima mode kegagalan utama teridentifikasi, yaitu baut longgar, penurunan nilai torsi, jumlah baut tidak memadai, kelelahan material, dan retak/patah

plat sambung. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa penurunan nilai torsi merupakan kegagalan paling kritis dengan RPN = 270, diikuti kelelahan material (RPN = 144) serta retak/patah plat sambung (RPN = 108). Hal ini terjadi karena ketidaksesuaian torsi akibat peralatan pengencang yang tidak terkalibrasi, sehingga gaya jepit antar komponen tidak optimal. Kondisi ini berpotensi memicu pelonggaran hingga pelepasan sambungan, yang berdampak serius pada keselamatan. Di sisi lain, kegagalan seperti baut longgar (RPN = 70) dan jumlah baut tidak sesuai (RPN = 80) meskipun nilainya lebih rendah, tetap berkontribusi terhadap gangguan kenyamanan berupa suara hentakan dan getaran

b. Sambungan Las Thermit

Pada sambungan las thermit lima mode kegagalan yang diidentifikasi meliputi retak sambungan, pelepasan las, patah akibat suhu, korosi, dan getaran berlebih. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa korosi sambungan memiliki nilai RPN tertinggi = 378, menjadikannya kegagalan paling kritis. Korosi yang terjadi secara progresif akibat paparan kelembapan dan oksidasi dapat melemahkan struktur hingga memicu patah total. Selain itu, retak sambungan las (RPN = 250) juga signifikan, umumnya disebabkan oleh kelelahan termal akibat fluktuasi suhu berulang. Sementara itu, getaran berlebih (RPN = 168) lebih berdampak pada kenyamanan penumpang tetapi dalam jangka panjang juga mempercepat degradasi sambungan.

c. Penguatan Analisis dengan WRPN

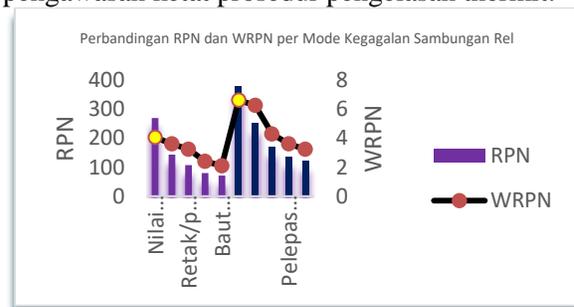
Meskipun metode RPN efektif, kelemahannya adalah memberikan bobot sama pada semua parameter. Oleh karena itu, digunakan pendekatan Weighted Risk Priority Number (WRPN) dengan bobot: Severity = 0,5; Occurrence = 0,3; Detection = 0,2. Rumus perhitungan adalah:

$$WRPN=(S \times ws) \times (O \times wo) \times (D \times wd)$$

Hasil perhitungan WRPN menunjukkan prioritas yang lebih realistis. Pada sambungan plat, nilai torsi menurun tetap menjadi yang paling kritis (WRPN = 4,05), sedangkan pada sambungan las thermit, korosi sambungan (WRPN = 6,615) dan retak sambungan (WRPN = 6,25) menjadi kegagalan paling berbahaya. Pergeseran prioritas ini menegaskan bahwa severity lebih dominan dalam memengaruhi keselamatan dibanding

parameter lainnya. Misalnya, meskipun baut longgar sering terjadi, dampaknya tidak seberat korosi yang secara perlahan tetapi pasti menggerus kekuatan struktur.

Dengan demikian, hasil analisis menunjukkan bahwa sambungan plat lebih rentan terhadap masalah mekanis seperti torsi baut dan kelelahan material, sedangkan sambungan las thermit menghadapi risiko jangka panjang dari faktor lingkungan dan retakan termal. Interpretasi ini menegaskan perlunya strategi mitigasi berbeda untuk masing-masing jenis sambungan. Pada sambungan plat, fokus utama adalah kalibrasi alat pengencang dan inspeksi torsi secara rutin, sedangkan pada sambungan las thermit perlu diterapkan pelapisan anti-korosi, inspeksi nondestruktif untuk retakan mikro, serta pengawasan ketat prosedur pengelasan thermit.



Gambar 5. Grafik Perbandingan RPN dan WRPN

Secara keseluruhan, integrasi metode FMECA dan WRPN memberikan gambaran risiko yang lebih proporsional. Pendekatan ini membantu teknisi lapangan dan pengelola infrastruktur memfokuskan sumber daya pada mode kegagalan yang paling kritis terhadap keselamatan perjalanan kereta api, sehingga dapat meningkatkan keselamatan dan kenyamanan operasi kereta api.

Rekomendasi.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa kondisi sambungan rel berperan penting dalam menentukan keselamatan, kenyamanan, dan kualitas operasional perjalanan kereta api. Tiga pendekatan analisis digunakan, yaitu hubungan kecepatan dengan kondisi sambungan, persepsi kenyamanan penumpang menggunakan AHP, serta evaluasi risiko kegagalan melalui FMECA dan WRPN. Ketiganya menghasilkan temuan yang konsisten bahwa sambungan las thermit

memiliki keterbatasan teknis dan risiko kegagalan tinggi, sehingga perlu dipertimbangkan penggantian dengan metode flash butt welding (FBW).

Pertama, analisis TQI dan IRI RoadBump menunjukkan bahwa beberapa segmen sambungan las thermit di lintas Tanjung Karang–Rejosari memiliki kualitas geometri buruk (kategori 3–4) dan nilai IRI di atas ambang kenyamanan (>5 m/km). Kondisi ini berkorelasi dengan meningkatnya hentakan, getaran, serta perlambatan mendadak pada kecepatan >70 km/jam. Temuan ini menegaskan bahwa kualitas sambungan rel secara langsung menurunkan kenyamanan dan membatasi kecepatan operasional.

Kedua, hasil AHP berbasis kuesioner dari 70 penumpang menunjukkan bahwa hentakan dan guncangan akibat sambungan menjadi faktor dominan penurunan kenyamanan, dengan bobot prioritas lebih tinggi dibanding perlambatan. Hal ini mengindikasikan bahwa ketidakrataan sambungan tidak hanya memengaruhi aspek teknis jalur, tetapi juga membentuk persepsi negatif penumpang terhadap kualitas layanan perjalanan.

Ketiga, analisis risiko dengan FMECA dan WRPN mengidentifikasi sambungan las thermit sebagai komponen paling rentan. Nilai RPN tertinggi ditemukan pada mode kegagalan korosi (378) dan retak sambungan (250), yang kemudian dikonfirmasi melalui WRPN dengan skor 6,615 dan 6,25. Kedua mode ini memiliki dampak serius terhadap keselamatan, berbeda dengan sambungan plat yang umumnya lebih berdampak pada kenyamanan. Artinya, dari sisi risiko jangka panjang, sambungan thermit menjadi titik lemah yang perlu mendapat perhatian utama.

Berdasarkan hasil tersebut, direkomendasikan untuk mengganti metode thermit welding dengan flash butt welding (FBW). FBW dinilai lebih unggul secara teknis: menghasilkan sambungan homogen, minim cacat, waktu pengerjaan lebih singkat, serta memiliki ketahanan aus dan korosi yang lebih baik. Penelitian terdahulu juga mendukung hal ini. Dewi dkk. (2021) menunjukkan bahwa FBW memiliki umur sambungan lebih panjang dan kualitas geometrik lebih presisi, sementara Yuliani dkk. (2022) melaporkan bahwa

implementasi FBW mampu menurunkan biaya perawatan hingga 37% dan mengurangi gangguan sambungan 42% dalam dua tahun.

Dari sisi operasional, lintas Tanjung Karang–Rejosari sebagai koridor utama angkutan penumpang dan barang sangat membutuhkan sambungan yang lebih stabil dan tahan lama. Infrastruktur yang ada memungkinkan penerapan FBW secara bertahap, dengan dukungan stasiun besar seperti Kertapati, Prabumulih, dan Tanjung Karang sebagai basis logistik dan pelatihan teknis.

Tabel 3. Ringkas Rekomendasi Kuantitatif

Parameter Teknis	<i>Thermit Welding</i>	<i>Flash Butt Welding (FBW)</i>
Proses	Reaksi kimia eksotermik (besi cair)	Pengelasan resistansi listrik & tekanan
Suhu Operasi	±2500°C (tidak terkendali)	±1400°C (terkontrol & stabil)
Waktu Pengerjaan	45–60 menit per sambungan	5–10 menit per sambungan
Kekuatan Sambungan	Variatif, banyak inklusi & porositas	Homogen, kuat, minim cacat
Cacat Umum	Retak, porositas, oksida, korosi dini	<i>Cold spot</i> (jika parameter salah)
Konsistensi Dimensi Geometrik	Kurang presisi, manual	Tinggi, otomatis terkendali
Keausan Sambungan	Lebih cepat (porositas)	Lebih lambat (struktur homogen)
Potensi Korosi	Tinggi (terbuka udara)	Rendah (minim inklusi & oksida)
Investasi Awal Alat	Rendah (peralatan sederhana)	Tinggi (mesin otomatis & presisi)
Efisiensi Jangka Panjang	Rendah (banyak perawatan ulang)	Tinggi (tahan lama & minim perawatan)

KESIMPULAN

Dari hasil analisis penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil observasi lapangan dan analisis data teknis, diketahui bahwa metode

sambungan rel yang digunakan pada lintas Stasiun Tanjung Karang – Rejosari terdiri dari sambungan las thermit dan sambungan mekanis dengan plat sambung. Sambungan las thermit memiliki keunggulan dalam menciptakan lintasan yang lebih mulus, namun menunjukkan kelemahan berupa keropos internal dan korosi jika pelaksanaan tidak sesuai standar teknis dan jenis gangguan lainnya. Sementara itu, sambungan dengan plat sambung rentan terhadap lendutan dan kelonggaran mur serta baut, terutama pada area wesel yang memiliki intensitas beban lateral tinggi.

2. Kondisi fisik dan teknis sambungan rel menunjukkan adanya berbagai jenis gangguan nyata seperti sambungan longgar, ausnya plat sambung, las thermit retak, serta tidak sejajarnya permukaan rel pada titik sambungan. Gangguan ini teridentifikasi melalui inspeksi visual di lapangan serta pengukuran kualitas geometri lintasan menggunakan Track Quality Index (TQI) dan aplikasi IRI Roadbump. Hasil pengukuran menunjukkan bahwa rata-rata nilai TQI sebesar 43,88 termasuk dalam kategori sedang menuju buruk, dengan beberapa titik menunjukkan lonjakan nilai IRI yang mengindikasikan ketidak teraturan vertikal di sambungan rel dan berpotensi mengganggu kenyamanan perjalanan.
3. Hasil pengolahan data survei dengan metode AHP menunjukkan bahwa kenyamanan penumpang sangat dipengaruhi oleh kondisi geometri sambungan rel, terutama pada sambungan yang tidak presisi. Sambungan dengan nilai TQI dan IRI tinggi cenderung menimbulkan hentakan dan ketidak teraturan laju kereta yang lebih terasa, sehingga mengurangi kenyamanan perjalanan.
4. Dari hasil analisis risiko menggunakan metode FMECA, ditemukan bahwa kondisi sambungan rel yang buruk dapat menjadi salah satu faktor risiko terhadap aspek keselamatan perjalanan kereta api, seperti potensi kerusakan komponen suspensi, keausan roda, dan bahkan risiko anjlokkan. Mode kegagalan dengan nilai WRPN tinggi mengindikasikan perlunya intervensi segera.
5. Berdasarkan hasil analisis, direkomendasikan penerapan metode *flash butt welding* (FBW)

sebagai alternatif pengganti las thermit untuk menghasilkan sambungan yang lebih presisi dan tahan lama. Selain itu, perlu dilakukan inspeksi rutin dan perawatan preventif pada sambungan yang memiliki nilai TQI dan IRI tinggi, guna mencegah penurunan kenyamanan dan potensi risiko keselamatan. Upaya ini diharapkan dapat meningkatkan kualitas lintasan secara menyeluruh serta mendukung kenyamanan dan keselamatan perjalanan kereta api penumpang

DAFTAR PUSTAKA

- A. Ihlas, “Analisis Kerusakan Rel Kereta Api Angkutan Batubara,” *J. Teknol. Bahan dan Barang Tek.*, vol. 7, no. 1, p. 7, 2017, doi: 10.37209/jtbtt.v7i1.89.
- A. Rahman, A., & Fahma, F. (2021). Penggunaan metode FMECA (failure modes effects criticality analysis) dalam identifikasi titik kritis di industri kemasan. *Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 31(1), 110-119.
- D. Candra Purnama, “Pengantar Sistem Perawatan Jalan Rel Dan Jembatan,” *Kereta Api Indones.*, pp. 2588–2593, 2017.
- D. M. Sumarta, “Penerapan Metode Failure Mode, Effect and Criticality Analysis (Fmeca) Pada Drive Station Alat Angkut Konveyor Rel,” *Infomatek*, vol. 19, no. 01, p. 17, 2017, doi: 10.23969/infomatek.v19i01.544.
- Kurnia, R., & Nugraha, M. I. (2021). “Validasi Nilai Ketidakteraturan Jalan Menggunakan Aplikasi Android Road Bump Pro. Potensi”, 23(2), 102–111.
- O. K. Y. Fernando, P. “Studi, T. Perkeretaapian, F. Teknologi, and I. Dan, Analisis kegagalan rel kereta api babaranjang pada titik sambungan las termi”. 2024.
- S. Atmaja, “Transportasi Jalan Kereta Api Sebuah Tinjauan Umum,” 2016.
- Sugiyono. (2013). Metode Penelitian Pendidikan Pendekatan Kuantitatif, Kualitatif dan R & D. Bandung: Alfabeta.
- V. Sushera, “Jalan Kabupaten Karanganyar Metode Analytical Hierarchy Process (AHP),” p. 133, 2018.