

Analisis Tingkat Risiko Penyebab Rel Patah pada Jalur Kereta Api Wilayah Divre IV Tanjung Karang

Viola Nur Anggita Putri^{1*}, Kristianto Usman¹, Ika Kustiani¹, dan Amril Ma'ruf Siregar¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Bandar Lampung, 35141 Indonesia

*penulis koresponden: violanuranggitaputri@gmail.com

Abstract: Peningkatan volume penumpang dan barang pada angkutan kereta api di Indonesia berdampak pada kondisi perkeretaapian khususnya infrastruktur perkeretaapian. Fokus utama dari kondisi ini adalah risiko kerusakan rel, khususnya rel patah. Sehingga diperlukan pendekatan pengkajian yang holistik untuk mengidentifikasi akar permasalahan dan merumuskan strategi penanganan dan perbaikan yang tepat. Tujuan penelitian adalah untuk mengidentifikasi faktor-faktor penyebab kereta api patah dan menganalisis tingkat risiko kerusakan. Penelitian ini menggunakan metode analisis nilai tingkat risiko dengan mengalikan hasil probabilitas dan dampak pada data survei kuesioner yang diperoleh dari kantor PT. KAI Divre IV Tanjung Karang untuk menghasilkan nilai risiko. Variabel risiko seperti kejadian curah hujan ekstrim, perluasan area alinyemen, dan pemompaan lumpur merupakan risiko tingkat tinggi. Disusul risiko sedang, rendah, dan sangat rendah, sesuai dengan klasifikasi masing-masing variabel risiko yang dianalisis. Oleh karena itu, skala prioritas penanganan perbaikan rel rusak dikelompokkan berdasarkan nilai tingkat risiko mulai dari risiko tertinggi hingga risiko terendah. Kesimpulannya variabel risiko seperti hujan ekstrim menghasilkan nilai risiko sebesar Rp296,881,200 dengan nilai probabilitas sebesar 0.99% dan dampak sebesar Rp29,988,000,000, perluasan pada bidang lurus menghasilkan nilai risiko sebesar Rp376,992,000 dengan nilai probabilitas sebesar 1.10%. dan dampak sebesar Rp34,272,000,000, dan pemompaan lumpur menghasilkan nilai risiko sebesar Rp394,128,000 dengan nilai probabilitas sebesar 1.15% dan dampak sebesar Rp34,272,000,000, ketiga variabel risiko tersebut tergolong berisiko tinggi.

Diterima: 07 Juli 2024
Diperbaiki: 21 September 2024
Disetujui: 10 Oktober 2024

Kata Kunci: Dampak, Kereta Api, Perluasan, Infrastruktur, Survei

1. Pendahuluan

Kereta api merupakan salah satu moda transportasi penting di Indonesia [1–3]. Dengan semakin meningkatnya volume penumpang dan barang yang diangkut oleh kereta api, frekuensi perjalanan kereta api pun turut mengalami peningkatan [4,5]. Peningkatan ini memicu kekhawatiran terhadap kondisi prasarana kereta api, terutama rel kereta api yang merupakan komponen vital dalam operasional kereta api. Jika rel tidak dirawat dengan baik, berbagai jenis kerusakan bisa terjadi, termasuk kerusakan serius seperti patahnya rel [6–8]. Kondisi rel yang tidak optimal tidak hanya berpotensi mengganggu jadwal perjalanan kereta api, tetapi juga dapat menimbulkan risiko keselamatan bagi penumpang dan awak kereta api. Oleh karena itu, pemeliharaan rutin dan inspeksi berkala terhadap rel kereta api sangatlah penting untuk memastikan keamanan dan kelancaran operasional kereta api di Indonesia.

Patahnya rel dapat mengakibatkan berbagai dampak negatif yang signifikan, termasuk gangguan lalu lintas kereta api yang dapat menyebabkan keterlambatan dan ketidaknyamanan bagi penumpang, kerugian finansial yang timbul dari biaya perbaikan dan hilangnya pendapatan, serta potensi bahaya serius terhadap keselamatan penumpang dan awak kereta api [9,10]. Untuk mengatasi

permasalahan ini, diperlukan kajian penanganan rel patah yang holistik dan terintegrasi, yang mencakup semua aspek yang relevan. Kajian ini dapat dilakukan dengan menggunakan pendekatan analisis nilai tingkat risiko, yang berfungsi untuk mengidentifikasi dan memahami penyebab utama dari terjadinya rel patah. Dengan analisis ini, langkah-langkah preventif yang tepat dapat dirancang dan diimplementasikan, sehingga dapat meminimalisir risiko kerusakan rel di masa depan dan memastikan operasi kereta api tetap aman dan efisien.

Studi literatur dilakukan untuk memperoleh pemahaman yang mendalam mengenai dasar teori dari referensi – referensi serta penelitian sebelumnya yang relevan dengan data yang akan digunakan dalam tugas akhir ini. Dari literatur penelitian terdahulu, jurnal – jurnal lain, serta e-book, diperoleh hasil identifikasi risiko penyebab rel patah sehingga menghasilkan metode Fault Tree Analysis (FTA) dan Life Cycle Cost (LCC) dalam pengelolaan infrastruktur perkeretaapian. Penelitian ini menekankan pentingnya integrasi FTA dan LCC untuk meningkatkan efisiensi sistem perkeretaapian dari perencanaan hingga pemeliharaan.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengidentifikasi tingkat resiko dan kerugian yang dihasilkan dari kejadian kerusakan rel khususnya rel patah. Sehingga diharapkan bahwa hasil dari penelitian ini dapat memberikan manfaat yang signifikan dalam meningkatkan perencanaan dan perawatan infrastruktur rel kereta api, sehingga dapat mencegah terjadinya kerusakan serupa di masa depan. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat menjadi referensi yang berguna bagi penelitian-penelitian selanjutnya, memberikan wawasan dan data empiris yang dapat digunakan untuk pengembangan lebih lanjut dalam bidang keselamatan dan pemeliharaan prasarana kereta api. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada peningkatan keamanan dan efisiensi operasional kereta api, tetapi juga pada pengembangan ilmu pengetahuan di bidang transportasi rel.

2. Metode Penelitian

Penelitian ini dilakukan di beberapa titik pada jalur yang termasuk dalam wilayah kerja dari PT. KAI Divre IV Tanjung Karang. Titik – titik terjadinya rel patah tersebut diantaranya terdapat pada km 140+050 jalur hilir petak Tulungbuyut-Negeriagung, km 185+085 jalur petak jalan Waytuba-Waypisang, dan km 233+075 jalur hilir Baturaja-Tigagajah. Penelitian ini dilaksanakan melalui beberapa tahapan yang sistematis. Tahap awal dimulai dengan kajian pustaka untuk mencari dan memahami dasar teori yang relevan dengan topik penelitian. Langkah selanjutnya adalah pengumpulan data.

2.1. Pengambilan data

Pengambilan data meliputi data sekunder dan data primer. Data primer diperoleh langsung dari lapangan melalui metode survey lokasi berupa pengamatan kerusakan rel dan pemberian kuisisioner yang ditujukan untuk 5 narasumber yang dipandang relevan dengan permasalahan yang diidentifikasi kepada pihak terkait yakni pihak PT. KAI DIVRE IV Tanjung Karang khususnya Unit Jalan dan Jembatan untuk memperoleh informasi tentang probabilitas dan dampak terjadinya rel patah. Data sekunder dikumpulkan juga dari pihak PT. KAI DIVRE IV Tanjung Karang, diantaranya adalah gambar rel patah, penyebab rel patah, biaya kerugian yang dikeluarkan, serta penanganan yang dilakukan.

2.2. Pengolahan Data

Setelah pengambilan data, langkah berikutnya adalah menghitung nilai probabilitas dan dampak dari hasil kuisisioner. Perhitungan probabilitas dan dampak mengikuti acuan tabel pada *Australian Standard/New Zealand Standard for Risk Management (AS/NZS 4360:2004)* [11–13]. Berikut telah disajikan **Tabel 1** tentang nilai tingkat kemungkinan (*probability*) dan **Tabel 2** tentang nilai tingkat keparahan dampak (*impact*) bersumber dari *Risk management Standard AS/NZS 4360:2004*.

Tabel 1. Nilai Tingkat Kemungkinan (*Probability*)

Tingkat	Deskripsi	Keterangan
5	Hampir pasti	Pasti terjadi, terjadi lebih dari 12 kali dalam 1 tahun
4	Mungkin	Sering terjadi, terjadi 9-12 kali dalam 1 tahun
3	Mungkin	Biasa terjadi, terjadi 5-8 kali dalam 1 tahun
2	Berbeda dengan	Mungkin terjadi, terjadi 1-4 kali dalam 1 tahun
1	Langka	Terjadi 1 kali dalam masa lebih dari 1 tahun

Tabel 2. Nilai Tingkat Keparahan Dampak (*Impact*)

Tingkat	Deskripsi	Dampak
1	Tidak Signifikan	Tidak terjadi cedera, kerugian finansial kecil
2	Minor	Cedera ringan, kerugian finansial sedang
3	Moderator	Cedera sedang, perlu penanganan, kerugian finansial besar
4	Mayor	Cedera berat, kerugian besar, gangguan produksi
5	Ekstrim	Fatal, kerugian sangat besar dan dampak sangat luas yang berdampak panjang, terhentinya seluruh kegiatan

Setelah mengetahui nilai dari skala indeks tersebut, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai dari *risk score* menggunakan **Persamaan 1**.

$$R = P \times I \quad (1)$$

Keterangan:

R = Tingkat risiko (*Risk level*)

P = Kemungkinan risiko yang terjadi (*Probability*)

I = Tingkat dampak risiko yang terjadi (*Impact*)

Data yang telah diperoleh dari perhitungan dan analisis maka dibuat dalam bentuk tabel penilaian tingkat risiko untuk didapatkan hasil peringkat risiko sesuai dengan matriks kemungkinan dan dampak pada **Tabel 3** bersumber dari *Risk management Standard AS/NZS 4360:2004* berikut ini.

Tabel 3. Matriks Kemungkinan dan Dampak

Kemungkinan (<i>Probability</i>)	Dampak (<i>Impact</i>)				
	1	2	3	4	5
5	Sangat Rendah	Rendah	Menengah	Tinggi	Sangat Tinggi
4	Sangat Rendah	Rendah	Menengah	Menengah	Tinggi
3	Sangat Rendah	Rendah	Rendah	Menengah	Menengah
2	Sangat Rendah	Sangat Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
1	Sangat Rendah	Sangat Rendah	Sangat Rendah	Sangat Rendah	Sangat Rendah

Dalam proses pengumpulan data, data primer yang diperoleh langsung dari lapangan memberikan wawasan yang akurat dan terkini mengenai kondisi nyata di lapangan. Misalnya, survei lokasi memberikan gambaran detail mengenai kondisi fisik rel kereta, sedangkan penyebaran kuisisioner kepada

pihak PT. KAI DIVRE IV Tanjung Karang memberikan informasi mendalam mengenai aspek operasional dan finansial dari jalur kereta api. Sementara itu, data sekunder berupa data gambar rel patah di beberapa titik pada jalur wilayah Divre IV Tanjung Karang, data analisis harga satuan pekerjaan, data harga satuan upah dan bahan pada setiap kota yang terdapat titik terjadinya rel patah, penyebab, dampak, dan biaya pengeluaran untuk penanganan rel patah yang diperoleh dari instansi terkait memberikan konteks tambahan yang diperlukan untuk analisis yang komprehensif. Dengan pendekatan yang terstruktur dan terintegrasi ini, penelitian diharapkan dapat memberikan hasil yang valid dan berguna untuk meningkatkan perencanaan dan penanganan permasalahan dalam infrastruktur rel kereta api.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan di beberapa titik lokasi sepanjang jalur wilayah kerja PT. KAI Divre IV Tanjung Karang seperti pada **Gambar 1**. Berdasarkan data sekunder yang diperoleh dari pihak PT. KAI Divre IV Tanjung Karang, beberapa titik lokasi yang menjadi titik terjadinya rel patah dengan frekuensi yang tergolong sering, diantaranya adalah km 140+050 pada jalur hilir petak Tulungbuyut-Negeriagung, km 185+085 pada jalur petak jalan Waytuba-Waypisang, dan km 233+075 pada jalur hilir Baturaja-Tigagajah. Oleh karena itu, sangat penting untuk mengidentifikasi penyebab utama terjadinya rel patah pada kereta api. Identifikasi ini akan memungkinkan dilakukannya analisis yang lebih mendalam terhadap faktor-faktor penyebab tersebut. Dengan pemahaman yang komprehensif mengenai akar permasalahan, langkah-langkah mitigasi yang relevan dan efektif dapat dirancang dan diterapkan. Langkah-langkah mitigasi ini bertujuan untuk mencegah terjadinya kerusakan serupa di masa mendatang, memastikan keselamatan operasional kereta api, serta meminimalisir gangguan yang dapat mempengaruhi kinerja sistem transportasi rel secara keseluruhan [14,15].



Gambar 1. Lokasi Penelitian.

3.2. Analisis Nilai Tingkat Risiko

Mengklasifikasikan risiko dengan membuat Risk ID pada variabel risiko yang telah diidentifikasi untuk memudahkan dalam menganalisis nilai tingkat risikonya. Berikut telah disajikan daftar risiko telah diolah yang dapat dilihat pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Daftar Risiko






No	Variabel Risiko	Risk ID
A	Kondisi Cuaca Ekstrem	
1	Hujan	RA 1
2	Kemarau	RA 2
B	Perawatan	
3	Pemeriksaan terjadwal yang tidak dilakukan	RB 1
4	Kurangnya perbaikan komponen yang usang	RB 2
5	Kurangnya perencanaan	RB 3
6	Kurangnya koordinasi	RB 4
7	Penggunaan alat yang kurang tepat	RB 5
C	Kegagalan Material	
8	Fatigue fracture (kelelahan material)	RC 1
9	Corrosion (korosi)	RC 2
10	Wear (keausan)	RC 3
D	Kesalahan Manusia	
11	Kesalahan pemeliharaan	RD 1
12	Kesalahan inspeksi	RD 2
13	Kesalahan dalam pengoperasian	RD 3
14	Kurangnya pelatihan atau pengetahuan	RD 4
15	Kesalahan dalam komunikasi	RD 5
E	Beban Berlebih	
16	Muatan kereta terlalu banyak	RE 1
F	Pemuaian Posisi Rel	
17	Lurusan	RF 1
18	Tikungan	RF 2
19	Wesel	RF 3
G	Kecelakaan atau Insiden	
20	Tabrakan KA	RG 1
21	Anjlogan atau amblesan	RG 2
22	Derailment (keluar jalur rel)	RG 3
23	Sabotase (pencurian material rel)	RG 4
24	Gempa bumi	RG 5
25	Tanah longsor	RG 6
26	Banjir	RG 7
27	<i>Mud pumping</i>	RG 8

Pembahasan selanjutnya berfokus pada hasil survei kuisisioner untuk menilai probabilitas dan dampak dari berbagai risiko. Hasilnya telah disajikan dalam **Tabel 5** (probabilitas) dan **Tabel 6** (dampak). Data survei kemudian diproses menggunakan matriks probabilitas dari **Tabel 1** dan nilai tingkat keparahan dampak dari **Tabel 2**. Hasil akhir dari analisis ini dapat dilihat pada penjabaran **Tabel 5** dan **Tabel 6**.

Tabel 5. Hasil Tabulasi Penilaian Probabilitas

No	Risk ID	Probabilitas					Jumlah Frekuensi	λ (Frekuensi/356 hari)	Persentase	Keterangan
		1	2	3	4	5				
1	RA 1		2	3		18	3.6	0.0099	0.99%	CUKUP SERING
2	RA 2		5			10	2	0.0055	0.55%	JARANG
3	RB 1	1	3		1	11	2.2	0.0060	0.60%	JARANG
4	RB 2	1	4			9	1.8	0.0049	0.49%	SANGAT JARANG
5	RB 3	1	4			9	1.8	0.0049	0.49%	SANGAT JARANG
6	RB 4	1	4			9	1.8	0.0049	0.49%	SANGAT JARANG
7	RB 5	1	4			9	1.8	0.0049	0.49%	SANGAT JARANG
8	RC 1		5			10	2	0.0055	0.55%	JARANG
9	RC 2		4	1		11	2.2	0.0060	0.60%	JARANG
10	RC 3		3	2		12	2.4	0.0066	0.66%	JARANG
11	RD 1		5			10	2	0.0055	0.55%	JARANG
12	RD 2		5			10	2	0.0055	0.55%	JARANG
13	RD 3		5			10	2	0.0055	0.55%	JARANG
14	RD 4		5			10	2	0.0055	0.55%	JARANG
15	RD 5		5			10	2	0.0055	0.55%	JARANG
16	RE 1		5			10	2	0.0055	0.55%	JARANG
17	RF 1		1	3	1	20	4	0.0110	1.10%	SERING
18	RF 2		5			15	3	0.0082	0.82%	CUKUP SERING
19	RF 3	1	4			9	1.8	0.0049	0.49%	SANGAT JARANG
20	RG 1		5			5	1	0.0027	0.27%	SANGAT JARANG
21	RG 2	4		1		7	1.4	0.0038	0.38%	SANGAT JARANG
22	RG 3	4	1			6	1.2	0.0033	0.33%	SANGAT JARANG
23	RG 4	4			1	8	1.6	0.0044	0.44%	SANGAT JARANG
24	RG 5		5			5	1	0.0027	0.27%	SANGAT JARANG
25	RG 6	3	1	1		8	1.6	0.0044	0.44%	SANGAT JARANG
26	RG 7		4	1		11	2.2	0.0060	0.60%	JARANG
27	RG 8			4	1	21	4.2	0.0115	1.15%	SERING

Keterangan:

	: probabilitas sangat jarang
	: probabilitas jarang
	: probabilitas cukup sering
	: probabilitas sering
	: probabilitas sangat sering

Data kemudian diolah menjadi satuan angka dengan mengikuti tabel skala dampak yang sudah dikelompokkan sebagai berikut:

Tabel 6. Skala Dampak

Tingkat	Deskripsi	Keterangan
5	Sangat Besar	Fatal, kerugian sangat besar dan dampak luas yang berdampak panjang, terhentinya seluruh kegiatan (kemungkinan kerugian ± Rp 40,060,000,000)
4	Besar	Cedera berat, kerugian besar, gangguan produksi (kemungkinan kerugian ± Rp 28,560,000,000)
3	Sedang	Cedera sedang, perlu penanganan, kerugian finansial besar (kemungkinan kerugian ± Rp 21,060,000,000)
2	Kecil	Cedera ringan, kerugian finansial sedang (kemungkinan kerugian ± Rp 19,560,000,000)
1	Sangat Kecil	Tidak terjadi cedera, kerugian finansial kecil (kemungkinan kerugian ± Rp 18,560,000,000)

Tabel 6 menunjukkan skala dampak dengan 5 tingkat. Peringkat risiko ditentukan berdasarkan probabilitas dan dampak dari peristiwa risiko. Nilai skala dampak dihitung berdasarkan dampak keuangan dan operasional.

$$\mu = \text{Kemungkinan kerugian} \times \frac{\text{Frekuensi}}{4}$$

Tabel 7. Hasil Tabulasi Penilaian Dampak

No	Risk ID	Dampak					Jumlah	Frekuensi	μ	Keterangan
		1	2	3	4	5				
1	RA 1		1		1	3	21	4.2	Rp29,988,000,000	BESAR
2	RA 2	1		1		3	19	3.8	Rp27,309,333,333	SEDANG
3	RB 1	1	1			3	18	3.6	Rp25,872,000,000	SEDANG
4	RB 2	1		1		3	19	3.8	Rp27,309,333,333	SEDANG
5	RB 3	1				4	21	4.2	Rp29,988,000,000	BESAR
6	RB 4	1				4	21	4.2	Rp29,988,000,000	BESAR
7	RB 5	1				4	21	4.2	Rp29,988,000,000	BESAR
8	RC 1		1			4	22	4.4	Rp31,416,000,000	BESAR
9	RC 2			1		4	23	4.6	Rp32,844,000,000	BESAR
10	RC 3			1		4	23	4.6	Rp32,844,000,000	BESAR
11	RD 1		1			4	22	4.4	Rp31,416,000,000	BESAR
12	RD 2		1			4	22	4.4	Rp31,416,000,000	BESAR
13	RD 3		1			4	22	4.4	Rp31,416,000,000	BESAR
14	RD 4		1			4	22	4.4	Rp31,416,000,000	BESAR
15	RD 5		1			4	22	4.4	Rp31,416,000,000	BESAR
16	RE 1		1			4	22	4.4	Rp31,416,000,000	BESAR
17	RF 1				1	4	24	4.8	Rp34,272,000,000	BESAR
18	RF 2		1			4	22	4.4	Rp31,416,000,000	BESAR
19	RF 3	1				4	21	4.2	Rp29,988,000,000	BESAR
20	RG 1	1				4	21	4.2	Rp29,988,000,000	BESAR
21	RG 2			1		4	23	4.6	Rp32,844,000,000	BESAR
22	RG 3		1			4	22	4.4	Rp31,416,000,000	BESAR
23	RG 4					5	25	5.0	Rp40,560,000,000	SANGAT BESAR
24	RG 5	1				4	21	4.2	Rp29,988,000,000	BESAR
25	RG 6			1		4	23	4.6	Rp32,844,000,000	BESAR
26	RG 7			1		4	23	4.6	Rp32,844,000,000	BESAR
27	RG 8				1	4	24	4.8	Rp34,272,000,000	BESAR

Keterangan:

	:	dampak sangat kecil
	:	dampak kecil
	:	dampak sedang
	:	dampak besar
	:	dampak sangat besar

Selanjutnya didapatkan hasil untuk penilaian tingkat risiko menggunakan **Persamaan 1** yang hasilnya dapat dilihat pada **Tabel 7** sehingga kemudian dapat direkapitulasi kedalam tabel yang dapat dilihat pada **Tabel 8**. Berikut telah disajikan tabel hasil analisis nilai tingkat risiko berdasarkan hasil kali probabilitas dengan dampak untuk mengetahui hasil akhir dari penyebab rel patah mulai dari risiko yang tertinggi hingga risiko yang terendah seperti pada **Tabel 9**.

Tabel 8. Nilai Dan Kategori Persepsi Risiko

No	Risk ID	Variabel Risiko	Probabilitas (P)	Dampak (I)	Nilai Risiko (P x I)	Keterangan
A Kondisi Cuaca Ekstrem						
1	RA 1	Hujan	0.0099	Rp 29,988,000,000	Rp 296,881,200	TINGGI
2	RA 2	Kemarau	0.0055	Rp 27,309,333,333	Rp 150,201,333	RENDAH
B Perawatan						
1	RB 1	Pemeriksaan terjadwal yang tidak dilakukan	0.0060	Rp 25,872,000,000	Rp 155,232,000	RENDAH
2	RB 2	Kurangnya perbaikan komponen yang usang	0.0049	Rp 27,309,333,333	Rp 133,815,733	RENDAH
3	RB 3	Kurangnya perencanaan	0.0049	Rp 29,988,000,000	Rp 146,941,200	RENDAH
4	RB 4	Kurangnya koordinasi	0.0049	Rp 29,988,000,000	Rp 146,941,200	RENDAH
5	RB 5	Penggunaan alat yang kurang tepat	0.0049	Rp 29,988,000,000	Rp 146,941,200	RENDAH
C Kegagalan Material						
1	RC 1	Fatigue fracture (kelelahan material)	0.0055	Rp 31,416,000,000	Rp 172,788,000	MENENGAH
2	RC 2	Corrosion (korosi)	0.0060	Rp 32,844,000,000	Rp 197,064,000	MENENGAH
3	RC 3	Wear (keausan)	0.0066	Rp 32,844,000,000	Rp 216,770,400	MENENGAH
D Kesalahan Manusia						
1	RD 1	Kesalahan pemeliharaan	0.0055	Rp 31,416,000,000	Rp 172,788,000	MENENGAH
2	RD 2	Kesalahan inspeksi	0.0055	Rp 31,416,000,000	Rp 172,788,000	MENENGAH
3	RD 3	Kesalahan dalam pengoperasian	0.0055	Rp 31,416,000,000	Rp 172,788,000	MENENGAH
4	RD 4	Kurangnya pelatihan atau pengetahuan	0.0055	Rp 31,416,000,000	Rp 172,788,000	MENENGAH
5	RD 5	Kesalahan dalam komunikasi	0.0055	Rp 31,416,000,000	Rp 172,788,000	MENENGAH
E Beban Berlebih						
1	RE 1	Muatan kereta terlalu banyak	0.0055	Rp 31,416,000,000	Rp 172,788,000	MENENGAH
F Pemuaian Posisi Rel						
1	RF 1	Lurusan	0.0110	Rp 34,272,000,000	Rp 376,992,000	TINGGI
2	RF 2	Tikungan	0.0082	Rp 31,416,000,000	Rp 257,611,200	MENENGAH
3	RF 3	Wesel	0.0049	Rp 29,988,000,000	Rp 146,941,200	RENDAH
G Kecelakaan atau Insiden						
1	RG 1	Tabrakan KA	0.0027	Rp 29,988,000,000	Rp 80,967,600	SANGAT RENDAH
2	RG 2	Anjlogan atau amblesan	0.0038	Rp 32,844,000,000	Rp 124,807,200	RENDAH
3	RG 3	<i>Derailment</i> (keluar jalur rel)	0.0033	Rp 31,416,000,000	Rp 103,672,800	RENDAH
4	RG 4	Sabotase (pencurian material rel)	0.0044	Rp 40,560,000,000	Rp 178,464,000	RENDAH
5	RG 5	Gempa bumi	0.0027	Rp 29,988,000,000	Rp 80,967,600	SANGAT RENDAH
6	RG 6	Tanah longsor	0.0044	Rp 32,844,000,000	Rp 144,513,600	RENDAH
7	RG 7	Banjir	0.0060	Rp 32,844,000,000	Rp 197,064,000	MENENGAH
8	RG 8	<i>Mud pumping</i>	0.0115	Rp 34,272,000,000	Rp 394,128,000	TINGGI

Tabel 9. Penilaian Tingkat Risiko

Kemungkinan (Probability)	Dampak (Impact)						
	1 (±Rp18.56 M)	2 (±Rp19.56 M)	3 (±Rp21.56 M)	4 (±Rp28.56 M)	5 (±Rp40.56 M)		
5 (0.009)				RA1, RF1, RG8			
4 (0.007)				RF2			
3 (0.005)				RA2, RB1		RC1, RC2, RC3, RD1, RD2, RD3, RD4, RD5, RE1, RG7	
2 (0.003)				RB2, RB3, RB4, RB5		RF3, RG2, RG3, RG6	RG4
1 (0.001)				RG1, RG5			

Keterangan:

	:	risiko sangat rendah
	:	risiko rendah
	:	risiko menengah
	:	risiko tinggi
	:	risiko sangat tinggi

3.3. Analisis Hasil Perhitungan

Diketahui bahwa terdapat 3 risiko tergolong tinggi yaitu hujan dengan kejadian ekstrem (RA1), pemuaian pada area lurus (RF1), dan *mud pumping* (RG8). 11 risiko tergolong menengah yaitu *fatigue fracture* (kelelahan material) (RC1), *corrosion* (korosi) (RC2), *wear* (keausan) (RC3), kesalahan pemeliharaan (RD1), kesalahan inspeksi (RD2), kesalahan dalam pengoperasian (RD3), kurangnya pelatihan atau pengetahuan (RD4), kesalahan dalam komunikasi (RD5), muatan kereta terlalu banyak (RE1), pemuaian pada area tikungan (RF2), dan banjir (RG 7). 11 risiko tergolong rendah yaitu kemarau (RA2), pemeriksaan terjadwal yang tidak dilakukan (RB1), kurangnya perbaikan komponen yang usang (RB2), kurangnya perencanaan (RB3), kurangnya koordinasi (RB4), penggunaan alat yang kurang tepat (RB5), wesel (RF3), anjlogan atau amblesan (RG2), *derailment* (keluar jalur rel) (RG3), sabotase (pencurian material rel) (RG4), dan tanah longsor (RG6). 2 risiko tergolong sangat rendah yaitu tabrakan ka (RG 1) dan gempa bumi (RG 5). Hasil pengolahan risiko untuk dilakukan penanganan perbaikan rel patah yakni dari risiko yang paling tinggi hingga risiko yang paling rendah.

Risiko tinggi hingga kondisi risiko sangat rendah dipilih berdasarkan dua parameter utama yaitu probabilitas dan dampak dengan berpedoman pada tabel tingkat kemungkinan (*probability*) dan tabel tingkat keparahan dampak (*impact*) yang dapat dilihat pada **Tabel 1** dan **Tabel 2** serta hasil risiko pada **Tabel 3**. Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, hujan dengan kejadian ekstrem (RA1), pemuaian pada area lurus (RF1), dan *mud pumping* (RG8), merupakan variabel risiko yang tergolong tinggi. Pada hujan dengan kejadian ekstrem (RA1) menghasilkan nilai risiko Rp296,881,200 dengan nilai probabilitas 0.99% dan *impact* Rp29,988,000,000. Pemuaian pada area lurus menghasilkan nilai risiko Rp376,992,000 dengan nilai probabilitas 1.10% dan *impact* Rp34,272,000,000. Serta *mud pumping* menghasilkan nilai risiko Rp394,128,000 dengan nilai probabilitas 1.15% dan *impact* Rp34,272,000,000. Ketiga variabel risiko tersebut tergolong risiko tinggi. Sedangkan variabel risiko yang tergolong ke dalam risiko sangat rendah diantaranya adalah tabrakan ka (RG1) dan gempa bumi (RG5). Pada tabrakan ka (RG1) menghasilkan nilai risiko Rp80,967,600 dengan nilai probabilitas 0.27% dan *impact* Rp29,988,000,000. Gempa bumi (RG5) menghasilkan nilai risiko yang sama yaitu Rp80,967,600 dengan nilai probabilitas 0.27% dan *impact* Rp29,988,000,000.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menyimpulkan bahwa peningkatan penumpang dan barang pada kereta api di Indonesia meningkatkan risiko kerusakan rel, terutama rel patah. Tiga faktor risiko utama yaitu hujan ekstrem, pemuaian pada area lurus, dan *mud pumping* ditemukan sebagai penyebab signifikan, dengan nilai risiko tertinggi pada *mud pumping* (Rp394,128,000). Analisis risiko menunjukkan pentingnya memprioritaskan perbaikan berdasarkan tingkat risiko. Strategi mitigasi yang berfokus pada variabel berisiko tinggi dapat membantu mengurangi dampak kerusakan dan mendukung keberlanjutan infrastruktur perkeretaapian.

Daftar Pustaka

- [1] Liddell NT, Salmon PM, Naweed A, Read GJM. Perceived impacts of stressful events on train driver performance. *Appl Ergon* [Internet]. 2024;120(February):104335. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.apergo.2024.104335>
- [2] Wang C, Wang L, Chen H, Yang Y, Li Y. Fault Diagnosis of Train Network Control Management System Based on Dynamic Fault Tree and Bayesian Network. *IEEE Access*. 2021;9:2618–32.
- [3] Rahayu T, A A. Sistem Pemeliharaan Rel Kereta Api Koridor Palang Parasamia - Jembatan Sei Piring. *J Vor*. 2021;2(2):100–4.
- [4] Cahyaningrum AE, Leliana A. Kajian Anjlok Kereta Api Pada Lintas Rangkasbitung-Tanah Abang Berdasarkan Track Quality Index (TQI). *J Sustain Civ Eng*. 2023;5(02):134–43.
- [5] Beltiukov V, Shehtman E, Malikov O. Evaluation of Effectiveness of Separating Layers in Railroad Track Structure Using Life Cycle Cost Analysis. *Procedia Eng* [Internet]. 2017;189(May):695–701. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.110>

- [6] Karpuschenko N, Trukhanov P. Estimation of the life cycle cost of the upper railway track structure. *MATEC Web Conf.* 2018;216:1–8.
- [7] Yolanda M, Ekawati Y, Noya S. Penerapan Metode Fault Tree Analysis Untuk Mencegah Kegagalan Pada Departemen Interior di PT X. *J Sains dan Apl Keilmuan Tek Ind.* 2023;3(1):49–58.
- [8] Correia dos Santos N, Colaço A, Soares P, Castanheira-Pinto A, Alves Costa P, Kaynia AM. Dynamic amplification of rail tracks in high-speed lines: Exploring train effects and impact of ground treatment. *Transp Geotech* [Internet]. 2024;48(June):101294. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2024.101294>
- [9] Sandru A, Kujala P, Visala A. Horizon detection and tracking in sea-ice conditions using machine vision. *IFAC-PapersOnLine* [Internet]. 2023;56(2):6724–30. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.377>
- [10] Vitásek S, Měšťánová D. Life Cycle Cost of a Railroad Switch. *Procedia Eng.* 2017;196(June):646–52.
- [11] Beckert P, Pareschi G, Ehwald J, Sacchi R, Bauer C. *Jou rna. Resour Environ Sustain* [Internet]. 2024;100162. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2024.100162>
- [12] Yao D, García de Soto B. Enhancing cyber risk identification in the construction industry using language models. *Autom Constr* [Internet]. 2024;165(June):105565. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105565>
- [13] Hussain K, Sun H, Ahmad N, Iqbal M. Assessment of risk factors to Green, Lean, Six Sigma adoption in construction sector: Integrated ISM-MICMAC approach. *Heliyon* [Internet]. 2024;10(12):e32749. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e32749>
- [14] Kim ES, Lee DK, Choi J. Evaluating the effectiveness of mitigation measures in environmental impact assessments: A comprehensive review of development projects in Korea. *Heliyon* [Internet]. 2024;10(11):e31647. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e31647>
- [15] Sharma SB, Lee JT, Callaway DS. Distributed battery dispatch for uncertainty mitigation in renewable microgrids. *Electr Power Syst Res* [Internet]. 2024;235(June):110671. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110671>