



Seminar Nasional Ilmu Teknik dan Aplikasi Industri (SINTA)

Homepage: sinta.eng.unila.ac.id



Asesmen Risiko Rel Patah (*Rail Breaks*) pada Jalur Kereta Api Sumatera Selatan – Lampung dengan Pendekatan *Probabilistic Fault Tree* (PFTA)

K. Usman^{a,*}, V. N. A. Putri^b, I. Kustiani^a, A. M. Siregar^a, Iswan^a, dan Bayzoni^a

^a Dosen Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No. 1, Bandar Lampung 35145

^b Alumni Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, Jl. Prof. Sumantri Brojonegoro No. 1, Bandar Lampung 35145

INFORMASI ARTIKEL

Riwayat artikel:
Diterima 11/11/2024
Direvisi 13/01/2025
Dipublish 22/05/2025

Kata kunci:

Asesmen risiko
Infrastruktur rel
Kerusakan rel
Probabilistic fault tree analysis
(PFTA)
Strategi pemeliharaan

ABSTRAK

Meningkatnya volume angkutan barang di jalur kereta api (KA) Sumatra Selatan-Lampung, yang saat ini menangani sekitar 25 juta ton per tahun, berpotensi menimbulkan dampak pada integritas infrastruktur rel, terutama risiko rel patah (*rail breaks*). Studi ini menerapkan *probabilistic fault tree analysis* (PFTA) dalam proses asesmen penyebab utama dari patahnya rel berdasarkan nilai probabilitas (p) aset rel KA. *Fault Tree* disusun dengan menggabungkan pendapat para ahli (*expert opinion*) dari operator dan regulator KA. Analisis tersebut mengidentifikasi 23 penyebab utama (*basic event*) yang dibagi dalam 9 *group* (*intermediate event*), termasuk kondisi cuaca ekstrem (B1), kegagalan material (B2), pemuaian posisi rel (B3), anjlokkan kereta api (B4), kelelahan material (C1), pemasangan yang tidak tepat (C2), kesalahan dalam perawatan (C3), pemeriksaan terjadwal yang tidak dilakukan (D), kecelakaan atau insiden (E). Analisis tersebut mengidentifikasi ekspansi rel di tikungan ($p=0,82\%$), curah hujan ekstrem ($p=0,99\%$), ekspansi rel di lurus ($p=1,1\%$), dan *mud pumping* ($p=1,15\%$) sebagai peristiwa yang paling berisiko berdasarkan kemungkinan terjadinya. Risiko ini dikategorikan menjadi empat faktor risiko tinggi ($p>0,80\%$), enam belas faktor risiko sedang ($p=0,4\% - 0,8\%$), tiga faktor risiko rendah ($p=0 - 0,4\%$). Oleh karena itu, strategi perbaikan yang diprioritaskan diusulkan untuk menangani faktor-faktor risiko tertinggi yang perlu dilakukan, dengan mempertimbangkan pengkategorian ini. Hasil temuan ini mengindikasikan perlunya intervensi pemeliharaan yang strategis dan terarah demi meningkatkan keselamatan serta keandalan operasional jalur angkutan barang ini.

1. Pendahuluan

Jalur kereta api (KA) di wilayah Sumatra Selatan dan Lampung memainkan peran penting dalam mendukung aktivitas logistik, khususnya angkutan barang. Jalur ini memiliki panjang sekitar 415 km dan volume angkutan barang yang terus meningkat, yang saat ini mencapai sekitar 25 juta ton per tahun. Hal tersebut menjadi tantangan tersendiri dalam hal keamanan dan keandalan infrastruktur rel. Peningkatan beban pada jalur KA

berpotensi memberikan dampak terhadap integritas infrastruktur rel, khususnya dalam hal risiko kerusakan rel yang dapat mempengaruhi kelancaran operasional KA. Kondisi ini menuntut perhatian khusus pada aspek keandalan dan keamanan operasi demi memastikan kesinambungan serta efektivitas layanan transportasi KA. (Cahyaningrum & Leliana, 2023). Kerusakan rel yang disebabkan oleh berbagai faktor seperti cuaca ekstrem, pemeliharaan yang kurang memadai, hingga kesalahan manusia, dapat berujung pada kecelakaan

* Penulis korespondensi.

E-mail: kristianto.usman@eng.unila.ac.id (Kristianto Usman)

(Rahayu & A, 2021). Kerusakan ini berpotensi menimbulkan kerugian besar, baik dari segi material maupun keselamatan.

Untuk memahami dan mengelola risiko-risiko tersebut, diperlukan suatu pendekatan sistematis guna mengidentifikasi dan menilai faktor-faktor yang berkontribusi terhadap kerusakan rel. Salah satu metode yang dapat digunakan untuk tujuan tersebut adalah *Probabilistic Fault Tree Analysis* (PFTA), yang memungkinkan pengkajian terhadap penyebab utama patahnya rel dengan memperhitungkan probabilitas kejadian setiap faktor risiko (Roozbahani & Ghanian, 2024). Metode ini juga memungkinkan untuk menyusun prioritas intervensi berdasarkan tingkat risiko yang teridentifikasi.

Dalam studi ini, *fault tree* disusun berdasarkan kombinasi opini dari para ahli termasuk dari operator dan regulator kereta api. Melalui pemahaman yang lebih baik mengenai risiko serta strategi mitigasi yang tepat, peningkatan pada sistem manajemen keselamatan KA dapat dicapai, yang pada akhirnya akan memperkuat kepercayaan publik terhadap kereta api sebagai moda transportasi yang aman dan dapat diandalkan.

2. Metodologi

2.1. Lokasi 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.

2.2. Metode pengumpulan data

Proses pengumpulan data membutuhkan 2 jenis data yakni data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh langsung dari sumbernya melalui survei atau pengamatan langsung, dalam penelitian ini melalui kuisioner kepada pihak PT. KAI Divre IV Tanjung Karang. Data sekunder berasal dari sumber kedua atau instansi tertentu, mencakup data gambar rel patah, dan informasi teknis terkait penyebab potensial rel patah.

2.3. Metode pengolahan data

Setelah pengumpulan data, langkah berikutnya adalah pengolahan data. Proses pengolahan data diawali dengan mengidentifikasi risiko penyebab rel patah

dengan penyebaran kuisioner. Tujuan diawali dengan mengidentifikasi risiko adalah untuk mengumpulkan informasi tentang berbagai faktor risiko yang dapat menyebabkan rel patah.

2.4. Metode analisis data

Dalam penelitian ini digunakan beberapa analisis data yaitu diawali dengan metode *Probabilistic Fault Tree Analysis* (PFTA), risiko yang telah diidentifikasi pada survei utama kemudian dianalisis lebih mendalam untuk memahami berbagai faktor penyebab rel patah (Niloofer & Lazarova-Molnar, 2023). Metode ini menggunakan pendekatan *top-down*, dimulai dari peristiwa puncak (*top event*) yang telah didefinisikan, lalu melacak kejadian-kejadian penyebab hingga mencapai penyebab paling mendasar. Dengan pendekatan ini, penyebab utama dari potensi rel patah dapat diidentifikasi.

Berikut analisis sumber penyebab rel patah dengan metode PFTA:

- a. Menentukan *top event*
- b. Menentukan faktor penyebab rel patah.
- c. Menentukan *intermediate event*

2.4.1 Formulasi untuk Probabilitas

Fault Tree Analysis (FTA) merupakan teknik yang banyak digunakan untuk menganalisis penyebab potensial kegagalan sistem. Sementara FTA kualitatif berfokus pada identifikasi jalur kegagalan, FTA kuantitatif bertujuan menghitung probabilitas kejadian puncak (kegagalan sistem yang tidak diinginkan) dengan mempertimbangkan probabilitas dari peristiwa dasar. Di sinilah aljabar Boolean memainkan peran yang penting.

2.4.2 Prinsip-Prinsip Dasar

Aljabar Boolean, yang dikembangkan oleh George Boole pada abad ke-19, menyediakan kerangka matematika untuk merepresentasikan dan memanipulasi hubungan logis. Dalam konteks FTA, aljabar Boolean memungkinkan analisis untuk:

- a) Memodelkan logika sistem yang kompleks: Dengan menggunakan operator Boolean seperti AND, OR, dan NOT, hubungan kompleks antara peristiwa-peristiwa yang menyebabkan kegagalan sistem dapat direpresentasikan secara terstruktur (BSI, 2010). Hal ini memungkinkan penyusunan *fault tree* yang menggambarkan secara visual koneksi logis antara peristiwa-peristiwa tersebut.
- b) Menghitung probabilitas: Dengan menetapkan probabilitas pada peristiwa dasar, aljabar Boolean memungkinkan perhitungan probabilitas dari kejadian puncak (Limnios, 2013). Penilaian

kuantitatif ini sangat penting untuk memprioritaskan upaya mitigasi risiko.

Untuk menghitung probabilitas event gabungan, kita dapat menggunakan rumus-rumus dasar dalam teori probabilitas. Jika dua atau lebih event terjadi secara paralel (seperti dalam sebuah OR gate dalam *Fault Tree Analysis*), maka probabilitasnya adalah:

$$P(A)=P(B1\cup B2)=P(B1)+P(B2)-P(B1\cap B2) \quad (1)$$

Namun, karena kita berasumsi bahwa kejadian-kejadian ini jarang terjadi (*small probability approximation*), kita dapat menyederhanakan perhitungan dengan hanya menjumlahkan probabilitas masing-masing event tanpa menghitung overlap:

$$P(A)\approx P(B1)+P(B2) \quad (2)$$

.Langkah selanjutnya adalah menghitung nilai probabilitas dan dari hasil kuisioner.

3. Hasil dan pembahasan

3.1. Gambaran umum

Sebagai bagian dari PT Kereta Api Indonesia, Divisi Regional IV Tanjung Karang (Divre IV TNK) mengelola jaringan kereta api di Lampung dan sekitarnya. Dengan pusat operasi di Stasiun Tanjung Karang, divisi ini menjalankan berbagai jenis kereta, termasuk kereta penumpang dan kereta barang. Meskipun demikian, Divre IV TNK sering menghadapi kendala akibat kerusakan infrastruktur, terutama rel kereta yang sering patah. Penelitian ini akan menganalisis faktor-faktor yang menyebabkan kerusakan rel tersebut.

3.2. Analisis data

Pada proses analisis data dimulai dengan menganalisis sumber penyebab patahnya rel menggunakan metode *Probabilistic Fault Tree Analysis* (PFTA). Perhitungan probabilitas dan dampak mengikuti acuan tabel pada *Australian Standard/New Zealand Standard for Risk Management* (AS/NZS 4360:2004; Tzanakakis, 2021).

Tabel 1 merepresentasikan tentang nilai kuantitatif tingkat kemungkinan terjadi (*probability*).

Agar mempermudah proses analisis, dilakukan pengklasifikasian variabel risiko untuk dibuat *Risk ID* yang dapat dilihat seperti pada **Tabel 2** (*intermediate event*), **Tabel 3** (*basic event*), dan selanjutnya tabulasi nilai probabilitas *basic event*.

Tabel 1. Nilai Tingkat Kemungkinan (*Probability*).

Tingkat	Deskripsi	Keterangan
5	<i>Almost certain</i>	Hampir pasti terjadi, terjadi lebih dari 12 kali dalam 1 tahun
4	<i>Likely</i>	Cukup sering terjadi, terjadi 9-12 kali dalam 1 tahun
3	<i>Possible</i>	Mungkin terjadi, terjadi 5-8 kali dalam 1 tahun
2	<i>Unlikely</i>	Hampir mungkin terjadi, terjadi 1-4 kali dalam 1 tahun
1	<i>Rare</i>	Jarang terjadi, terjadi 1 kali dalam masa lebih dari 1 tahun

(Sumber: *After Risk management Standard AS/NZS 4360:2004*)

Tabel 2. Daftar risiko *Top Event* (TE) dan *Intermediate Event* (IE).

Kode	Variabel Risiko	Tipe
A	Rel patah	TE
B1	Kondisi cuaca ekstrem	IE
B2	Kegagalan material	IE
B3	Pemuaian posisi rel	IE
B4	Anjlokkan kereta api	IE
C1	Kelelahan material	IE
C2	Pemasangan yang tidak tepat	IE
C3	Kesalahan perawatan	IE
D	Pemeriksaan terjadwal yang tidak dilakukan	IE
E	Kecelakaan atau insiden	IE

(Sumber: Data diolah)

3.3. Hasil analisis expert opinion

Studi ini menggunakan survei kuisioner berbasis *expert opinion* untuk menilai probabilitas berbagai risiko terkait rel patah. Menurut Kumar et al. (2010), kombinasi antara teknik analisis kuantitatif dan kualitatif sangat penting dalam penilaian risiko rel patah. Opini para ahli dimanfaatkan dalam proses ini melalui metode seperti survei Delphi, wawancara terstruktur, dan lokakarya. Metode-metode ini memungkinkan pengumpulan pengetahuan dari ahli yang berpengalaman di bidang perkeretaapian, yang memberikan wawasan berharga dalam beberapa aspek, yaitu:

- Identifikasi potensi mekanisme kegagalan berdasarkan pengalaman praktis terkait rel patah, terutama ketika data historis terbatas.
- Penilaian efektivitas praktik pemeliharaan yang saat ini diterapkan.
- Evaluasi kecocokan berbagai langkah mitigasi yang tersedia.

Dengan mengumpulkan dan mengintegrasikan wawasan dari para ahli secara sistematis, dapat diperoleh pemahaman yang lebih mendalam tentang risiko patah rel. Hal ini akan membantu dalam pengembangan strategi mitigasi yang lebih efektif. Hasil

penilaian ini disajikan dalam **Tabel 4**. Data yang telah diperoleh dari perhitungan dan analisis berdasarkan *expert of inion*, ditampilkan pada **Tabel 4**, bagian 3.3, berupa tabel penilaian tingkat risiko berdasarkan nilai kemungkinan terjadinya ($p=probability$).

Gambar 1 merupakan penggambaran *Fault Tree Analysis* rel patah dari hasil *intermediate event* dan *basic event* dari *top event* yang telah dianalisa.

Tabel 3. Daftar risiko *Basic Event* (BE).

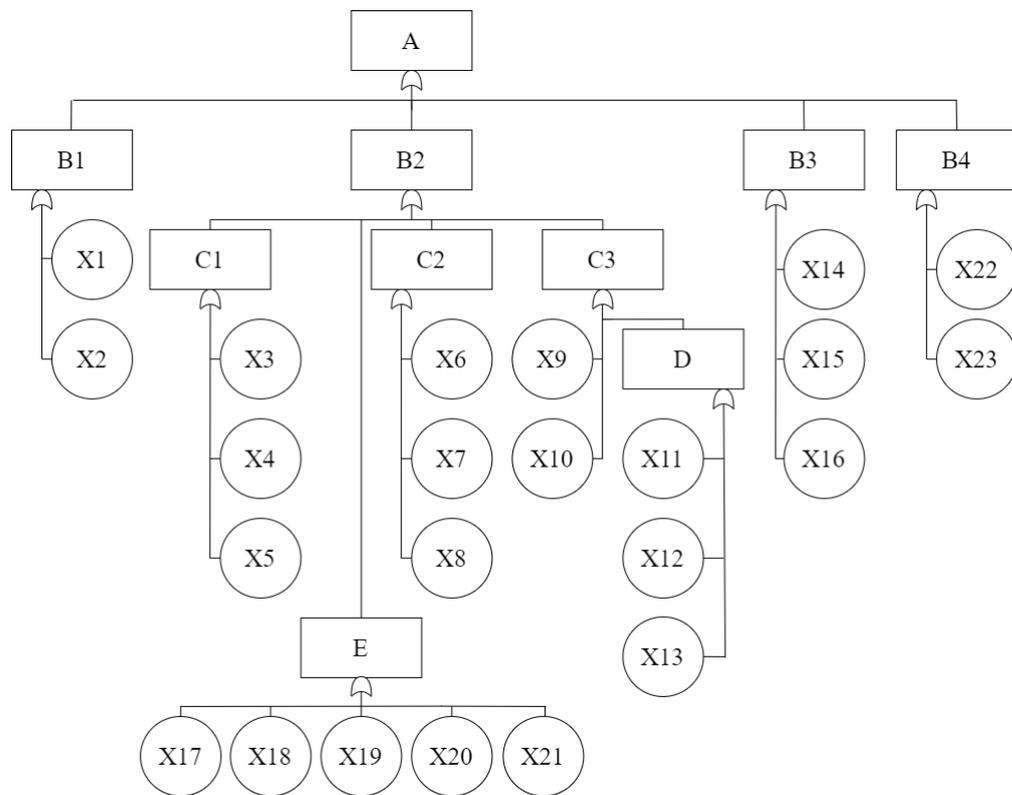
Kode	Variabel Risiko	Tipe
X1	Hujan	BE
X2	Kemarau	BE
X3	Korosi	BE
X4	Keausan	BE
X5	Muatan kereta terlalu banyak	BE
X6	Kurangnya pelatihan atau pengetahuan	BE
X7	Kesalahan manusia	BE
X8	Kesalahan inspeksi	BE

X9	Penggunaan alat yang kurang tepat	BE
X10	Kurangnya perbaikan komponen yang sudah usang	BE
X11	Kurangnya komunikasi	BE

Tabel 3. Lanjutan.

X12	Kurangnya koordinasi	BE
X13	Kurangnya perencanaan	BE
X14	Ekspansi rel di lurus	BE
X15	Ekspansi rel di tikungan	BE
X16	Ekspansi Rel di wesel	BE
X17	Sabotase (pencurian material rel)	BE
X18	Gempa bumi	BE
X19	Tanah longsor	BE
X20	Banjir	BE
X21	Kesalahan dalam pengoperasian	BE
X22	<i>Derailment</i> (keluar jalur rel)	BE
X23	<i>Mud Pumping</i>	BE

(Sumber: Data diolah)



Gambar 1. Diagram *Fault Tree Analysis* (FTA) (Sumber: Data diolah)

Tabel 4. Hasil tabulasi perhitungan probabilitas.

No	Risk ID	Probabilitas					Jumlah	Frekuensi	λ	Persentase	Keterangan
		1	2	3	4	5					

1	(X1)		2	3	18	3,6	0,0099	0,99%	Unlikely		
2	(X2)		5		10	2	0,0055	0,55%	Unlikely		
3	(X10)	1	4		9	1,8	0,0049	0,49%	Unlikely		
4	(X13)	1	4		9	1,8	0,0049	0,49%	Unlikely		
5	(X12)	1	4		9	1,8	0,0049	0,49%	Unlikely		
6	(X9)	1	4		9	1,8	0,0049	0,49%	Unlikely		
7	(X3)		4	1	11	2,2	0,0060	0,60%	Unlikely		
8	(X4)		3	2	12	2,4	0,0066	0,66%	Unlikely		
9	(X8)		5		10	2	0,0055	0,55%	Unlikely		
10	(X7)		5		10	2	0,0055	0,55%	Unlikely		
11	(X6)		5		10	2	0,0055	0,55%	Unlikely		
12	(X11)		5		10	2	0,0055	0,55%	Unlikely		
13	(X5)		5		10	2	0,0055	0,55%	Unlikely		
14	(X14)			1	3	1	20	4	0,0110	1,10%	Unlikely
15	(X15)			5			15	3	0,0082	0,82%	Unlikely
16	(X16)	1	4				9	1,8	0,0049	0,49%	Unlikely
17	(X21)	5					5	1	0,0027	0,27%	Unlikely
18	(X22)	4	1				6	1,2	0,0033	0,33%	Unlikely
19	(X17)	4			1		8	1,6	0,0044	0,44%	Unlikely
20	(X18)	5					5	1	0,0027	0,27%	Unlikely
21	(X19)	3	1	1			8	1,6	0,0044	0,44%	Unlikely
22	(X20)		4	1			11	2,2	0,0060	0,60%	Unlikely
23	(X23)				4	1	21	4,2	0,0115	1,15%	Unlikely

(Sumber: Data diolah)

3.4 Analisis Risiko Berdasarkan Tabel Probabilitas Basic Event

Perhitungan probabilitas yaitu dengan mencari frekuensi dari masing – masing variabel risiko terlebih dahulu. Kemudian dicari tingkat kegagalan per satuan waktu untuk selanjutnya diketahui persentase probabilitasnya. Misalnya variabel risiko hujan (X1) dihitung dibawah ini.

$$X1 = ((3 \times 2 \text{ responden}) + (4 \times 3 \text{ responden})) / 5 \text{ responden} = 3,6 \text{ (Possible)}$$

$$\lambda_1 = 3,6 / 360 = 0,0099 = 0,99\%$$

Berdasarkan perhitungan frekuensi dan laju kegagalan (*failure rate*= λ) di atas, perhitungan probabilitas (%) dapat dihitung dan ditabulasi (lihat **Tabel 4**). Berdasarkan data tabulasi perhitungan probabilitas untuk risiko pada tabel di atas, berikut adalah analisis yang terstruktur, mencakup identifikasi risiko, analisis probabilitas, dan prioritas penanganan berdasarkan nilai probabilitas masing-masing *basic event*.

a) Identifikasi Risiko

Dari **Tabel 4**, terdapat 23 item risiko (*Risk ID*) dengan berbagai nilai probabilitas dan frekuensi kejadian. Probabilitas dihitung berdasarkan frekuensi kejadian dan λ (tingkat kegagalan per unit waktu). Nilai persentase menunjukkan probabilitas terjadinya risiko, dengan seluruh risiko dikategorikan sebagai "Unlikely" (hampir mungkin terjadi) karena probabilitas di bawah 5%.

b) Analisis Probabilitas

Probabilitas masing-masing risiko telah dihitung dan dikelompokkan berdasarkan jumlah kejadian (frekuensi) serta nilai λ . Nilai persentase menunjukkan tingkat kemungkinan kejadian untuk setiap risiko. Dari data tersebut, seluruh risiko dikategorikan sebagai "Unlikely" (hampir mungkin terjadi), tetapi terdapat perbedaan tingkat probabilitas yang dapat membantu menentukan prioritas penanganan.

Berikut adalah beberapa risiko dengan probabilitas tertinggi:

(X23) dengan probabilitas 1,15%

(X14) dengan probabilitas 1,10%

(X15) dengan probabilitas 0,82%

Risiko dengan probabilitas terendah:

(X18) dan (X21) dengan probabilitas 0,27%

c) Prioritas Penanganan Risiko

Meskipun semua risiko memiliki probabilitas yang rendah, tetap diperlukan prioritas penanganan untuk meminimalkan dampak jika risiko tersebut terjadi. Prioritas dapat diberikan berdasarkan probabilitas tertinggi. Berikut urutan prioritas berdasarkan probabilitas: *Risk ID* (X23) – Probabilitas: 1,15%

Meskipun tergolong "Unlikely", ini adalah risiko dengan probabilitas relative tertinggi terkait risiko rel patah (*top event*), sehingga memerlukan pengawasan dan mitigasi khusus. *Risk ID* (X14) – Probabilitas: 1,10%. Risiko ini perlu mendapatkan perhatian, terutama dalam hal upaya pencegahan dan mitigasi. *Risk ID* (X15) – Probabilitas: 0,82%

Perlu diidentifikasi langkah pencegahan lebih lanjut untuk mengurangi peluang terjadinya kegagalan. *Risk ID* (X22) dan *Risk ID* (X20) – Probabilitas: 0,60%. Kedua risiko ini perlu diperhatikan, meski probabilitasnya rendah. Risiko dengan probabilitas terendah seperti *Risk ID* (X18) dan *Risk ID* (X21) memiliki prioritas lebih rendah dalam hal mitigasi karena probabilitas kejadiannya lebih kecil, namun tetap harus dimonitor secara berkala.

3.5 Analisis Risiko Berdasarkan Tabel Probabilitas Basic Event

a) Menghitung Probabilitas Intermediate Event (IE)

B1 (kondisi cuaca ekstrem)

$$P(B1) = P(X1) + P(X2) \quad (4)$$

$$=0.0099+0.0055=0.0154$$

B2 (kegagalan material)

$$P(B2) = P(C1) + P(C2) + P(C3) + P(E) \quad (5)$$

$$P(C1) = P(X3) + P(X4) + P(X5) \quad (6)$$

$$= 0.0060+0.0066+0.0055= 0.0181$$

$$P(C2) = P(X6) + P(X7) + P(X8) \quad (7)$$

$$= 0.0055+0.0055+0.0055= 0.0165$$

$$P(C3) = P(X9) + P(X10) + P(D) \quad (8)$$

$$P(D) = P(X12) + P(X13) + P(14) \quad (9)$$

$$P(C3) = P(X9) + P(X10) + P(X12) + P(X13) + P(14) \\ =0.0049+0.0049+0.0049+0.0049+0.0110 \\ =0.0306$$

$$P(E) = P(X17) + P(X18) + P(X19) + P(X20) + P(X21) \quad (10)$$

$$=0.0044+0.0027+0.0044+0.0027+0.0027 \\ =0.017$$

Jadi, probabilitas untuk **B2**:

$$P(B2) = P(C1) + P(C2) + P(C3) + P(E) \quad (11)$$

$$=0.0181+0.0165+0.0306+0.017=0.0822$$

B3 (pemuaiian posisi rel)

$$P(B3) = P(X14) + P(X15) + P(X16) \quad (12)$$

$$= 0.0110+0.0082+0.0049= 0.0241$$

B4 (anjlokkan kereta api)

$$P(B4) = P(X22) + P(X23) \quad (13)$$

$$= 0.0060+0.0115= 0.0175$$

b) Menghitung Probabilitas Top Event (A)

$$P(A) = P(B1) + P(B2) + P(B3) + P(B4) \quad (14)$$

$$= 0.0154+0.0822+0.0241+0.0175= 0.1392$$

c) Analisis Risiko yang Terstruktur dan Komprehensif

Dari perhitungan probabilitas di atas, kita dapat melihat bahwa:

- **B2 (kegagalan material)** memiliki probabilitas tertinggi sebesar **0.0822**. Ini menunjukkan bahwa kegagalan material, yang melibatkan berbagai event dasar seperti kelelahan material, pemasangan yang tidak tepat, dan kesalahan perawatan, adalah penyebab utama yang harus mendapat perhatian khusus dalam mitigasi risiko patahnya rel.
- **B3 (pemuaiian posisi rel)** dan **B4 (anjlokkan kereta api)** memiliki probabilitas menengah, masing-masing sebesar **0.0241** dan **0.0175**. Keduanya juga perlu diawasi karena pemuaiian rel sering terjadi dalam kondisi cuaca ekstrem dan pemasangan yang kurang tepat.
- **B1 (kondisi cuaca ekstrem)** memiliki probabilitas terendah sebesar **0.0154**. Meskipun ini memiliki probabilitas paling kecil, cuaca ekstrem tetap bisa menjadi faktor yang memperburuk kondisi rel, terutama jika digabungkan dengan masalah lainnya seperti kegagalan material.

Top Event A (rel patah) memiliki probabilitas total sebesar **0.1392** atau sekitar **13.92%**, yang cukup signifikan untuk memerlukan tindakan mitigasi yang kuat, terutama terhadap **kegagalan material (B2)**.

Risiko-risiko pada **Tabel 4** diklasifikasikan menjadi empat faktor berisiko tinggi ($p > 0,80\%$), enam belas faktor berisiko sedang ($p = 0,4\% - 0,8\%$), dan tiga faktor berisiko rendah ($p = 0 - 0,4\%$).

4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis risiko menggunakan **Probabilistic Fault Tree Analysis (PFTA)**, semua risiko rel patah pada jalur kereta api Sumatera Selatan–Lampung dikategorikan dalam probabilitas rendah ("Unlikely (hampir mungkin terjadi)"). Namun demikian, penanganan risiko harus difokuskan pada risiko dengan probabilitas yang lebih tinggi, seperti **X23** (*mud pumping*) dengan probabilitas **1,15%** dan **X14** (ekspansi rel di lurus) dengan probabilitas **1,10%**.

Risiko lainnya, seperti **X10** (Kurangnya perbaikan komponen yang usang), **X13** (kurangnya perencanaan), **X12** (kurangnya koordinasi), **X9** (penggunaan alat yang kurang tepat), **X16** (Wesel), **B4** (anjlok atau amblesan), **X22** (derailment/kecelakaan keluar jalur), **X17** (Sabotase atau pencurian material rel), **X18** (gempa bumi), dan **X19** (tanah longsor), tergolong sangat jarang dengan persentase probabilitas berkisar antara **0,25%** hingga **0,50%**.

Sebagai bagian dari upaya mitigasi risiko, beberapa langkah dapat diambil:

1. **Peningkatan kualitas material dan perawatan rel** harus menjadi fokus utama mitigasi untuk mengurangi kemungkinan terjadinya **B2** (kegagalan material), yang memiliki kontribusi relatif tinggi pada risiko rel patah.
2. **Pemantauan rutin** terhadap pemuaian rel penting untuk mencegah **B3** (pemuaian posisi rel), yang berisiko menyebabkan patahnya rel.
3. **Cuaca ekstrem** perlu diantisipasi dengan pemantauan kondisi lingkungan secara berkala dan penerapan langkah-langkah pencegahan yang memadai guna mencegah terjadinya **B1** (kondisi cuaca ekstrem).

Dengan menerapkan langkah-langkah mitigasi yang tepat, risiko rel patah dapat diminimalkan dan keselamatan operasional kereta api dapat lebih terjamin.

Daftar Pustaka

- BSI Standards Publication. BS EN 31010:2010: Risk Management- Risk Assessment Techniques. British Standards, London, 2010.
- Cahyaningrum, A. E., & Leliana, A. (2023). Kajian Anjlok 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>
- Kumar, S., Gupta, S., Ghodrati, B. and Kumar, U., (2010). An approach for risk assessment of rail defects. *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, 17(04), pp.291-311.
- Limnios, N. Fault Trees. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, 2013.
- Nilofar, P., & Lazarova-Molnar, S. (2023). Data-driven extraction and analysis of repairable fault trees from time series data. *Expert Systems with Applications*, 215(November 2022), 119345. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.119345>
- Rahayu, T., & A, A. (2021). Sistem Pemeliharaan Rel Kereta Api Koridor Palang Parasamia - Jembatan Sei Piring. *Jurnal VORTEKS*, 2(2), 100–104. <https://doi.org/10.54123/vorteks.v2i2.87>
- Roobahani, A., & Ghanian, T. (2024). Risk assessment of inter-basin water transfer plans through integration of Fault Tree Analysis and Bayesian Network modelling approaches. *Journal of Environmental Management*, 356(February), 120703. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120703>
- Tzanakakis, K. and Tzanakakis, K., 2021. The Concept of Risk Management. *Managing Risks in the Railway System: A Practice-Oriented Guide*, pp.17-65.