

ANALISIS PENYEBAB REL PATAH DENGAN METODE *FAULT TREE ANALYSIS* (FTA) DAN ANALISIS BIAYA PERBAIKANNYA DENGAN METODE *LIFE CYCLE COST* (LCC)

(Skripsi)

Oleh :

**VIOLA NUR ANGGITA PUTRI
2015011010**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

ABSTRAK

ANALISIS PENYEBAB REL PATAH DENGAN METODE *FAULT TREE ANALYSIS* (FTA) DAN ANALISIS BIAYA PERBAIKANNYA DENGAN METODE *LIFE CYCLE COST* (LCC)

Oleh

VIOLA NUR ANGGITA PUTRI

Peningkatan volume penumpang dan barang dalam transportasi kereta api di Indonesia berdampak pada kondisi prasarana perkeretaapian, terutama pada infrastruktur rel kereta api. Fokus utama dari kondisi ini adalah risiko kerusakan rel, terutama pada rel patah. Sehingga diperlukan pendekatan kajian holistik untuk mengidentifikasi akar penyebabnya serta merumuskan strategi penanganan dan perbaikan yang tepat. Tujuan penelitian adalah untuk menganalisis penyebab rel patah dan biaya perbaikannya. Penelitian ini menggunakan metode *Fault Tree Analysis* (FTA) untuk menganalisis faktor penyebabnya dan *Life Cycle Cost* (LCC) untuk mengevaluasi biaya perbaikannya. Melalui FTA, teridentifikasi 23 penyebab mendasar yang meliputi hujan dengan kejadian yang cukup ekstrem, pemuaian pada area lurus dan mud pumping yang merupakan variabel risiko paling mendasar dari rel patah. Kemudian dianalisis tingkat risiko dan menghasilkan 3 risiko tinggi, 11 risiko menengah, 11 risiko rendah, dan 2 risiko sangat rendah. Oleh karena itu, skala prioritas penanganan perbaikan rel patah dikelompokkan berdasarkan nilai tingkat risiko dengan dimulai dari risiko tertinggi hingga risiko terendah. Penelitian juga menghitung biaya penanganan untuk perbaikan rel patah, dengan kondisi terbaik terjadi pada skenario 2, dengan tingkat inflasi sebesar 3%, dan nilai NPV didapat Rp 14.647.888.450, nilai IRR sebesar 15,18%, dan nilai BCR sebesar 2,59. Sedangkan kondisi terburuk terjadi pada skenario 5, dengan tingkat inflasi sebesar 8%, dan nilai NPV didapat Rp 5.000.641.484, nilai IRR sebesar 13,88%, dan dengan nilai BCR 8,1.

Kata kunci : BCR, Kereta Api, *Mud Pumping*, Prasarana, Risiko

ABSTRACT

ANALYSIS OF RAIL FRACTURE CAUSES USING FAULT TREE ANALYSIS (FTA) AND COST ANALYSIS OF ITS REPAIR USING LIFE CYCLE COST (LCC) METHOD

By

VIOLA NUR ANGGITA PUTRI

The increase in passenger and freight volumes in Indonesia's railway transportation has impacted railway infrastructure conditions, particularly concerning the risk of rail damage, notably rail fractures. Hence, a holistic approach is necessary to identify root causes and formulate appropriate strategies for handling and repairing them. The research aims to analyze the causes of rail fractures and their repair costs. This study employed Fault Tree Analysis (FTA) to analyze causal factors and Life Cycle Cost (LCC) evaluation to assess repair costs. Through FTA, 23 fundamental causes were identified, including extreme weather events like heavy rain, rail expansion in straight sections, and mud pumping, which are the most fundamental risk variables leading to rail fractures. Risk levels were subsequently analyzed, resulting in 3 high-risk, 11 medium-risk, 11 low-risk, and 2 very low-risk categories. Therefore, prioritization of rail fracture repair interventions is based on risk level, starting from highest to lowest risk. The research also calculates the cost of handling broken rail repairs, with the best-case scenario occurring in scenario 2, at an inflation rate of 3%. The NPV value obtained is Rp 14,647,888,450, the IRR is 15.18%, and the BCR is 2.59. Meanwhile, the worst-case scenario occurs in scenario 5, with an inflation rate of 8%. The NPV value obtained is Rp 5,000,641,484, the IRR is 13.88%, and the BCR is 8.1.

Keywords: BCR, Infrastructure, Mud Pumping, Railway, Risk

ANALISIS PENYEBAB REL PATAH DENGAN METODE *FAULT TREE ANALYSIS* (FTA) DAN ANALISIS BIAYA PERBAIKANNYA DENGAN METODE *LIFE CYCLE COST* (LCC)

Oleh :

VIOLA NUR ANGGITA PUTRI

Skripsi

**Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar
SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Sipil
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2024**

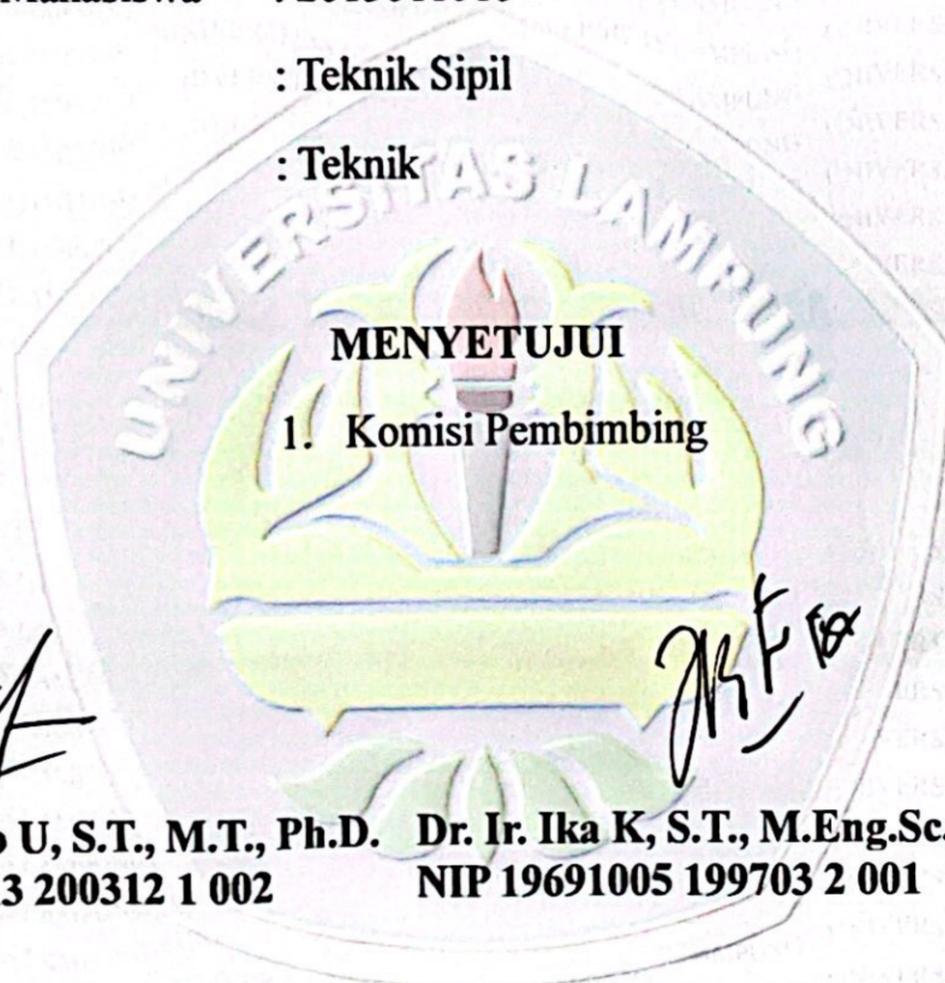
Judul Skripsi : Analisis Penyebab: Rel Patah dengan Metode *Fault Tree Analysis* (FTA) dan Analisis Biaya Perbaikannya dengan Metode *Life Cycle Cost* (LCC)

Nama Mahasiswa : Viola Nur Anggita Putri

Nomor Pokok Mahasiswa : 2015011010

Program Studi : Teknik Sipil

Fakultas : Teknik



Ir. Kristianto U, S.T., M.T., Ph.D.
NIP 19720513 200312 1 002

Dr. Ir. Ika K, S.T., M.Eng.Sc., IPM., ASEAN Eng.
NIP 19691005 199703 2 001

2. Ketua Jurusan Teknik Sipil

3. Ketua Program Studi Teknik Sipil

Sasana Putra, S.T., M.T.
NIP 19691111 200003 1 002

Dr. Suyadi, S.T., M.T.
NIP 19741225200501 1 003

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua

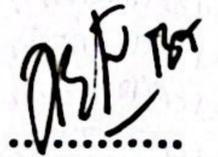
: Ir. Kristianto Usman, S.T., M.T., Ph.D.



.....

Sekretaris

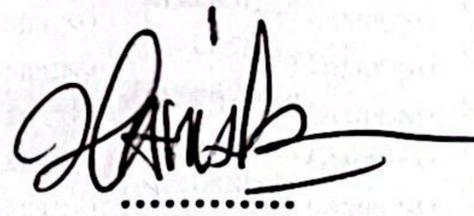
: Dr. Ir. Ika K, S.T., M.Eng.Sc., IPM., ASEAN Eng.



.....

Penguji

Bukan Pembimbing : Ir. Amril Ma'ruf Siregar, S.T., M.T., IPM.



.....

2. Dekan Fakultas Teknik



Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc. }
NIP 19750928 200112 1 002

Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 12 Juli 2024

PERNYATAAN SKRIPSI MAHASISWA

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : **VIOLA NUR ANGGITA PUTRI**

Nomor Pokok Mahasiswa : **2015011010**

Judul : **Analisis Penyebab Rel Patah dengan Metode *Fault Tree Analysis* (FTA) dan Analisis Biaya Perbaikannya dengan Metode *Life Cycle Cost* (LCC)**

Jurusan : **Teknik Sipil**

Dengan ini menyatakan bahwa skripsi ini adalah hasil pekerjaan saya sendiri dan semua tulisan yang tertuang dalam skripsi ini telah mengikuti kaidah karya penulisan ilmiah Universitas Lampung.

Bandar Lampung, 7 Juli 2024
Penulis,



VIOLA NUR ANGGITA PUTRI
NPM. 2015011010

RIWAYAT HIDUP



Viola Nur Anggita Putri lahir di Desa Tambahsari, Kecamatan Gadingrejo, Kabupaten Pringsewu pada 12 Maret 2002. Lahir dari pasangan Bapak Topan Juniar dan Ibu Ira Tularsih Rahayu, dan merupakan anak pertama dari tiga bersaudara. Pendidikan formal ditempuh mulai tahun 2005 di Taman Kanak-kanak Bina Mandiri dan menyelesaikannya pada tahun 2008. Kemudian masuk pendidikan dasar di Sekolah Dasar Negeri 3 Yogyakarta dan lulus pada tahun 2014, lalu melanjutkan pendidikan ke jenjang Sekolah Menengah Pertama di SMPN 1 Pringsewu yang dinyatakan lulus pada tahun 2017 dan Sekolah Menengah Atas di SMAN 1 Gadingrejo dengan jurusan MIPA yang dinyatakan lulus pada tahun 2020. Pada tahun 2020 diterima dan terdaftar sebagai mahasiswa S1 Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN (Seleksi Nasional Masuk Perguruan Tinggi Negeri).

Selama menjadi mahasiswa S1 Teknik Sipil Universitas Lampung, aktif di organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Sipil Universitas Lampung (HIMATEKS UNILA) dan diamanahkan sebagai anggota Departemen PSDM atau Pengembangan Sumber Daya Mahasiswa yakni pada tahun 2021-2022 dan 2022-2024. Pada tahun 2023, melaksanakan Kuliah Kerja Nyata dan diamanahkan sebagai staf Publikasi dan Dokumentasi di Desa Muara Jaya II, Kecamatan Kebun Tebu, Kabupaten Lampung Barat selama 40 hari. Serta berperan aktif selama melaksanakan Kerja Praktik (KP) di Proyek Pembangunan Gedung Radioterapi RS Urip Sumoharjo Bandar Lampung.

Kata Inspirasi

“Tidak ada yang bisa memenangkan setiap pertempuran, tetapi tidak ada orang yang gagal tanpa perjuangan”
(Spider-Man: Homecoming)

“Begitu seseorang merasa pintar, maka saat itu ia berarti bodoh. Sebagaimana begitu seseorang merasa suci, saat itu ia sedang kotor”
(Habib Husein Ja'far Al Hadar)

“Keselamatan manusia tergantung pada kemampuannya menjaga lisan”
(Rasulullah SAW pada H.R. Al Bukhari)

Persembahan

Alhamdulillahirobbil'alamin

Puji Syukur kepada Allah SWT, karena atas limpahan Rahmat dan Karunia-Nya sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik dan tepat waktu. Ku persembahkan karya ku ini kepada:

Mamak, Bapak, dan adik-adikku tercinta

Yang telah senantiasa mendoakan, mendukung, dan selalu memberikan semangat. Kuucapkan pula terima kasih yang sebesar-besarnya karena telah mendidik dan membesarkanku dengan penuh kasih sayang serta pengorbanan yang belum bisa terbalaskan.

Bapak Kristianto Usman, S.T., M.T., Ph. D., Ibu Dr. Ir. Ika Kustiani, S.T., M.Eng.Sc., IPM., ASEAN Eng., dan Bapak Ir. Amril Ma'ruf Siregar, S.T., M.T.

Yang sangat berjasa dan selalu memberikan ilmu dan motivasi selama penyusunan skripsi.

SANWACANA

Puji syukur kepada Tuhan Yang Maha Esa atas limpahan rahmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul “**Analisis Penyebab Rel Patah Dengan Metode *Fault Tree Analysis (FTA)* Dan Analisis Biaya Perbaikannya Dengan Metode *Life Cycle Cost (LCC)***” dengan baik dan tepat waktu.

Selama penyusunan skripsi ini penulis banyak mendapatkan dukungan, bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Untuk itu penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Bapak Dr. Eng. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc., selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung.
2. Bapak Sasana Putra, S.T., M.T., selaku Ketua Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung.
3. Bapak Suyadi, S.T., M.T., selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil Universitas Lampung.
4. Bapak Kristianto Usman, S.T., M.T. Ph.D., selaku dosen Pembimbing Utama yang telah banyak memberikan bimbingan, arahan, serta masukan dan saran kepada penulis.
5. Ibu Dr. Ir. Ika Kustiani, S.T., M.Eng.Sc., IPM., ASEAN Eng., selaku Pembimbing Kedua yang telah memberikan arahan dan masukan dalam penulisan.
6. Bapak Ir. Amril Ma'ruf Siregar, S.T., M.T., selaku Dosen Penguji yang bersedia meluangkan waktu serta memberikan kritik dan saran guna memperbaiki skripsi penulis.
7. Bapak Ir. Ashruri, S.T., M.T., selaku Pembimbing Akademik yang telah memberikan masukan dan motivasinya.
8. Orang tua tercinta (Mamak Ira dan Bapak Topan) dan adik-adikku tersayang Abel dan Mysha, yang selalu mendoakan, mendukung, memberikan semangat,

dan telah menjadi tempat pulang ternyaman, serta senantiasa kebersamaan penulis sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik.

9. Raihan Riwanda, *partner* yang telah menjadi 911 penulis di segala hal dan di segala situasi, yang selalu mendukung, menyemangati, serta menjadi tempat keluh kesah penulis. Terima kasih telah menjadi figur utama dalam dunia perkuliahan penulis.
10. Rekan-rekan Tuair (Lintang, Lili, Rara, Kane, Siwi), lima manusia garda terdepan (Mas Ale, Cahya, Olin, Meyra, Pipit), dan para member *astronaut girls* (Safa, Depa, Melan, Caca), serta rekan-rekan Keluarga Cemara yang telah menemani dalam suka duka serta memberikan dukungan selama menempuh pendidikan di Teknik Sipil Universitas Lampung.
11. Terima kasih juga untuk Keluarga Besar Bringas (Teknik Sipil 2020) yang telah memberikan dukungan dan bantuan selama perkuliahan.

Penulis menyadari bahwa masih banyak kekurangan dalam isi, penulisan dan hasil dalam skripsi ini, sehingga penulis berharap adanya kritik, masukan dan saran dari semua pihak untuk memperbaiki karya-karya selanjutnya. Penulis berharap skripsi ini dapat berguna bagi pembaca dan banyak pihak.

Bandar Lampung, 7 Juli 2024

Penulis,

Viola Nur Anggita Putri

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR GAMBAR.....	iv
DAFTAR TABEL	vi
I. PENDAHULUAN.....	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah.....	3
1.3. Batasan Masalah	3
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	4
1.6. Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1. Kereta Api.....	6
2.2. Jalan Rel.....	6
2.3. Komponen Jalan Rel.....	7
2.3.1. Rel	7
2.3.2. Bantalan.....	9
2.3.3. Penambat.....	11
2.4. Kerusakan Pada Jalan Rel.....	12
2.4.1. Kerusakan Bantalan dan Alat Penambat	12
2.4.2. Kerusakan Balas.....	13
2.4.3. Kerusakan Rel	14
2.5. Risiko	18
2.5.1. Konsep Risiko	18
2.5.2. Penilaian Risiko	20
2.5.3. Analisis Risiko Kuantitatif.....	21
2.5.4. Rencana Respon Risiko.....	22
2.6. Metode <i>Fault Tree Analysis</i> (FTA).....	23

2.6.1.	Pengertian <i>Fault Tree Analysis</i> (FTA).....	23
2.6.2.	Prinsip Kerja Metode <i>Fault Tree Analysis</i> (FTA).....	24
2.6.3.	Simbol dan Istilah dalam Metode <i>Fault Tree Analysis</i> (FTA)....	25
2.6.4.	Kesimpulan Penggunaan <i>Fault Tree Analysis</i> (FTA)	28
2.7.	Metode <i>Life Cycle Cost</i> (LCC)	29
2.7.1.	Pengertian <i>Life Cycle Cost</i> (LCC)	29
2.7.2.	Perhitungan <i>Life Cycle Cost</i> (LCC)	30
2.7.3.	Kesimpulan Penggunaan Metode <i>Life Cycle Cost</i> (LCC).....	31
2.8.	Survei	32
2.8.1.	Pengertian Survei	32
2.8.2.	Tujuan Survei	32
2.8.3.	Manfaat Survei	32
2.8.4.	Contoh Survei (Kuisisioner)	33
2.8.5.	Penentuan Populasi dan Sampel.....	34
2.9.	Penelitian Terdahulu	35
2.10.	Simpulan	38
III.	METODOLOGI PENELITIAN	40
3.1.	Lokasi Penelitian.....	40
3.2.	Studi Literatur	42
3.3.	Metode Pengumpulan Data.....	42
3.3.1.	Data Primer	42
3.3.2.	Data Sekunder	42
3.4.	Metode Analisis Data.....	43
3.4.1.	Penyusunan <i>Fault Tree Analysis</i> (FTA).....	43
3.4.2.	Menganalisis Risiko	43
3.4.3.	Menganalisis Biaya <i>Life Cycle Cost</i> (LCC).....	43
3.5.	Diagram Alir	44
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN.....	45
4.1.	Umum	45
4.2.	Gambaran Lokasi Penelitian	45
4.3.	Pengambilan Data	47
4.3.1.	Data Primer	47
4.3.2.	Data Sekunder	47
4.4.	Pengolahan Data	47

4.5. Hasil Kuisisioner	48
4.5.1. Karakteristik Narasumber	48
4.5.2. Identifikasi Risiko	49
4.6. Analisis Data.....	51
4.6.1. Analisis Sumber Penyebab.....	51
4.6.2. Analisis Nilai Tingkat Risiko.....	55
4.6.3. Analisis Prioritas Penanganan Perbaikan.....	71
4.6.4. Analisis Biaya Menggunakan <i>Life Cycle Cost</i>	74
V. PENUTUP	81
5.1. Kesimpulan	81
5.2. Saran	82

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN A (GAMBAR REL PATAH)

LAMPIRAN B (PETA LINTAS DIVRE IV TNK)

LAMPIRAN C (RAB PENGGANTIAN REL)

LAMPIRAN D (ANALISA HARGA SATUAN PEKERJAAN)

LAMPIRAN E (KUISISIONER)

LAMPIRAN F (PERHITUNGAN BIAYA)

LAMPIRAN G (SURAT IZIN PENELITIAN)

LAMPIRAN H (SURAT DISPOSISI PT. KAI)

LAMPIRAN I (LEMBAR ASISTENSI)

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Peningkatan Pengangkutan Volume Barang KA.	1
Gambar 2. Rekapitulasi Resort Rel Patah Divre III Palembang.	2
Gambar 3. Profil Rel Kereta Api.	7
Gambar 4. Penampang Melintang Profil Rel Kereta Api.	9
Gambar 5. Bantalan Beton.	10
Gambar 6. Bantalan Kayu.	10
Gambar 7. Bantalan Baja.	11
Gambar 8. Penambat Rel.	12
Gambar 9. Kerusakan Pada Bantalan.	13
Gambar 10. Balas Bercampur Dengan Batu Bara.	14
Gambar 11. Patah Pada Sambungan.	15
Gambar 12. Kondisi Rel Patah Pada Wilayah Divre IV Tanjung Karang.	16
Gambar 13. Genangan Air Di Sekitar Rel Kereta Api.	16
Gambar 14. Sambungan Las Yang Tidak Rapih.	17
Gambar 15. Lendutan Pada Rel Kereta Api.	17
Gambar 16. <i>Basic Event</i>	25
Gambar 17. <i>Undeveloped Event</i>	26
Gambar 18. <i>Conditioning Event</i>	26
Gambar 19. <i>External Event</i>	27
Gambar 20. <i>Intermediate Event</i>	27
Gambar 21. <i>Gate OR</i>	28
Gambar 22. <i>Gate AND</i>	28
Gambar 23. <i>Life Cycle Cost Diagram</i>	31
Gambar 24. Identifikasi Risiko Penyebab Rel Patah.	39
Gambar 25. Lokasi Penelitian.	40

Gambar 26. Peta Perjalanan KA.	41
Gambar 27. Diagram Alir Rencana.....	44
Gambar 28. Peta Wilayah Kerja Divre IV Tanjung Karang.	46
Gambar 29. Diagram <i>Fault Tree Analysis</i> Rel Patah.....	54
Gambar 30. <i>Risk Breakdown Structure</i>	56
Gambar 31. Peringkat Risiko Berdasarkan Probabilitasnya	62
Gambar 32. Peringkat Risiko Berdasarkan Dampaknya.....	66
Gambar 33. Grafik Data Inflasi Tahun 2003-2024	78
Gambar 34. Prediksi Tingkat Inflasi Tahun 2024-2054.....	79

DAFTAR TABEL

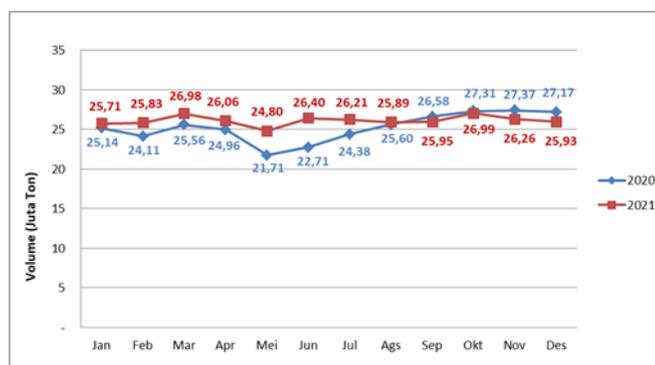
	Halaman
Tabel 1. Karakteristik Penampang Rel.....	8
Tabel 2. Panjang Minimum Rel Panjang	9
Tabel 3. Nilai Tingkat Kemungkinan (<i>Probability</i>).....	20
Tabel 4. Nilai Tingkat Keparahan Dampak (<i>Impact</i>).....	20
Tabel 5. Matriks Kemungkinan dan Dampak	21
Tabel 6. Matriks Penelitian Terdahulu	35
Tabel 7. Karakteristik Narasumber	48
Tabel 8. Hasil Survei Pendahuluan	50
Tabel 9. <i>Intermediate Event</i>	52
Tabel 10. <i>Basic Event</i>	53
Tabel 11. Daftar Risiko	55
Tabel 12. Hasil Survei Probabilitas.....	57
Tabel 13. Hasil Survei Dampak	58
Tabel 14. Matriks Probabilitas	59
Tabel 15. Hasil Tabulasi Penilaian Probabilitas	560
Tabel 16. Skala Dampak	63
Tabel 17. Hasil Tabulasi Penilaian Dampak	59
Tabel 18. Nilai dan Kategori Persepsi Risiko	61
Tabel 19. Penilaian Tingkat Risiko	69
Tabel 20. Kesimpulan Penilaian Tingkat Risiko.....	70
Tabel 21. Penanganan Risiko Tinggi	71
Tabel 22. Penanganan Risiko Menengah	71
Tabel 23. Penanganan Risiko Rendah.....	72
Tabel 24. Penanganan Risiko Sangat Rendah.....	72
Tabel 25. Perlakuan Risiko	73

Tabel 26. Total Biaya Proyek.....	74
Tabel 27. <i>Operational and Maintenance Cost</i> Satu Tahun 18,8 km Rel.....	74
Tabel 28. Rekapitulasi RAB Pidada-Tarahan	75
Tabel 29. Rekapitulasi Pendapatan Kereta Barang Per Tahun	77
Tabel 30. Rekapitulasi Perhitungan Analisis Biaya.....	80

I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Kereta api merupakan salah satu transportasi umum di Indonesia yang mampu mengangkut penumpang secara massal dengan jalur tertentu yang memungkinkan barang atau penumpang dalam waktu yang lebih cepat. Hal tersebut menarik minat masyarakat untuk menggunakan moda kereta api (Rencana Induk Perkeretaapian Nasional, 2018). Dengan meningkatnya jumlah penumpang dan barang, maka frekuensi perjalanan kereta api akan mengalami peningkatan yang disesuaikan dengan permintaan penumpang dan barang (Cahyaningrum & Leliana, 2023).



Gambar 1. Peningkatan Pengangkutan Volume Barang KA.
(Sumber: *Badan Pusat Statistik 2022*)

Dengan meningkatnya volume pengangkutan seperti pada gambar 1, maka diperlukan kondisi prasarana yang memadai. Oleh karena itu, diperlukan upaya perawatan prasarana kereta api salah satunya adalah jalan rel kereta api. Jalan rel kereta api yang tidak dipelihara akan mengalami penurunan kualitas kinerja yang secara fisik akan terjadinya kerusakan, salah satunya rel

patah (Rahayu & Arfis, 2021). Rel yang patah dapat mengganggu lalu lintas kereta api, menyebabkan kerugian finansial, dan membahayakan keselamatan penumpang dan staf kereta api.



Gambar 2. Rekapitulasi Resort Rel Patah Divre III Palembang.
(Sumber: Laporan Tahunan DJKA 2022)

Dalam upaya untuk mengatasi masalah tersebut, kajian penanganan rel patah menjadi penting. Terdapat dua pendekatan yang berpotensi untuk digunakan dalam menangani kasus rel patah, yaitu Metode *Fault Tree Analysis* (FTA) dan *Life Cycle Cost* (LCC). Metode *Fault Tree Analysis* (FTA) digunakan untuk mencari penyebab terjadinya rel patah. Sedangkan Metode *Life Cycle Cost* (LCC) digunakan untuk mencari pendekatan biaya yang ekonomis.

Dengan menggabungkan Metode *Fault Tree Analysis* (FTA) dan Metode *Life Cycle Cost* (LCC), dapat dikembangkan pendekatan yang holistik dan terintegrasi dalam penanganan rel patah. Pendekatan ini tidak hanya mempertimbangkan aspek biaya secara menyeluruh sepanjang siklus hidup rel, tetapi juga mengidentifikasi penyebab potensial patahnya rel dan mengembangkan strategi pencegahan yang efektif.

Dengan demikian, kajian tentang penanganan rel patah diharapkan menjadi salah satu cara untuk memberikan kontribusi signifikan dalam pengembangan praktik terbaik dan kebijakan yang berkelanjutan dalam pengelolaan

infrastruktur rel kereta api, serta meningkatkan keamanan, keandalan, dan efisiensi sistem transportasi rel secara keseluruhan.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka permasalahan yang dibahas adalah:

- a. Apa saja faktor yang menyebabkan patahnya rel dalam sistem transportasi kereta api?
- b. Apa saja penyebab terjadinya rel patah dengan penerapan Metode *Fault Tree Analysis* (FTA)?
- c. Bagaimana analisis nilai tingkat risiko digunakan pada permasalahan rel patah?
- d. Bagaimana hasil rekomendasi yang dapat diberikan dalam penanganan perbaikan rel patah berdasarkan Metode *Life Cycle Cost* (LCC)?

1.3. Batasan Masalah

Permasalahan yang dibahas tentunya harus tepat sasaran dan tidak terlalu luas sehingga perlu adanya pembatasan masalah terhadap bagian-bagian yang akan dikaji dalam penelitian ini, yaitu:

- a. Penelitian ini dilakukan di beberapa titik terjadinya rel patah pada jalur rel kereta api wilayah kerja PT. KAI Divre IV Tanjung Karang.
- b. Penelitian ini menganalisis kerusakan pada rel, dalam hal ini terfokus pada rel patah.

1.4. Tujuan Penelitian

Penelitian ini tentunya dilakukan dengan maksud dan tujuan tertentu, adapun maksud dan tujuannya yaitu:

- a. Mengidentifikasi faktor – faktor yang menyebabkan patahnya rel dalam sistem transportasi kereta api.
- b. Menganalisis penyebab rel patah dengan penerapan Metode *Fault Tree Analysis* (FTA).

- c. Memprioritaskan risiko untuk penanganan perbaikan rel patah dari hasil analisis nilai tingkat risiko.
- d. Mengevaluasi biaya penanganan perbaikan rel patah dengan menggunakan Metode *Life Cycle Cost* (LCC).

1.5. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat bermanfaat bagi semua orang yang membaca tulisan ini. Beberapa manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Diharapkan dapat digunakan untuk meningkatkan perencanaan dan perawatan infrastruktur rel dengan menyesuaikan strategi untuk mengurangi risiko patahnya rel.
- b. Penelitian ini diharapkan dapat digunakan sebagai pertimbangan bagi pengambil keputusan agar dapat mengoptimalkan biaya pengeluaran dalam penanganan perbaikan rel patah.
- c. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi literatur dalam penelitian selanjutnya.

1.6. Sistematika Penulisan

Adapun sistematika dalam penulisan pada penelitian ini terdiri dari sebagai berikut:

BAB I: PENDAHULUAN

Bab ini menjelaskan mengenai latar belakang dilakukannya penelitian, rumusan masalah, batasan-batasan yang diberikan di dalam penelitian, tujuan dari penelitian, dan manfaat yang diperoleh dalam melakukan penelitian, serta sistematika penulisan.

BAB II: TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini menjelaskan mengenai landasan teori maupun studi literatur yang digunakan dalam melakukan penelitian ini.

BAB III: METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini menjelaskan waktu dan lokasi penelitian, alat yang digunakan dalam penelitian, serta tahap – tahap dalam proses penelitian.

BAB IV: HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan mengenai hasil dan pembahasan dari penelitian yang dilakukan.

BAB V: KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini menjelaskan mengenai kesimpulan yang di peroleh selama melakukan penelitian dan saran – saran yang diberikan berdasarkan penelitian yang telah dilakukan.

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Kereta Api

Moda transportasi kereta api merupakan salah satu alternatif angkutan jalan rel bagi penumpang dan barang untuk berpindah dari satu tempat ke tempat lainnya yang berdaya angkut besar (Rahayu & Arfis, 2021). Kereta api biasanya terdiri dari lokomotif yang dikendalikan oleh masinis, dibantu oleh mesin, dan dilengkapi dengan rangkaian kereta atau gerbong yang dapat mengangkut penumpang atau barang dalam jumlah besar. Beberapa negara berusaha memanfaatkannya sepenuhnya sebagai metode transportasi darat utama, baik dalam kota, antarkota, maupun lintas negara, karena sangat efektif untuk transportasi massal.

2.2. Jalan Rel

Menurut (Menteri Perhubungan Republik Indonesia, 2012) menggambarkan bahwa jalur rel adalah struktur kesatuan yang terdiri dari material seperti baja, beton, atau bahan konstruksi lainnya, yang terletak di atas, di bawah, atau permukaan tanah, serta berfungsi sebagai jalur bagi pergerakan kereta api. Secara teknis, jalur rel harus dirancang sedemikian rupa sehingga kereta api dapat melintasinya dengan aman dan nyaman selama umur konstruksinya. Selain itu, rel juga berfungsi sebagai tempat untuk roda kereta api bergerak dan menyalurkan beban dari roda ke bantalan. Jalur rel kereta api merujuk pada rangkaian sejumlah petak rel yang mencakup area jalur kereta api, kepemilikan jalur kereta api, dan area pengawasan, termasuk bagian atas dan bawahnya yang digunakan untuk lalu lintas kereta api.

2.3. Komponen Jalan Rel

Komponen jalan rel merupakan suatu sistem konstruksi terstruktur sebagai prasarana kereta api yang mendukung pergerakan kereta api secara stabil dan aman. Terdapat beberapa komponen – komponen pada konstruksi jalan rel, seperti rel, bantalan, penambat, dan lain – lain. Komponen – komponen tersebut tergabung satu kesatuan pada sebuah sistem konstruksi dan analisis tertentu agar dapat dilalui kereta api dengan aman dan nyaman.

2.3.1. Rel

Rel merupakan komponen dari jalan rel paling penting berupa logam batangan yang disusun secara sejajar dan terletak di atas bantalan rel. Rel memiliki beberapa fungsi, diantaranya:

- a. Mengarahkan pergerakan kereta api
- b. Menopang beban kereta api
- c. Menyalurkan beban ke bantalan rel

Menurut Skandinavy (2021), jenis – jenis rel berdasarkan profilnya yang biasa digunakan terdapat pada gambar 3 berikut ini.



Gambar 3. Profil Rel Kereta Api.
(Sumber: Skandinavy, 2021)

- a. Rel vignola (rel standar); rel yang profilnya digunakan sebagai standar aturan umum bagi jalan rel konvensional.

- b. Rel wesel (rel tidak standar); rel ini memiliki badan yang lebih tebal daripada rel standar, digunakan untuk komponen wesel dan jalan silang, perangkat pemuaian (*expansion device*).
- c. Rel alur; rel yang memiliki lekukan pada permukaan atasnya dan digunakan untuk struktur jalan rel terbatas seperti penggunaan emplasemen, jalan raya.

Jenis rel yang biasa digunakan di Indonesia menggunakan kode R-XX, dimana XX merupakan angka yang menunjukkan berat rel (kg) per meter panjang. Sebagai contoh R54 yang berarti berat rel adalah 54 kg/meter panjang. Berikut ini terdapat tabel karakteristik penampang rel.

Tabel 1. Karakteristik Penampang Rel

Besaran Geometri Rel	Tipe Rel			
	R.42	R.50	R.54	R.60
H (mm)	138	153	159	172
B (mm)	110	127	140	150
C (mm)	68,5	65	72,2	74,3
D (mm)	13,5	15	16	16,5
E (mm)	40,5	49	49,4	51
F (mm)	23,5	30	30,2	31,5
G (mm)	72	76	74,97	80,95
R (mm)	320	500	508	120
A (cm ²)	54,26	64,2	69,34	76,86
W (kg/m)	42,59	50,4	54,43	60,34
Y _b (mm)	68,5	71,6	76,2	80,95
I _x (cm ⁴)	1369	1960	2346	3055

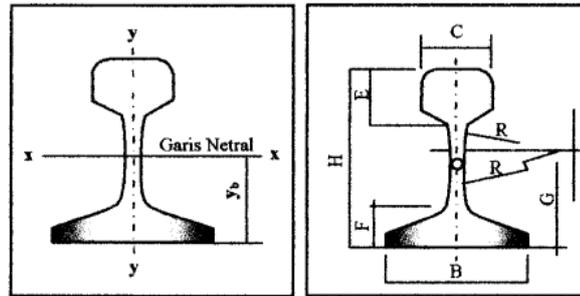
A : luas penampang

W : berat rel per meter

Y_b : momen inersia terhadap sumbu x

I_x : jarak tepi bawah rel ke garis netral

(Sumber: Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60, 2012)



Gambar 4. Penampang Melintang Profil Rel Kereta Api.
(Sumber: Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60, 2012)

Selain itu, menurut panjangnya rel dibedakan menjadi berikut:

- Rel standar adalah rel yang memiliki panjang 25 meter.
- Rel pendek adalah rel yang memiliki panjang maksimum 100 meter.
- Rel panjang adalah rel yang memiliki panjang minimum tercantum pada tabel berikut ini.

Tabel 2. Panjang Minimum Rel Panjang

Jenis Bantalan	R.42	R.50	R.54	R.60
Bantalan Kayu	≥ 300 m	≥ 375 m	≥ 400 m	≥ 425 m
Bantalan Beton	≥ 175 m	≥ 225 m	≥ 250 m	≥ 250 m

(Sumber: Direktorat Prasarana PT Kereta Api Indonesia (persero), 2016)

2.3.2. Bantalan

Bantalan rel merupakan struktur yang ditempatkan di bawah rel untuk menyerap getaran, mengurangi keausan pada rel, serta menjaga stabilitas keamanan jalur kereta api. Bantalan rel juga membantu mendistribusikan beban dari rel ke tanah di sekitarnya secara merata. Bantalan rel dapat terbuat dari berbagai bahan, seperti kayu, beton, baja, serta karet atau plastik. Berikut beberapa jenis bantalan yang digunakan di Indonesia.

a. Bantalan Beton



Gambar 5. Bantalan Beton.
(Sumber: *id.quora.com*)

b. Bantalan Kayu



Gambar 6. Bantalan Kayu.
(Sumber: *flickr.com*)

c. Bantalan Baja



Gambar 7. Bantalan Baja.
(Sumber: Harjawinata, 2018)

2.3.3. Penambat

Komponen dari jalan rel yang memiliki fungsi menambatkan rel pada bantalan disebut penambat. Rel yang ditambatkan pada bantalan bertujuan agar kedudukan rel menjadi tetap, kokoh, dan tidak akan bergeser dari bantalannya. Fungsi penambat rel ini juga dapat membuat jarak diantara kedua rel yaitu lebar sepur menjadi tetap. Kecepatan kereta yang semakin tinggi dan beban kereta yang semakin berat saat melewati jalan rel, maka diperlukannya penambat yang sangat kokoh agar dapat menjamin keamanan dan kenyamanan pengoperasian. Jenis penambat yang biasa digunakan yakni penambat elastis dan kaku.



Gambar 8. Penambat Rel.
(Sumber: Ismail, 2011)

2.4. Kerusakan Pada Jalan Rel

Risiko terjadinya kerusakan pada jalan rel dapat berupa beberapa kerusakan, seperti keausan pada kepala rel dan rel patah. Risiko tersebut dapat mempengaruhi mulai dari aspek keamanan, keselamatan, kenyamanan, serta efektifitas operasional jalan rel kereta api. Pelaksanaan kegiatan perbaikan, penggantian, dan pemeliharaan dari kerusakan yang terjadi dilakukan pemeliharaan yang bersifat mendadak (*urgently*). Hal ini dikarenakan kerusakan yang terjadi tidak dapat diprediksi kapan akan terjadi. Namun pemeliharaan jalan rel tetap dilaksanakan guna mengatasi operasional jalan rel agar tetap berjalan.

2.4.1. Kerusakan Bantalan dan Alat Penambat

Menurut (Lutfi, 2011), di dalam *ARTC Track and Civil Code of Practice SA/WA & VIC Infrastructure Guidelines: Section 2-Sleepers and Fastening*, disebutkan bahwa bantalan dan alat penambat dikatakan rusak apabila bantalan dan/ atau alat penambat tidak dapat berfungsi untuk menahan gaya lateral, longitudinal dan vertikal dari rel di atasnya. Hal ini disebabkan karena berikut:

- a. Bantalan yang pecah, retak, dan atau kerusakan lainnya pada tempat untuk memasang alat penambat sehingga menyebabkan daya cengkram alat penambat terhadap rel dan bantalan melemah.
- b. Bantalan tersebut belah dan lapuk.
- c. Hilangnya bantalan dalam struktur jalan kereta api.
- d. Spesifikasi alat penambat tidak sesuai dengan perencanaan (hilangnya sebagian alat penambat, dll).
- e. Alat penambat yang sudah kendur, hilang atau berkarat. Selain itu bantalan juga dapat dikatakan rusak apabila *rubber pad* yang berfungsi untuk meredam getaran dari rel sudah pecah/ getas.



Gambar 9. Kerusakan Pada Bantalan.
(Sumber: wartakota.tribunnews.com)

2.4.2. Kerusakan Balas

Struktur balas yang baik terdiri dari material balas yang bersih dan memiliki struktur berongga yang dapat ditembus, yang memungkinkan perputaran udara, penguapan, dan pengaliran air dari lapisan dasar balas. Lapisan balas menjadi rusak dimana butiran batu balas yang berukuran dan bentuknya mengalami degradasi dan sebagian hancur. Selain pergerakan kereta api, aktivitas pemecokan yang dilakukan untuk memperbaiki geometri jalan rel juga menyebabkan kerusakan pada lapisan balas. Bentuk batu balas dirusak secara langsung oleh alat pemecok saat butiran batu balas dipukul dengan tujuan memadatkan balas di bawah bantalan.

Debu – debu atau material halus yang dihasilkan dari pemrosesan butiran batu balas menjadi material yang mengotori lapisan balas. Air hujan mengubah debu ini menjadi lumpur, yang kemudian dapat melemahkan struktur jalan kereta api. Material lain yang mengotori lapisan balas terutama bagian permukaan adalah elemen dengan butiran kecil dan kotoran yang disebabkan oleh muatan kereta api, seperti minyak, gemuk, bara, dan bahan tepung.



Gambar 10. Balas Bercampur Dengan Batu Bara.
(Sumber: Laporan Tahunan DJKA 2022)

2.4.3. Kerusakan Rel

Kerusakan yang terjadi pada rel biasanya merupakan proses *fatigue material* jalan rel dalam masa pelayanannya. Dimulai dari retakan kecil lalu berkembang menjadi besar dan akhirnya patah. Selain itu, rel juga dapat mengalami keausan pada bagian kepala rel sehingga menyebabkan perjalanan KA menjadi tidak aman.

2.4.3.1 Keausan Kepala Rel

Bagian yang sering mengalami keausan dalam rel umumnya terletak di bagian kepala rel karena itulah yang bersentuhan langsung dengan roda kereta. Oleh karena itu, untuk mendapatkan umur rel yang lebih panjang maka bagian kepala diperbesar. Ketika kereta melintasi tikungan, risiko keausan semakin

tinggi karena tekanan dari roda pada kepala rel meningkat. Pemantauan keausan pada kepala rel biasanya dilakukan secara manual dengan mengukur langsung atau menggunakan peralatan khusus seperti kereta ukur mekanik.

2.4.3.2 Rel Patah

Rel patah merupakan kondisi di mana bagian dari rel kereta api mengalami retakan atau pecah sehingga tidak lagi mampu mendukung pergerakan kereta api secara efektif. Kondisi ini bisa disebabkan oleh berbagai faktor seperti kelelahan material, beban berlebih, atau kerusakan struktural lainnya. Rel yang patah perlu segera diperbaiki atau diganti agar keamanan dan kelancaran operasi kereta api dapat dipertahankan.

Rel patah pada sambungan merupakan risiko kerusakan yang terjadi akibat tidak sempurnanya pelaksanaan sambungan antar rel. Selain itu patah pada sambungan juga dapat terjadi akibat lenturan track (*Creep of rails*) atau genjotan pada rel. Akibat genjotan ini, menyebabkan putusnya baut penyambung yang berakibat risiko patahnya sambungan (Rotua Sitorus, 2021).



Gambar 11. Patah Pada Sambungan.
(Sumber: Laporan Tahunan DJKA 2022)

Selain itu beberapa penyebab patahnya rel menurut Laporan Tahunan DJKA (2022) sebagai berikut:

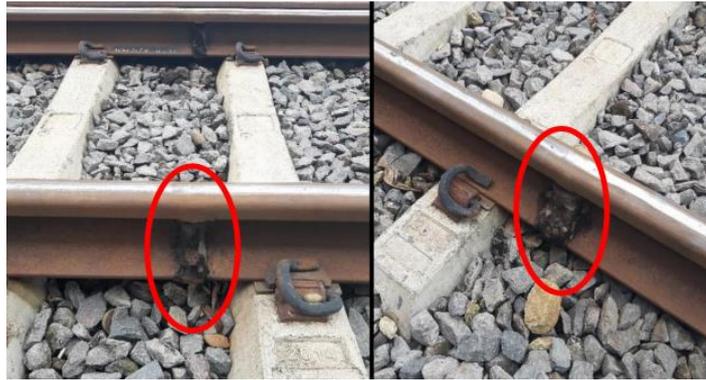


Gambar 12. Kondisi Rel Patah Pada Wilayah Divre IV Tanjung Karang.
(Sumber: Laporan Tahunan DJKA 2022)



Gambar 13. Genangan Air Di Sekitar Rel Kereta Api.
(Sumber: Laporan Tahunan DJKA 2022)

Pada gambar 12 dan 13 dapat dilihat kondisi rel yang patah pada wilayah Divre IV Tanjung Karang. Kondisi tersebut disebabkan karena belum adanya drainase di sekitar rel kereta api sehingga terdapat genangan yang dapat mengakibatkan air pada lapisan balas tidak teralirkan dengan baik dan mengurangi kemampuan lapisan balas dalam menyalurkan beban ke tanah dasar.



Gambar 14. Sambungan Las Yang Tidak Rapih.
(Sumber: Laporan Tahunan DJKA 2022)

Sambungan las yang tidak rapih juga menjadi salah satu penyebab terjadinya rel patah menurut Laporan Tahunan DJKA (2022). Hal tersebut dapat dilihat dari gambar 14 yang menunjukkan sambungan las yang kurang rapih, akibatnya rel kurang dapat menahan beban di atasnya sehingga dapat memicu terjadinya rel patah.



Gambar 15. Lendutan Pada Rel Kereta Api.
(Sumber: Laporan Tahunan DJKA 2022)

Lendutan yang terjadi seperti pada gambar 15 diakibatkan oleh rotasi tanah yang terjadi karena tingkat kejenuhan air tanah yang tinggi akibat kurang optimalnya *cross drain* di kanan dan kiri jalur kereta api. Hal ini dapat berimplikasi terhadap menurunnya kualitas dari balas, sehingga memungkinkan terjadinya rel patah akibat tidak kuatnya tubuh balas menahan beban dari kereta api yang melaju di atasnya.

2.5. Risiko

2.5.1. Konsep Risiko

Risiko adalah kemungkinan atau potensi terjadi kerugian, bahaya, atau dampak negatif lain akibat suatu kegiatan atau kejadian. Hal ini melibatkan ketidakpastian tentang hasil yang diharapkan dan kemungkinan terjadinya peristiwa yang tidak diinginkan. Risiko sesuai konteks penggunaannya memiliki definisi yang berbeda – beda. Risiko dapat dikurangi dengan investasi modal namun seringkali menjadi sangat mahal untuk menghindarinya sepenuhnya. Dengan demikian, batas aman dievaluasi berdasarkan konsekuensi kerugian, frekuensi kejadian, investasi dalam kegiatan pemeliharaan, serta kondisi pengoperasian dan lingkungan.

Menurut (Fathoni, 2020), kegiatan yang perlu dilakukan untuk mengidentifikasi risiko bisa dimulai dengan mengenali jenis – jenis risiko yang mungkin dihadapi oleh setiap pelaku. Identifikasi bisa dilakukan dengan melihat asal dan problemnya, yaitu:

a. Analisis sumber

1. Risiko Internal (dibawah kontrol manajer proyek): Non-technical Risks (manusia, material, finansial), keterlambatan jadwal, cost over runs, interruptions in cash flow, risiko teknis, desain, konstruksi, operasi.
2. Risiko eksternal (diluar kontrol manajer proyek): perubahan peraturan, bencana alam.

b. Analisis problem

Risiko berhubungan dengan kekhawatiran. sebagai contoh: khawatir kehilangan uang, melanggar informasi yang bersifat privat atau khawatir akan terjadi kecelakaan dan korban.

Adapun metode identifikasi risiko yang umum dipakai adalah:

- a. Identifikasi risiko berdasarkan tujuan
Perusahaan dan tim proyek mempunyai tujuan-tujuan. Setiap kejadian yang membahayakan pencapaian tujuan secara sebagian atau menyeluruh diidentifikasi sebagai risiko.
- b. Identifikasi risiko berdasarkan skenario
Dalam analisis skenario, skenario – skenario yang berbeda diciptakan. Skenario – skenario mungkin menjadi jalan alternatif untuk mencapai tujuan, atau sebuah analisis dari hubungan kekuatan.
- c. Identifikasi risiko berdasarkan taksonomi
Berdasarkan taksonomi dan pengetahuan praktek yang ada, daftar pertanyaan disusun. Jawaban dari pertanyaan – pertanyaan menunjukkan adanya risiko.
- d. *Common-risk checking*
Dari beberapa daftar risiko yang sudah biasa terjadi, dilakukan pemilihan mana yang sesuai untuk proyek yang ditangani.

Sedangkan berikut ini merupakan teknik yang dapat digunakan dalam mengidentifikasi risiko (Guntara, 2017):

- a. *Brainstorming*
Pada tahap ini dilakukan pendataan ide – ide semua kemungkinan risiko yang akan terjadi serta mengelompokkan risiko tersebut. Selain itu juga ditambahkan informasi mengenai masalah – masalah yang terjadi dan cara penanganannya.
- b. *Interviewing*
Melakukan wawancara/*interview* terhadap para *stakeholder*.
- c. Penyebaran Kuisisioner
Teknik yang digunakan untuk mendapatkan masukan dari para ahli/pakar yang relevan dengan proyek. Ide – ide mengenai risiko yang akan timbul ditampung dalam kuisisioner kemudian para ahli/pakar diminta untuk memberikan pendapat dan komentar terhadap kuisisioner tersebut.

2.5.2. Penilaian Risiko

Potensi bahaya yang ditemukan pada tahap identifikasi bahaya akan dilakukan penilaian risiko guna menentukan tingkat risiko (*Risk rating*) dari bahaya tersebut. Analisis risiko dilakukan untuk menentukan besarnya suatu risiko dengan mempertimbangkan tingkat keparahan atau kemungkinan yang mungkin terjadi. Penilaian risiko dilakukan dengan berpedoman pada skala *Australian Standard/New Zealand Standard for Risk Management (AS/NZS 4360:2004)*.

Tabel 3. Nilai Tingkat Kemungkinan (*Probability*)

Tingkat	Deskripsi	Keterangan
5	<i>Almost certain</i>	Pasti terjadi, terjadi lebih dari 12 kali dalam 1 tahun
4	<i>Likely</i>	Sering terjadi, terjadi 9-12 kali dalam 1 tahun
3	<i>Possible</i>	Biasa terjadi, terjadi 5-8 kali dalam 1 tahun
2	<i>Unlike</i>	Mungkin terjadi, terjadi 1-4 kali dalam 1 tahun
1	<i>Rare</i>	Terjadi 1 kali dalam masa lebih dari 1 tahun

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

Tabel 4. Nilai Tingkat Keparahannya 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

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

Setelah mengetahui nilai dari skala indeks tersebut, langkah selanjutnya adalah menghitung nilai dari *risk score* menggunakan rumus:

$$R = P \times I \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan:

R = Tingkat risiko (*Risk Risiko*)

P = Kemungkinan risiko yang terjadi (*Probability*)

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

Tabel 5. Matriks Kemungkinan dan Dampak

Kemungkinan (Probability)	Dampak (Impact)				
	I	II	III	IV	V
A	Sangat Rendah	Rendah	Menengah	Tinggi	Sangat Tinggi
B	Sangat Rendah	Rendah	Menengah	Menengah	Tinggi
C	Sangat Rendah	Rendah	Rendah	Menengah	Menengah
D	Sangat Rendah	Sangat Rendah	Rendah	Rendah	Rendah
E	Sangat Rendah	Sangat Rendah	Sangat Rendah	Sangat Rendah	Sangat Rendah

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

2.5.3. Analisis Risiko Kuantitatif

Proses analisis risiko kuantitatif memberikan perkiraan numerik mengenai dampak keseluruhan risiko terhadap tujuan proyek, berdasarkan rencana dan informasi saat ini ketika mempertimbangkan risiko secara bersamaan. Hasil dari analisis jenis ini dapat digunakan untuk mengevaluasi kemungkinan keberhasilan dalam mencapai tujuan proyek dan memperkirakan cadangan kontingensi, biasanya dalam hal waktu dan biaya yang sesuai dengan risiko dan toleransi risiko para pelaku kepentingan proyek. Prosedur analisis risiko kuantitatif diantaranya:

a. Estimasi tiga poin

Digunakan untuk menentukan skenario biaya minimum, kemungkinan besar, dan biaya maksimum jika risiko tertentu terjadi. Digunakan untuk menentukan biaya hasil yang realistis dari risiko tersebut berdasarkan peringkat dampak/probabilitasnya dan estimasi minimum, yang paling mungkin, dan estimasi maksimum.

b. Simulasi Monte Carlo

Simulasi proyek menggunakan model yang menerjemahkan ketidakpastian yang ditentukan pada tingkat terperinci menjadi dampak

potensial terhadap tujuan proyek. Simulasi biaya proyek biasanya dilakukan dengan menggunakan teknik Monte Carlo.

Adapun hasil proses melakukan analisis kuantitatif ialah cadangan kontingensi yang dihitung dalam biaya proyek kuantitatif dan analisis risiko jadwal masing – masing dimasukkan ke dalam perkiraan biaya dan jadwal untuk menetapkan target yang bijaksana dan harapan yang realistis untuk proyek tersebut. Cadangan darurat juga dapat dibentuk untuk menangkap peluang yang dinilai sebagai prioritas proyek. Jika cadangan kontingensi yang diperlukan melebihi waktu atau sumber daya yang tersedia, perubahan dalam ruang lingkup dan rencana proyek dapat terjadi.

Selain itu, hasil analisis dapat memberikan tingkat urgensi terhadap respons tergantung pada kemungkinan tercapainya tujuan rencana atau jumlah cadangan kontingensi yang diperlukan untuk memberikan tingkat kepercayaan yang diperlukan.

2.5.4. Rencana Respon Risiko

Tujuan dari proses *Plan Risk Responses* adalah untuk menentukan serangkaian tindakan yang paling meningkatkan risiko peluang keberhasilan proyek sambil mematuhi batasan organisasi dan proyek yang berlaku.

Setelah risiko diidentifikasi, dianalisis, dan diprioritaskan, rencana harus dikembangkan untuk mengatasi setiap risiko yang dianggap cukup penting oleh tim proyek, baik karena ancaman terhadap tujuan proyek maupun peluang yang ditawarkan. Perencanaan memerlukan persetujuan atas tindakan yang akan diambil dan potensi perubahan terhadap anggaran, jadwal, sumber daya, dan ruang lingkup yang mungkin ditimbulkan oleh tindakan tersebut.

Berbagai faktor penting bagi keberhasilan proses *plan risk responses*, diantaranya:

- a. Berkomunikasi
- b. Mendefinisikan secara jelas peran dan tanggung jawab terkait risiko
- c. Menentukan waktu respons risiko
- d. Menyediakan sumber daya, anggaran, dan jadwal tanggapan
- e. Mengatasi interaksi risiko dan respons
- f. Memastikan respons yang tepat, tepat waktu, efektif, dan disepakati
- g. Mengatasi ancaman dan peluang
- h. Mengembangkan strategi sebelum respons taktis

2.6. Metode *Fault Tree Analysis* (FTA)

2.6.1. Pengertian *Fault Tree Analysis* (FTA)

Metode *Fault Tree Analysis* (FTA) atau biasa sering disebut dengan diagram analisis pohon kesalahan merupakan model grafik dari berbagai kombinasi dan bertujuan untuk menganalisis permasalahan dan keadaan yang tidak diinginkan pada sistem dalam suatu proses (Yolanda & Ekawati, 2023). *Fault Tree Analysis* (FTA) dapat menghubungkan beberapa rangkaian kejadian yang menghasilkan kejadian lain. Keunggulan metode *Fault Tree Analysis* (FTA) yaitu sebagai metode kualitatif yang mempunyai kemampuan mengidentifikasi rangkaian kejadian penyebab terjadinya risiko serta dapat menunjukkan hasil yang lebih rinci (Sari et al., 2023).

Berikut langkah-langkah dalam *Fault Tree Analysis* FTA menurut Priyanta dalam Hanifah (2022):

- a. Menentukan kejadian/peristiwa yang penting dalam suatu sistem (*top event*). Pada tahap ini dibutuhkan pemahaman tentang sistem dan pengetahuan tentang jenis kerusakan (*undesired event*) untuk

mengidentifikasi faktor dari permasalahan yang timbul pada sistem. Permasalahan atau kegagalan pada sistem dilakukan dengan memahami atau mempelajari semua informasi yang berkaitan tentang sistem dan ruang lingkupnya.

- b. Selanjutnya membuat pohon kegagalan. Dimana pada tahap ini, *cause and effect diagram* dapat digunakan untuk menentukan kesalahan dan mencari akar kerusakan atau kegagalan. Pembuatan pohon kesalahan menggunakan simbol – simbol *Boolean*.
- c. Langkah selanjutnya yaitu menganalisis pohon kegagalan apakah kualitatif atau kuantitatif. Pada tahap ini diperlukan dalam memperoleh informasi yang jelas dari suatu sistem dan perbaikan apa yang harus dilakukan pada sistem. Ada 3 tahap menganalisis pohon kesalahan, yaitu:
 1. Menyederhanakan pohon kegagalan.
Tujuan dalam menyederhanakan pohon kegagalan ini adalah untuk mempermudah dalam melakukan analisis sistem lebih lanjut.
 2. Menentukan peluang munculnya kejadian atau peristiwa terpenting dalam sistem (*top event*). Setelah itu harus ditentukan peringkat kombinasi kejadiannya (*minimal cut set ranking*).
 3. Mereview hasil analisis
Review hasil analisis ini dilakukan untuk mengetahui kemungkinan perbaikan yang dilakukan pada sistem.

2.6.2. Prinsip Kerja Metode *Fault Tree Analysis* (FTA)

Prinsip kerja Metode *Fault Tree Analysis* (FTA) menurut Kristiansen dalam Hanifah (2022), adalah:

- a. Kegagalan sistem/kecelakaan.
- b. *Fault tree analysis* (FTA) terdiri dari urutan peristiwa yang mengarah kepada kegagalan sistem/kecelakaan.
- c. Membuat urutan peristiwa dengan menggunakan gerbang logika “AND” atau “OR” atau gerbang logika lainnya.
- d. Kejadian di atas dan semua peristiwa terdapat beberapa penyebab dan ditandakan dengan persegi panjang dan kejadian yang dijelaskan dengan persegi panjang.

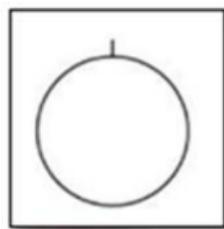
2.6.3. Simbol dan Istilah dalam Metode *Fault Tree Analysis* (FTA)

Simbol – simbol yang digunakan adalah simbol kejadian, simbol gerbang, dan simbol transfer, berikut adalah simbol dan pengertian dari setiap simbol, baik simbol kejadian, simbol transfer, dan simbol gerbang yang digunakan pada Metode *Fault Tree Analysis* (FTA) menurut Kristiansen dalam Hanifah (2022), adalah:

a. Simbol Kejadian

Simbol kejadian adalah simbol – simbol yang berisi keterangan kejadian pada sistem yang ada pada suatu proses terjadinya top event. Terdapat 5 simbol yaitu:

1. *Basic Event/Primary Event*

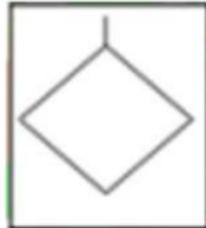


Gambar 16. *Basic Event*.
(Sumber: *Blanchard* dalam Hanifah, 2022)

Basic event yang disimbolkan dengan lingkaran ini digunakan untuk menyatakan *basic event* atau *primary event* atau kegagalan mendasar

yang tidak perlu dicari penyebabnya yang sudah pasti gagal. Artinya, simbol lingkaran ini merupakan batas akhir penyebab suatu kejadian.

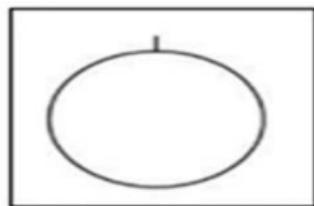
2. *Undeveloped Event*



Gambar 17. *Undeveloped Event*.
(Sumber: Blanchard dalam Hanifah, 2022)

Undeveloped event yang disimbolkan dengan diamond ini digunakan untuk menyatakan *undeveloped event* atau kejadian yang tidak dapat berkembang, yaitu suatu kejadian kegagalan tertentu yang tidak dicari penyebab lagi, baik karena kejadiannya tidak cukup berhubungan atau karena tidak tersedia informasi yang terkait dengannya sehingga menjadi satu kejadian akhir dari suatu masalah yang terjadi pada suatu penelitian.

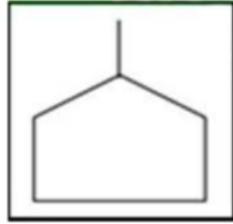
3. *Conditioning Event*



Gambar 18. *Conditioning Event*.
(Sumber: Blanchard dalam Hanifah, 2022)

Conditioning event ini untuk menyatakan *conditioning event*, yaitu suatu kondisi atau batasan khusus yang diterapkan pada suatu gerbang. Jadi pada kejadian ini kejadian output terjadi apabila kejadian input terjadi dan memenuhi suatu kondisi tertentu.

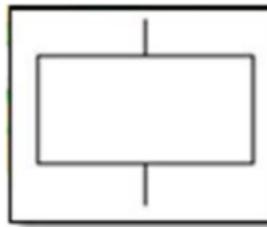
4. *External Event*



Gambar 19. *External Event*.
(Sumber: Blanchard dalam Hanifah, 2022)

External event yang disimbolkan seperti gambar di atas digunakan untuk menyatakan *external event* yaitu kejadian yang diharapkan muncul secara normal dan tidak termasuk dalam kejadian gagal.

5. *Intermediate Event*



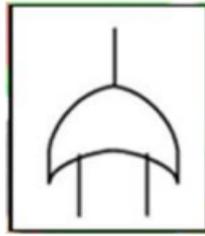
Gambar 20. *Intermediate Event*.
(Sumber: Blanchard dalam Hanifah, 2022)

Intermediate event yang disimbolkan dengan persegi panjang ini berisi kejadian yang muncul dari kombinasi kejadian – kejadian input gagal yang masuk ke gerbang.

b. Simbol *Logic Gate*

Simbol *logic gate* digunakan untuk menunjukkan hubungan antara kejadian input yang mendekati kejadian output, juga disebut dengan kejadian output disebabkan karena kejadian input yang saling berhubungan dengan cara – cara tertentu pada sebuah proses suatu sistem.

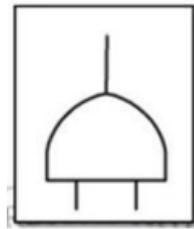
1. *Gate OR*



Gambar 21. *Gate OR*.
(Sumber: Blanchard dalam Hanifah, 2022)

Gate OR ini digunakan untuk menunjukkan bahwa kejadian yang akan terjadi jika satu atau lebih kejadian yang gagal dan input nya itu terjadi.

2. *Gate AND*



Gambar 22. *Gate AND*.
(Sumber: Blanchard dalam Hanifah, 2022)

Gate AND ini digunakan untuk input nya terjadi apabila semua kejadian output terjadi.

2.6.4. Kesimpulan Penggunaan *Fault Tree Analysis* (FTA)

Fault Tree Analysis (FTA) merupakan metode grafis yang digunakan untuk menganalisis permasalahan dan keadaan yang tidak diinginkan dalam suatu sistem, dengan tujuan mengidentifikasi risiko penyebab kegagalan. Keunggulan FTA terletak pada kemampuannya sebagai metode kualitatif yang mampu mengidentifikasi rangkaian kejadian penyebab risiko secara rinci. Langkah – langkah dalam FTA meliputi menentukan kejadian penting

dalam sistem, membuat pohon kegagalan, dan menganalisisnya secara kualitatif atau kuantitatif. Prinsip kerja FTA didasarkan pada urutan peristiwa yang mengarah kepada kegagalan sistem atau kecelakaan, dengan menggunakan *logic gate* "AND" atau "OR". Simbol – simbol yang digunakan dalam FTA, seperti simbol kejadian dan simbol *logic gate* yang memfasilitasi representasi hubungan antara kejadian input dan output dalam sistem.

Output yang dihasilkan dalam pembuatan (FTA) adalah peluang munculnya kejadian terpenting dalam suatu kejadian dan memperoleh faktor kegagalan dari suatu permasalahan. Kemudian faktor permasalahan tersebut digunakan untuk memperoleh perbaikan permasalahan yang tepat pada sistem.

2.7. Metode *Life Cycle Cost* (LCC)

2.7.1. Pengertian *Life Cycle Cost* (LCC)

Definisi dari *Life Cycle Cost* (LCC) menurut Fuller dan Petersen (1996) di (Resqullah, 2021) adalah suatu metode ekonomi dalam mengevaluasi proyek dari semua biaya yang timbul mulai dari biaya kepemilikan, pengoperasian, pemeliharaan, hingga pelepasan atau pencabutan proyek yang dianggap berpotensi sangat penting dalam pengambilan keputusan. Sedangkan menurut Glucha dan Baumann (2003) di (Resqullah, 2021), *Life Cycle Cost* (LCC) merupakan jumlah biaya total suatu produk, proses atau aktivitas yang didiskon selama masa pakainya. Sehingga dapat ditarik bahwa *Life Cycle Cost* (LCC) adalah pendekatan analisis biaya yang menyeluruh untuk mengevaluasi biaya total selama siklus hidup suatu sistem atau fasilitas, termasuk biaya awal, biaya operasional, biaya pemeliharaan, dan biaya akhir. Aspek – aspek biaya yang berkaitan dengan siklus hidup sebuah produk muncul pada titik waktu yang berbeda.

LCC merupakan alat yang sangat penting untuk membantu dalam memutuskan alternatif investasi mana (yang memenuhi persyaratan kinerja

yang ditentukan) yang dapat memberikan harga/pembiayaan jangka panjang terbaik. Biaya yang dihitung di LCC mencakup seluruh biaya mulai dari awal pembelian atau pengadaan hingga akhir masa pakai atau pemilihan opsi terbaik yang terdiri dari dua fase besar yaitu fase akuisisi dan operasional. Semua biaya di atas harus dihitung dan dijumlahkan untuk mendapatkan total biaya selama umur operasional atau umur aset (Tri Maulana & Gunawan, 2023). Dengan mengetahui total biaya, pengambil keputusan dapat memilih opsi yang paling efisien dari sudut pandang keuangan, misalnya dengan menggunakan perhitungan *Present Value*, *Future Value*, *Annuity Worth*, atau *Internal Rate Return* (Iskandar et al., 2016)

2.7.2. Perhitungan *Life Cycle Cost* (LCC)

LCC tersusun dari biaya awal, biaya perawatan dan operasional (*M & O Cost*), biaya perubahan dan penggantian (*alteration and replacement cost*) serta nilai sisa (*salvage value*) (Iskandar et al., 2016).

$$\text{LCC} = \text{I} + \sum \text{Pv} - \text{Pv} \dots\dots\dots(2.2)$$

Keterangan:

LCC = *Life cycle cost*

I = Biaya investasi pada tahun ke 0 (berupa investasi dan *loan*)

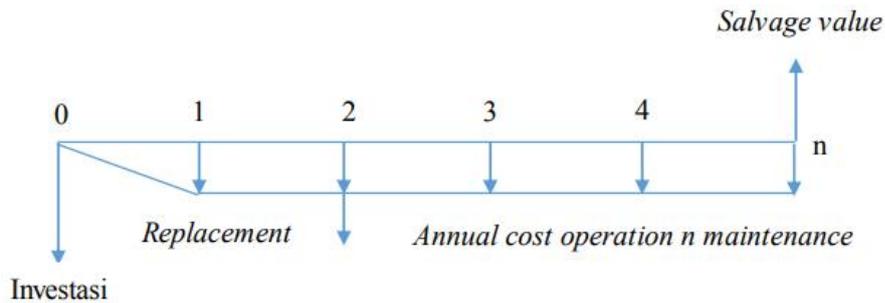
$\sum \text{Pv}$ (*operation and maintenance*)

= *Present value* tahun ke 0 dari seluruh biaya *operation and maintenance* (*utilities, maintenance, replacement, service, etc.*)

Pv (*salvage value*)

= *Present value* dari nilai sisa

Dalam perhitungan *life cycle cost*, semua biaya yang terjadi diakumulasikan dan dirubah ke *present value* pada tahun ke 0 sehingga dapat digambarkan seperti berikut.



Gambar 23. *Life Cycle Cost Diagram.*
(Sumber: Nugroho, 2014)

Dimana:

$$\sum Pv = \sum [(P/A, i, n) \times \text{biaya operasional tahunan}] + [(P/A, i, n) \times \text{biaya perbaikan tahunan}]$$

$$Pv = (P/F, i, n) \times \text{Salvage value}$$

$(P/A, i, n)$ = faktor untuk mencari nilai *present* dari *annual value*

$$= \frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \dots \dots \dots (2.3)$$

$(P/F, i, n)$ = faktor untuk mencari nilai *present* dari *future value*

$$= \frac{1}{(1+i)^n} \dots \dots \dots (2.4)$$

Keterangan:

A = *annual value*

P = *present value*

F = *future value*

n = periode

i = % bunga per tahun

2.7.3. Kesimpulan Penggunaan Metode *Life Cycle Cost* (LCC)

Life Cycle Cost (LCC) merupakan pendekatan analisis biaya yang menyeluruh dalam mengevaluasi biaya total selama siklus hidup suatu sistem atau fasilitas, meliputi biaya awal, biaya operasional, biaya pemeliharaan, dan biaya akhir. LCC digunakan sebagai alat penting dalam pengambilan

keputusan investasi untuk memilih opsi yang paling efisien dari sudut pandang keuangan. Perhitungan LCC melibatkan akumulasi dan penyesuaian semua biaya ke *present value* pada tahun ke-0, termasuk biaya investasi awal, biaya operasional tahunan, biaya perawatan, biaya penggantian, serta nilai sisa. Dengan demikian, LCC memberikan gambaran yang komprehensif tentang total biaya selama umur operasional atau umur aset suatu sistem atau suatu fasilitas.

2.8. Survei

2.8.1. Pengertian Survei

Menurut Kamus Besar Bahasa Indonesia (KBBI), survei merupakan teknik riset dengan memberi batas yang jelas atas data penyelidikan atau peninjauan. Survei dalam penelitian biasanya dilakukan dengan menyebarkan kuesioner atau wawancara.

2.8.2. Tujuan Survei

Ada berbagai tujuan melakukan survei, antara lain:

- a. Memaparkan data yang berasal dari objek penelitian.
- b. Menginterpretasikan serta menganalisis dengan sistematis.
- c. Mengumpulkan data secara sederhana.
- d. Menerangkan dan menjelaskan fenomena.

2.8.3. Manfaat Survei

Survei memberikan sejumlah manfaat, seperti:

- a. Agar mendapatkan fakta yang berasal dari gejala yang ada.
- b. Mencari keterangan faktual yang berasal dari kelompok, daerah dan lainnya.

- c. Melakukan evaluasi dan perbandingan pada hal yang sudah dilakukan orang lain untuk menangani hal serupa.
- d. Untuk membuat rencana serta pengambilan keputusan.

2.8.4. Contoh Survei (Kuisisioner)

Kuisisioner atau angket merupakan teknik pengumpulan data yang dilakukan dengan cara memberikan seperangkat pertanyaan atau pernyataan tertulis kepada responden untuk dijawabnya (Nurani, 2021). Terdapat 2 jenis angket, yakni sebagai berikut:

- a. Angket Tertutup

Angket tertutup adalah angket yang disajikan dalam bentuk sedemikian rupa sehingga responden tinggal memberikan tanda centang (√) pada kolom atau tempat yang sesuai (Suharsimi, 1995).

Angket tertutup juga merupakan jenis angket yang setelah rumusan pertanyaannya disediakan pula alternatif jawaban yang dapat dipilih responden. Angket tertutup dibedakan menjadi tiga bentuk, yakni:

1. Angket tertutup dengan pertanyaan tertutup

Angket ini merupakan angket yang telah menyediakan alternatif jawaban yang harus dipilih responden tanpa kemungkinan jawaban lain.

2. Angket tertutup dengan pertanyaan terbuka

Angket ini adalah jenis pertanyaan angket dengan alternatif jawaban berbentuk pilihan ganda, tetapi peneliti berasumsi dari jawaban yang telah disediakan untuk setiap pertanyaan mungkin tidak ada jawaban yang sesuai. Karena itu, responden perlu diberikan kesempatan untuk menyampaikan jawaban lain.

3. Angket berstruktur dengan jawaban singkat

Adapun angket berstruktur dengan jawaban singkat adalah kombinasi antara angket terbuka dan angket tertutup.

b. Angket Terbuka

Angket terbuka adalah angket yang disajikan dalam bentuk sedemikian rupa sehingga responden dapat memberikan isian sesuai dengan kehendak dan keadaannya (Suharsimi, 1995).

Jawaban bebas di sini artinya adalah uraian berupa pendapat, hasil pemikiran, tanggapan, dan lain – lain mengenai segala sesuatu yang dipertanyakan dalam setiap item pada angket.

2.8.5. Penentuan Populasi dan Sampel

a. Populasi

Populasi adalah wilayah generalisasi yang terdiri atas objek atau subjek yang mempunyai kualitas dan karakteristik tertentu yang ditetapkan oleh peneliti untuk dipelajari dan kemudian ditarik kesimpulan (Nurani, 2021).

b. Sampel

Menurut (Nurani, 2021), sampel adalah bagian dari jumlah dan karakteristik yang dimiliki oleh populasi tersebut. Bila populasi besar, dan peneliti tidak mungkin mempelajari semua yang ada pada populasi, misalnya karena keterbatasan dana, tenaga dan waktu, maka peneliti dapat menggunakan sampel yang diambil dari populasi itu.

Sugiyono mengelompokkan teknik pengambilan sampel menjadi 2 (dua) yaitu *probability sampling* dan *nonprobability sampling*. *Probability sampling* yaitu teknik pengambilan sampel yang memberikan peluang yang sama bagi setiap unsur (anggota) populasi untuk dipilih menjadi anggota sampel. Teknik sampel ini meliputi *simple random sampling*,

proportionate stratified random sampling, disproportionate stratified random sampling, dan area (cluster) sampling (sampling menurut daerah).

Sedangkan *nonprobability sampling* yaitu teknik pengambilan sampel yang tidak memberi peluang/kesempatan yang sama bagi setiap unsur (anggota) populasi untuk dipilih menjadi anggota sampel. Teknik sampel ini meliputi *sampling* sistematis, *sampling* kuota, *sampling* insidental, *purposive sampling*, *sampling* jenuh, dan *snowball sampling*. Pada penelitian ini digunakan teknik pengambilan sampel dengan cara *purposive sampling*. *Purposive sampling* merupakan teknik penentuan sampel dengan pertimbangan tertentu.

2.9. Penelitian Terdahulu

Penelitian ini merujuk pada beberapa penelitian terdahulu yang telah dilakukan. Rujukan tersebut antara lain adalah:

Tabel 6. Matriks Penelitian Terdahulu

No	Jurnal	Kesimpulan
1	<i>Railway Infrastructure Asset Management Optimization: Comparative Analysis of RAMS, LCC, and their Integration Approaches on Track Asset.</i> Jurnal Perkeretaapian Indonesia (<i>Indonesian Railway Journal</i>). Vol.7 No. 2 (Tri Maulana & Gunawan, 2023)	Integrasi antara konsep RAMS (<i>Reability, Availability, Maintainability, and Safety</i>) dan LCC (<i>Life Cycle Cost</i>) dalam pengelolaan aset infrastruktur perkeretaapian memiliki potensi untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas sistem perkeretaapian secara keseluruhan, mulai dari perencanaan desain hingga operasi dan pemeliharaan, dengan menghasilkan keputusan strategis yang lebih baik, termasuk dalam pemilihan jenis jalur seperti ballast dan ballastless, serta menganalisis tren masa depan dalam desain terowongan kereta api di batuan keras dan cuaca dingin, dengan fokus pada solusi teknis yang hemat biaya dan mengurangi biaya pemeliharaan selama siklus hidup terowongan.

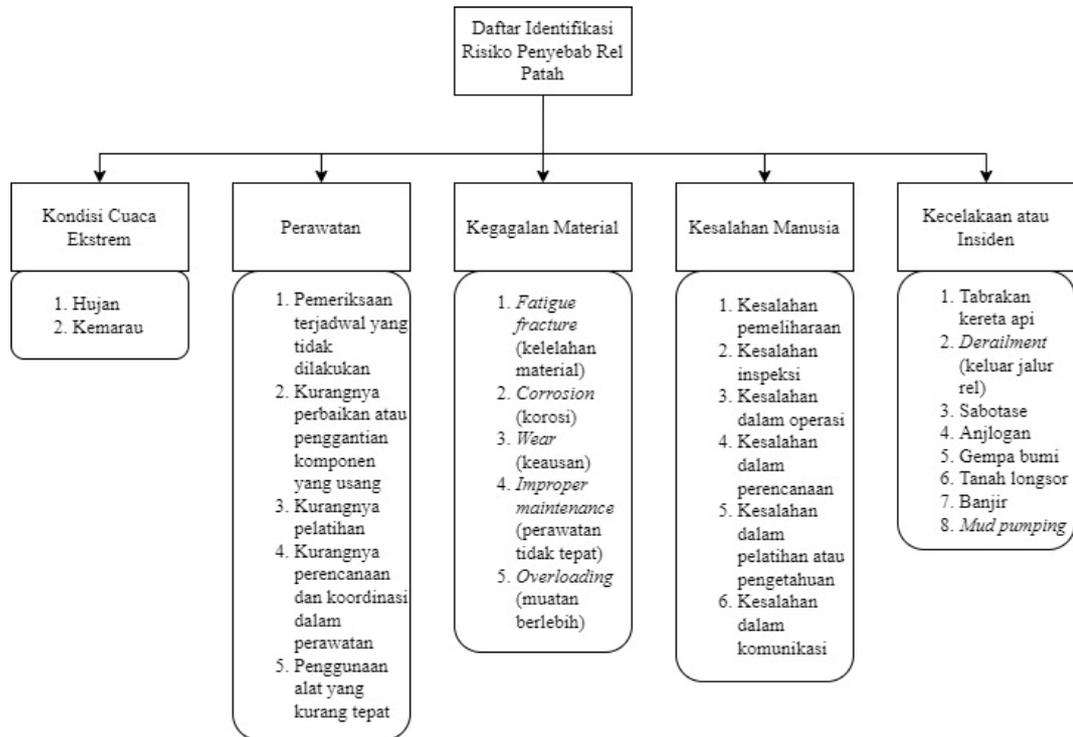
2	<i>Estimation of the life cycle cost of the upper railway track structure. MATEC Web of Conferences 216, 01008 (Karpuschenko & Trukhanov, 2018)</i>	Penelitian mengenai rekayasa dan evaluasi ekonomi terhadap efisiensi struktur rel kereta api bagian atas telah memunculkan metode untuk memperkirakan biaya siklus hidupnya, termasuk model biaya, metode penentuan elemen biaya, dan algoritma perhitungannya, dengan hasil menunjukkan bahwa metodologi tersebut sepenuhnya memadai untuk kondisi pengoperasian lintasan yang sebenarnya.
3	<i>Evaluation of effectiveness of separating layers in railroad track structure using life cycle cost analysis. Transportation Geotechnics and Geoecology, TGG 2017, 17-19 May 2017, Saint Petersburg, Russia. (Beltiukov et al., 2017).</i>	Pada penelitian ini, penggunaan lapisan pemisah geotekstil dan polistiren memberikan pengurangan biaya siklus hidup sebesar 9% dibandingkan dengan struktur lintasan klasik, dan sebesar 7% dibandingkan dengan lintasan yang menggunakan konsolidasi pemberat multilapis.
4	Analisa Life Cycle Cost Perkerasan Kaku Dan Lentur Jalan Nasional (Studi Kasus: Jalan Batas Kota Bojonegoro Padangan. Tugas Akhir Institut Teknologi Sepuluh Nopember, (Betamal, 2015)	Hasil perencanaan perkerasan lentur untuk mengantisipasi kenaikan lalu lintas selama 20 tahun menunjukkan diperlukan biaya Rp.75.967.309.324,-, sementara perkerasan kaku membutuhkan biaya Rp.110.448.864.185,- sesuai dengan kontrak berbasis kinerja pada proyek peningkatan struktur jalan, dengan biaya pemeliharaan lebih tinggi karena risiko ditanggung oleh pihak kontraktor.
5	<i>Life Cycle Cost of a Railroad Switch. Creative Construction Conference 2017, CCC 2017, 19-22 June 2017, Primosten, Croatia. (Vitásek & Měšťanová, 2017)</i>	Tujuan dari proposal/desain yang dioptimalkan adalah pemilihan varian desain jalur kereta api yang ekonomis, efektif dan terarah dengan penekanan pada desain saklar yang secara signifikan mempengaruhi harga konstruksi dan seluruh LCC (<i>Life Cycle Cost</i>).
6	<i>An Attack-Fault Tree Analysis of a Movable Railroad Bridge. 13th International Conference on Critical Infrastructure Protection (ICCIP), Mar 2019, Arlington, VA, United States. (Jablonski et al., 2019)</i>	Pada penelitian ini jembatan bergerak terus berkembang dalam desain dan implementasinya, peningkatan melalui otomatisasi dan jaringan komponen-komponennya menambah risiko baru pada infrastruktur transportasi. Sehingga penelitian ini memanfaatkan model pohon kesalahan untuk mengidentifikasi risiko fisik dalam pengoperasian jembatan ayun kereta api, dengan fokus pada analisis kesalahan sistem.

7	<p>Analisis Risiko Kecelakaan Kerja Dengan Metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dan Fault Tree Analysis (FTA) (Studi Kasus: Bengkel Dinamis). JATRI-Jurnal Teknik Industri Vol. 1, No. 1, (Hardiansah et al., 2023)</p>	<p>Penelitian ini menyajikan kesimpulan dari hasil analisis menunjukkan bahwa terdapat 10 risiko kecelakaan kerja di Bengkel Dinamis, dengan 3 risiko tertinggi adalah terkena benda yang lepas saat dipotong dengan mesin <i>cut off</i>, terpaku palu 5kg, dan terkena palu karet. Sumber penyebab risiko tersebut meliputi faktor – faktor seperti kurangnya konsentrasi, kelelahan, penggunaan peralatan pelindung diri yang tidak memadai, dan kurangnya pelatihan.</p>
8	<p>Analisis Risiko Teknis Pelaksanaan Pekerjaan Penggantian <i>Elastomer Bearing Pad</i> Pada Jembatan Suramadu Menggunakan <i>Fault Tree Analysis Method</i>. Jurnal “MITSU” Media Informasi Teknik Sipil UNJA Volume 11, No. 1, (Sari et al., 2023)</p>	<p>Setelah dilakukan analisis risiko, 7 variabel risiko tinggi diidentifikasi, termasuk keretakan balok girder, keterlambatan pengadaan material, kerusakan saat pengiriman, mutu pekerjaan rendah, alat tidak dapat dioperasikan, kerusakan peralatan, dan keterlambatan pengadaan alat. Dengan tindakan pengendalian yang disarankan, meliputi koordinasi yang baik, pemeliharaan alat, dan pelaksanaan pekerjaan sesuai SOP (Standar Operasional Prosedur), serta rekomendasi penggunaan metode lain dan pengembangan cakupan risiko lebih luas di penelitian berikutnya.</p>
9	<p><i>Fault Diagnosis of Train Network Control Management System Based on Dynamic Fault Tree and Bayesian Network. Digital Object Identifier 10.1109/ACCESS</i>. (Wang et al., 2021)</p>	<p>Dalam makalah ini, dibahas tentang keterbatasan DFT (<i>Dynamic Fault Tree</i>) dan BN (<i>Bayesian Network</i>) di pendahuluan, menganalisis kejadian penting yang menyumbang kegagalan TCMS (<i>Train Control Management System</i>), serta prinsip kerja dan mode kegagalan TCMS (<i>Train Control Management System</i>) dengan membuat pohon kesalahan dinamis yang diubah menjadi model jaringan Bayesian, menjelaskan metode pemetaan DFT (<i>Dynamic Fault Tree</i>) ke BN (<i>Bayesian Network</i>), dan mengenalkan fitur kedua metode tersebut, yang signifikan dalam menyelesaikan masalah inferensi ketidakpastian dan meningkatkan efisiensi dan efektivitas analisis kesalahan.</p>
10	<p>Analisa Pemeliharaan Jalan Kereta Api Medan-Tebing Tinggi. Tugas Akhir Universitas Medan Area, (Rotua Sitorus, 2021)</p>	<p>Hasil analisis JO (Jam/Orang) menunjukkan bahwa jalan rel lintas Medan-Tebing Tinggi adalah kelas III dengan daya angkut 6.924 juta ton/tahun, dengan kebutuhan pemeliharaan sebesar 124.159 JO (Jam/Orang), dan biaya upah pemeliharaan sekitar Rp. 1.287.707.000,00 dari PT. KAI atau Rp. 1.222.280,00 jika tenaga kerja berasal dari penyedia jasa.</p>

2.10. Simpulan

Tinjauan pustaka ini bertujuan untuk menjelaskan tahapan penelitian yang akan dilakukan, dimulai dari pengenalan kereta api, komponen rel, hingga 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. Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan metode ini dapat menghasilkan keputusan strategis yang lebih baik dan lebih efisien, serta pentingnya identifikasi risiko dan pengembangan strategi mitigasi untuk menjaga keberlangsungan operasional. Contoh – contoh penelitian yang telah dilakukan mengilustrasikan berbagai pendekatan dalam analisis biaya siklus hidup dan manajemen risiko, menunjukkan bahwa penerapan metode yang tepat dapat meningkatkan efisiensi dan efektivitas pengelolaan infrastruktur perkeretaapian.

Dari literatur penelitian terdahulu, jurnal – jurnal lain, serta *e-book*, diperoleh hasil identifikasi risiko penyebab rel patah. Berikut disajikan gambar diagram identifikasi risiko penyebab rel patah.

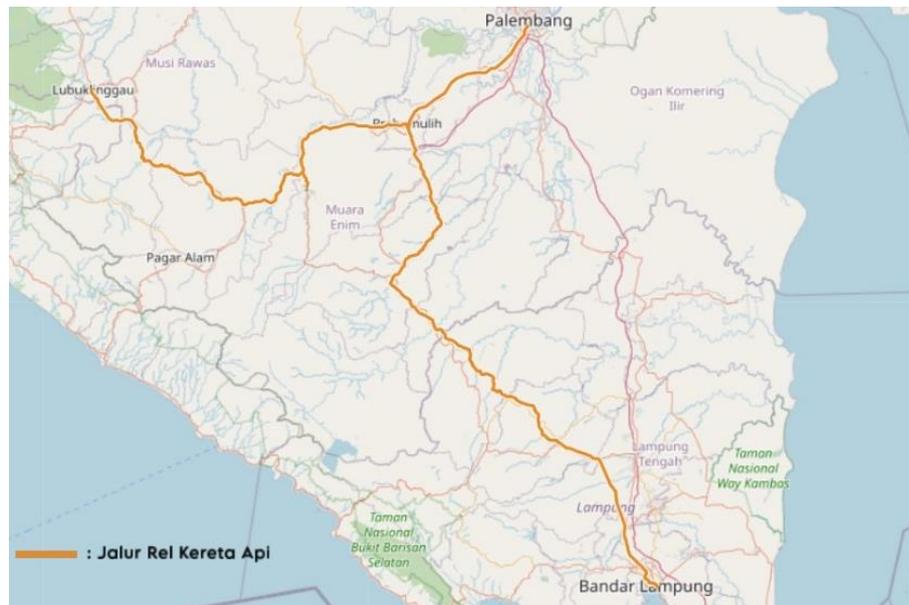


Gambar 24. Identifikasi Risiko Penyebab Rel Patah.

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian dilakukan di beberapa titik pada jalur rel kereta api yang menjadi wilayah kerja Divre IV Tanjung Karang.



Gambar 25. Lokasi Penelitian.
(Sumber: *openrailwaymap*)



Gambar 26. Peta Perjalanan KA.
(Sumber: PT. KAI)

3.2. Studi Literatur

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. Referensi teori dan implementasinya ditemukan dari berbagai sumber seperti buku, jurnal, dan *e-book* yang berkaitan dengan faktor – faktor penyebab rel patah pada jalur kereta api serta penanganannya, yang akan menjadi pendukung dan pelengkap dari data sekunder dalam penelitian ini.

3.3. Metode Pengumpulan Data

Dalam melakukan penelitian ini diperlukan 2 jenis data, yaitu data primer dan data sekunder.

3.3.1. Data Primer

Data primer merujuk kepada informasi yang diperoleh secara langsung dari sumbernya, dapat melalui survei atau pengamatan langsung terhadap situasi yang ada. Dalam konteks penelitian ini, data primer diperoleh dengan melakukan survei berupa kuisioner kepada pihak PT. KAI Divre IV Tanjung Karang.

3.3.2. Data Sekunder

Data sekunder merupakan data penunjang yang diperoleh dari sumber kedua atau dari instansi – instansi tertentu. Pada penelitian ini data sekunder seperti, 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, serta penyebab, dampak, dan biaya yang dikeluarkan untuk penanganan rel patah.

3.4. Metode Analisis Data

Dalam analisis yang dilakukan pada penelitian ini dilakukan beberapa proses yaitu:

3.4.1. Penyusunan *Fault Tree Analysis* (FTA)

Menyusun pohon kegagalan dengan tahap – tahap dari studi literatur yang telah dipelajari menggunakan data yang telah diperoleh dari hasil kuisioner.

3.4.2. Menganalisis Risiko

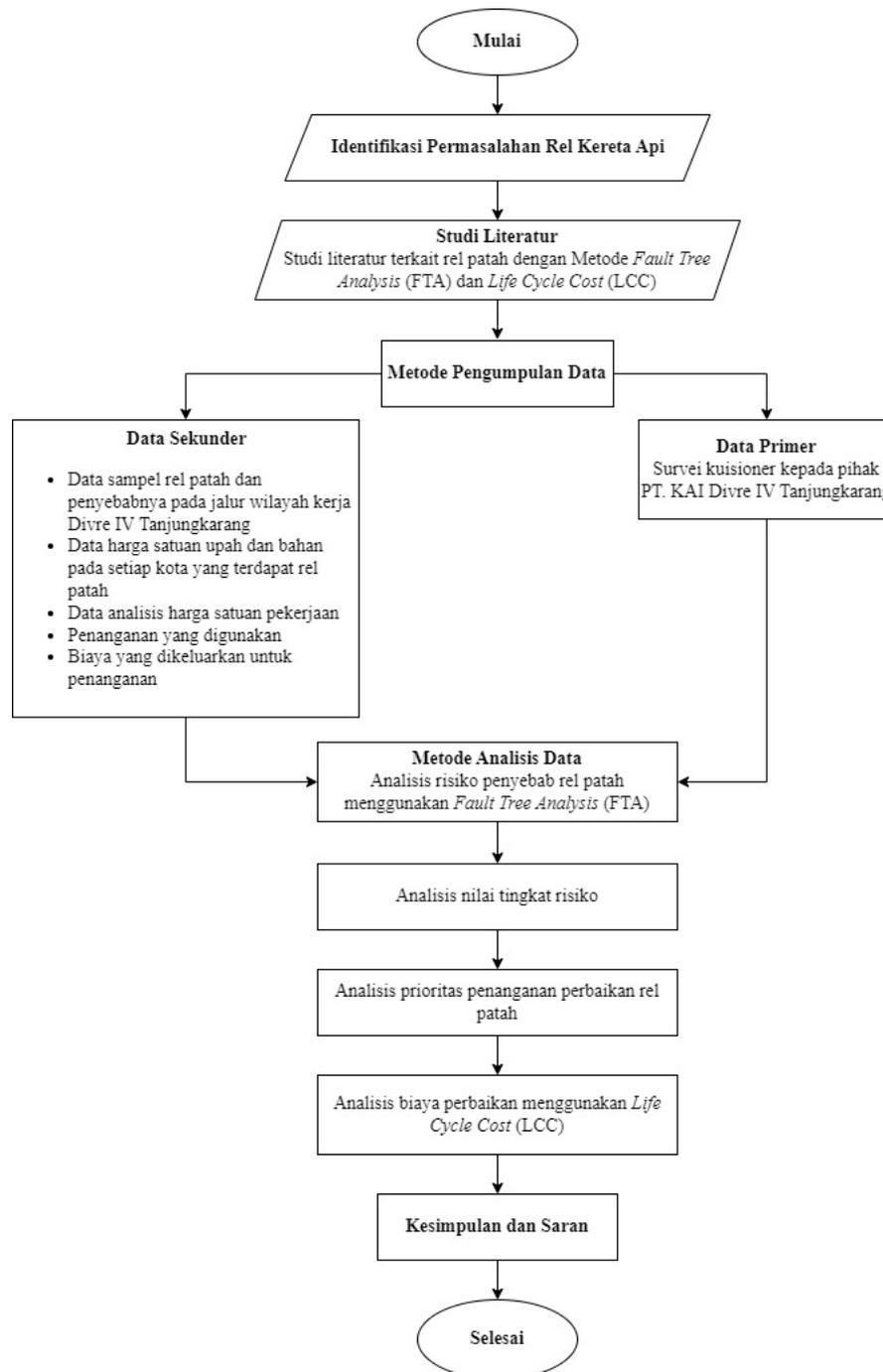
Melakukan analisis prioritas risiko dengan mengalikan probabilitas dan dampak sesuai dengan pada persamaan 2.1, yang kemudian digunakan untuk memprioritaskan penanganan perbaikan rel patah.

3.4.3. Menganalisis Biaya *Life Cycle Cost* (LCC)

Analisis biaya merupakan tahap identifikasi komponen biaya utama yang diperlukan dalam perhitungan LCC. Perhitungan dilakukan untuk penanganan rel patah berdasarkan landasan teori dari berbagai literatur yang dijadikan acuan pada penelitian ini. Proses perhitungan dilakukan dengan menggunakan bantuan program *Microsoft Excel* dengan menggunakan persamaan 2.2, 2.3, dan 2.4.

3.5. Diagram Alir

Berikut ini merupakan diagram alir dari penelitian ‘Analisis Penyebab Rel Patah Dengan Metode *Fault Tree Analysis* (FTA) dan Analisis Biaya Perbaikannya Dengan Metode *Life Cycle Cost* (LCC)’:



Gambar 27. Diagram Alir Rencana.

V. PENUTUP

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang telah dilakukan dalam penelitian ini, maka dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Hasil dari identifikasi faktor – faktor yang menyebabkan patahnya rel dalam sistem transportasi kereta api didapatkan 11 faktor. Diantaranya adalah kondisi cuaca ekstrem (B1), kegagalan material (B2), pemuaian posisi rel (B3), anjlogan kereta api (B4), kelelahan material (C1), pemasangan yang tidak tepat (C2), kesalahan dalam perawatan (C3), beban berlebih (D1), pemeriksaan terjadwal yang tidak dilakukan (D2), kecelakaan atau insiden (E), dan tabrakan kereta api (F).
2. Dari hasil analisis penyebab rel patah menggunakan Metode *Fault Tree Analysis* (FTA), didapatkan hasil bahwa terdapat 23 penyebab yang menjadi penyebab mendasar (*basic event*) dari terjadinya rel patah. Diantaranya adalah hujan (X1), kemarau (X2), korosi (X3), keausan (X4), muatan yang terlalu banyak (*overloading*) (X5), kurangnya pelatihan atau pengetahuan (X6), kelalaian manusia (X7), kesalahan inspeksi (X8), penggunaan alat yang kurang tepat (X9), kurangnya perbaikan komponen yang sudah usang (X10), kurangnya komunikasi (X11), kurangnya koordinasi (X12), kurangnya perencanaan yang baik (X13), pemuaian di posisi lurus (X14), pemuaian di posisi tikungan (X15), pemuaian di posisi wesel (X16), sabotase (X17), gempa bumi (X18), tanah longsor (X19), banjir (X20), kesalahan pengoperasian (X21), *derailment* (keluar jalur rel) (X22), dan *mud pumping* (X23).
3. Hasil dari analisis nilai tingkat risiko didapatkan bahwa terdapat 3 risiko tergolong tinggi yaitu hujan (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 prioritas untuk penanganan perbaikan rel patah yakni dari risiko yang paling tinggi diantaranya dengan melaksanakan pemeriksaan terjadwal secara rutin, memperbaiki komponen rel yang telah usang, dan perlu adanya penggantian komponen rel. Hingga hasil prioritas untuk penanganan perbaikan rel patah risiko yang sangat rendah diantaranya melaksanakan perencanaan yang sesuai dan memperkirakan bencana.

4. Dari hasil analisis biaya penanganan untuk perbaikan rel patah bahwa kondisi terbaik terjadi pada skenario 2, dengan tingkat inflasi sebesar 3%, dan nilai NPV didapat Rp 14.647.888.450, nilai IRR sebesar 15,18%, dan nilai BCR sebesar 2,59. Sedangkan kondisi terburuk terjadi pada skenario 5, dengan tingkat inflasi sebesar 8%, dan nilai NPV didapat Rp 5.000.641.484, nilai IRR sebesar 13,88%, dan dengan nilai BCR 8,1.

5.2. Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Perlu adanya penelitian lebih lanjut mengenai Metode *Fault Tree Analysis* (FTA) pada rel kereta api dengan wilayah cakupan yang lebih luas agar mendapatkan hasil yang lebih akurat.
2. Perlu adanya penelitian terkait biaya siklus hidup komponen lainnya seperti, bantalan, ballas, dan penambat untuk mendapatkan hasil yang lebih akurat.

DAFTAR PUSTAKA

AS/NZS 4360. (2004). *3rd Edition The Australian And New Zealand Standard on Risk Management. Broadleaf Capital International Pty Ltd. NSW, Australia.*

Beltiukov, V., Shehtman, E., & Malikov, O. (2017). Evaluation of Effectiveness of Separating Layers in Railroad Track Structure Using Life Cycle Cost Analysis. *Procedia Engineering*, 189(May), 695–701.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.05.110>

Betamal, F. N. (2015). *Analisa Life Cycle Cost Perkerasan Kaku dan Lentur Jalan Nasional (Studi Khusus: Jalan Batas Kota Bojonegoro- Padangan).*

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>

Direktorat Prasarana PT Kereta Api Indonesia (persero). (2016). *Peraturan Dinas 13 C. 51.*

Fathoni, M. Z. (2020). Analisis Risiko Pada Proyek Pembuatan Lintel Set Point Dengan Metode Kualitatif (Studi Kasus : PT. XYZ). *Jurnal PASTI*, 14(2), 113. <https://doi.org/10.22441/pasti.2020.v14i2.002>

- Guntara, R. (2017). Analisis risiko kecelakaan kerja dengan menggunakan bowtie analysis pada proyek mooring chain replacement pada production barge “seagood 101.” *Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)*, 1–73.
<http://repository.its.ac.id/id/eprint/49848>
- Hardiansah, H., Sukmono, Y., & Saptaningtyas, W. W. E. (2023). Analisis Risiko Kecelakaan Kerja dengan Metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dan Fault Tree Analysis (FTA). *Jurnal Teknik Industri (JATRI)*, 1(1), 1–9. <https://doi.org/10.30872/jatri.v1i1.493>
- Iskandar, A., Alifen, R., & Budiman, J. (2016). Studi Komparasi Life Cycle Cost Pada Gedung Apartemen. *Dimensi Utama Teknik Sipil*, 3(1), 31–38.
<https://doi.org/10.9744/duts.3.1.31-38>
- Jablonski, M., Wang, Y., Yavvari, C., Wang, Z., Liu, X., Holt, K., & Wijesekera, D. (2019). an Attack-Fault Tree Analysis of a Movable Railroad Bridge. *IFIP Advances in Information and Communication Technology*, 570 IFIP, 51–71. https://doi.org/10.1007/978-3-030-34647-8_3
- Karpuschenko, N., & Trukhanov, P. (2018). Estimation of the life cycle cost of the upper railway track structure. *MATEC Web of Conferences*, 216, 1–8.
<https://doi.org/10.1051/mateconf/201821601008>
- Lutfi, J. A. (2011). *Efisiensi Biaya Perawatan Infrastruktur Jalan Rel dengan Simulasi Value Engineering*.
- Menteri Perhubungan Republik Indonesia. (2012). Peraturan Menteri Perhubungan Nomor 60 Tahun 2012 tentang Persyaratan Teknis Jalur Kereta Api. *Kementrian Perhubungan Republik Indonesia*, 1–57.
https://peraturan.bpk.go.id/Download/138947/pm_no._60_tahun_2012.pdf
- Nurani, S. T. A. (2021). Partisipan. *Jurnal UPI*, 25.

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>

Resquallah, R. (2021). Analisis Life Cycle Cost Pada Gedung Terminal Tipe a Anak Air Padang. *Jurnal Sipil Statik*, 4(1), 46–55.

Rotua Sitorus, O. R. (2021). *Analisa Pemeliharaan Jalan Kereta Api Medan-Tebing Tinggi*. 1–76.

Sari, I., Ratnaningsih, A., & Putra, P. P. (2023). *Fakultas teknik universitas wiraraja sumenep - madura*. 11(1), 27–38.

Tri Maulana, A., & Gunawan, L. (2023). Railway Infrastructure Asset Management Optimization: Comparative Analysis of RAMS, LCC, and their Integration Approaches on Track Asset. *Jurnal Perkeretaapian Indonesia (Indonesian Railway Journal)*, 7(Oktober), p.

Vitásek, S., & Měšťanová, D. (2017). Life Cycle Cost of a Railroad Switch. *Procedia Engineering*, 196(June), 646–652.
<https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.08.053>

Wang, C., Wang, L., Chen, H., Yang, Y., & Li, Y. (2021). Fault Diagnosis of Train Network Control Management System Based on Dynamic Fault Tree and Bayesian Network. *IEEE Access*, 9, 2618–2632.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3046681>

Yolanda, M., & Ekawati, Y. (2023). *Penerapan Metode Fault Tree Analysis Untuk Mencegah Kegagalan Pada Departemen Interior di PT X*. 03(01), 49–58.