

Penilaian Risiko Operasional Perjalanan Kereta Api pada Jalur Padang-Bandara Internasional Minangkabau dengan Metode FMEA

Murni Pitriyani^{1*}, Ridho Ryswaldi²

¹⁻²Departemen Manajemen, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Negeri Padang, Indonesia

*Penulis Korespondensi: murnipitriyani@gmail.com

Abstract. Rail transportation plays a strategic role in supporting economic activity and regional connectivity in Indonesia, yet operational risks along busy commuter lines remain inadequately mapped, including on the Padang-Minangkabau International Airport (BIM) line. This study aims to identify potential failure modes, analyze operational risk levels, determine the highest risk priorities, and formulate mitigation recommendations for the Padang-BIM rail line operated by PT Kereta Api Indonesia (Persero) Divre II West Sumatra. A sequential exploratory mixed-method design was employed, combining a qualitative stage (semi-structured interviews) to validate and enrich the list of failure modes with a quantitative stage using the Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) method. Data were collected from 18 purposively selected operational staff, covering four operational risk sources: human factors, equipment and infrastructure, environment, and management. Severity (S), Occurrence (O), and Detection (D) were rated on a 1-10 scale and combined into a Risk Priority Number (RPN = $S \times O \times D$). Inter-rater reliability was tested using Kendall's Coefficient of Concordance. The results identified 44 failure modes, of which four were classified as High Risk and one as Medium Risk. The highest-priority failure modes were ignoring warning signs at unguarded level crossings (RPN=432), stalled or trapped vehicles at level crossings (RPN=400), and running through closed barriers at guarded crossings (RPN=378), all originating from road-user behavior classified under the human factor. Rail cracking due to material fatigue (RPN=162) and landslides damaging the track (RPN=144) were also identified as priority risks.

Keywords: Failure Mode And Effects Analysis; Operational Risk; Railway Safety; Risk Mitigation; Risk Priority Number.

Abstrak. Transportasi kereta api memiliki peran strategis dalam mendukung aktivitas ekonomi dan konektivitas antarwilayah di Indonesia, namun risiko operasional pada jalur-jalur dengan frekuensi tinggi masih belum banyak dipetakan secara sistematis, termasuk pada jalur Padang-Bandara Internasional Minangkabau (BIM). Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi kegagalan (failure mode), menganalisis tingkat risiko operasional, menentukan prioritas risiko tertinggi, serta merumuskan rekomendasi mitigasi pada jalur Padang-BIM yang dioperasikan oleh PT Kereta Api Indonesia (Persero) Divre II Sumatera Barat. Penelitian ini menggunakan desain mixed method dengan pendekatan sequential exploratory, yang memadukan tahap kualitatif (wawancara semi-terstruktur) untuk memvalidasi dan melengkapi daftar failure mode, dengan tahap kuantitatif menggunakan metode Failure Mode and Effects Analysis (FMEA). Data dikumpulkan dari 18 responden pegawai operasional yang dipilih secara purposive sampling, mencakup empat faktor sumber risiko operasional yaitu faktor manusia, peralatan dan infrastruktur, lingkungan, serta manajemen. Severity (S), Occurrence (O), dan Detection (D) dinilai menggunakan skala 1-10 dan dikombinasikan menjadi nilai Risk Priority Number ($RPN = S \times O \times D$). Reliabilitas antarresponden diuji menggunakan Kendall's Coefficient of Concordance. Hasil penelitian mengidentifikasi 44 failure mode, dengan empat di antaranya tergolong kategori Risiko Tinggi dan satu kategori Risiko Sedang. Failure mode dengan prioritas tertinggi adalah mengabaikan rambu peringatan pada perlintasan tanpa palang pintu (RPN=432), kendaraan mogok/terjebak di perlintasan sebidang (RPN=400), dan menerobos palang pintu tertutup pada perlintasan berpenjagaan (RPN=378), yang seluruhnya bersumber dari perilaku pengguna jalan pada Faktor Manusia.

Kata Kunci: Analisis Moda Kegagalan dan Dampaknya; Angka Prioritas RisikoKeselamatan Perkeretaapian; Mitigasi Risiko; Risiko Operasional.

1. LATAR BELAKANG

Transportasi berperan penting dalam mendukung pembangunan ekonomi, sosial, dan pemerataan wilayah. Menurut Badan Pusat Statistik (BPS), transportasi darat berkontribusi besar terhadap aktivitas perekonomian dan konektivitas antarwilayah, dan di antara berbagai moda transportasi darat, kereta api merupakan transportasi massal yang unggul dalam kapasitas

angkutan, efisiensi energi, keselamatan, dan ketepatan waktu (Maulana and Wicaksono 2024). PT Kereta Api Indonesia (Persero) sebagai operator utama transportasi kereta api nasional berperan dalam menyediakan layanan angkutan penumpang dan barang yang mendukung mobilitas masyarakat (Iskandar and Athallah 2026), dan membagi wilayah kerjanya ke dalam beberapa divisi regional, salah satunya PT KAI Divisi Regional II Sumatera Barat.

Seiring meningkatnya minat masyarakat terhadap kereta api, frekuensi perjalanan turut meningkat, yang berpotensi meningkatkan risiko operasional dan mengganggu keselamatan serta keandalan layanan (Hendra et al. 2024). Jalur Padang-Bandara Internasional Minangkabau (BIM) yang dilayani oleh KA Minangkabau Ekspres beroperasi rutin setiap hari dengan frekuensi 12 perjalanan pulang-pergi, serta memiliki sejumlah perlintasan sebidang yang berinteraksi langsung dengan arus lalu lintas kendaraan dan aktivitas masyarakat.

Risiko operasional pada dasarnya dipahami sebagai risiko kerugian yang timbul akibat ketidakmemadaan atau kegagalan proses internal, kesalahan manusia, kegagalan sistem, maupun peristiwa eksternal (Hamzah, Amelia, and Khusnia 2025), sebagaimana juga diatur dalam standar ISO 31000:2018 (Aprikasari et al. 2024). Dalam konteks perkeretaapian, risiko tersebut umumnya bersumber dari empat faktor utama yang saling berkaitan, yaitu faktor manusia, faktor peralatan dan infrastruktur, faktor lingkungan, serta faktor manajemen (Luan and Liu 2025), yang saling berinteraksi sehingga gangguan pada satu faktor dapat menimbulkan efek berantai terhadap kinerja operasional secara keseluruhan.

Data kecelakaan kereta api pada jalur Padang-BIM periode 2021-2025 mencatat total 44 kejadian, dengan segmen Tabing-Duku secara konsisten menjadi lokasi dengan kejadian terbanyak hampir di setiap tahun. Kondisi ini sejalan dengan masih adanya perlintasan sebidang yang belum dilengkapi palang pintu otomatis maupun petugas jaga: dari 42 titik perlintasan pada jalur ini, sembilan di antaranya sama sekali tidak memiliki palang pintu maupun pos jaga. Read et al. (2021) menyatakan bahwa perilaku tidak aman dan ketidakpatuhan pengguna jalan merupakan salah satu faktor yang paling sering berkontribusi terhadap kecelakaan pada perlintasan sebidang, yang tidak hanya menimbulkan korban jiwa dan kerugian material, tetapi juga mengganggu kelancaran operasional karena memerlukan penanganan kejadian dan penyesuaian operasi (Hong, Clifton, and Nelson 2024).

Selain faktor manusia, keandalan infrastruktur turut menjadi faktor penentu kualitas layanan dan efektivitas operasional perkeretaapian (Weik et al. 2022). Faktor lingkungan, khususnya cuaca ekstrem, juga berkontribusi terhadap penurunan keselamatan dan keandalan operasional perkeretaapian (Jiang et al. 2024), sementara faktor manajemen yang tidak optimal dalam perencanaan, pengawasan, dan pemeliharaan dapat meningkatkan kemungkinan

gangguan operasional (Li et al. 2025). Tercatat sembilan kejadian pembatalan perjalanan KA Minangkabau Ekspres sepanjang 2021-2025 yang disebabkan oleh kombinasi faktor manajemen, peralatan-infrastruktur, dan lingkungan, menunjukkan bahwa operasional jalur ini masih rentan terhadap gangguan dari berbagai sumber risiko.

PT KAI telah menerapkan manajemen risiko mengacu pada ISO 31000:2018 (PT Kereta Api Indonesia (Persero) 2024) serta Sistem Manajemen Keselamatan Perkeretaapian (SMKP) sesuai Permenhub Nomor 69 Tahun 2018. Namun demikian, mengingat sifat risiko operasional yang dinamis serta kompleksitas interaksi antarfaktor, pengelolaan risiko pada tingkat operasional memerlukan evaluasi dan penyesuaian yang berkelanjutan, sehingga kajian risiko operasional secara sistematis tetap diperlukan untuk mengidentifikasi, menilai, dan mengendalikan risiko yang berpotensi memengaruhi keselamatan, keandalan, dan kelancaran operasional perjalanan kereta api (Maulana and Suweca 2023).

Berbagai metode telah digunakan untuk menganalisis risiko operasional perkeretaapian, seperti Dynamic Fault Tree (Weik et al. 2022), combined weights dan nonlinear Fuzzy Comprehensive Evaluation (Luan and Liu 2025), serta pendekatan evolutionary game dan system dynamics (Li et al. 2025). Namun demikian, metode-metode tersebut umumnya memerlukan data kegagalan historis yang lengkap atau pemodelan matematis yang kompleks. Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) dipilih dalam penelitian ini karena menyediakan kerangka penilaian yang terstruktur melalui tiga komponen, yaitu Severity (S), Occurrence (O), dan Detection (D), yang menghasilkan nilai Risk Priority Number (RPN) sebagai dasar penentuan prioritas risiko (Maulana and Wicaksono 2024), serta memungkinkan pelibatan expert judgment dari responden yang memahami kondisi operasional secara langsung dan telah terbukti efektif pada berbagai penelitian risiko operasional di sektor perkeretaapian maupun transportasi (Chandra, Afandy, and Wicaksono 2025).

Berdasarkan penelusuran penelitian terdahulu, penerapan FMEA pada sektor perkeretaapian umumnya berfokus pada risiko secara umum atau pada komponen tertentu, sementara penelitian yang secara khusus menerapkan FMEA untuk menilai risiko operasional pada suatu lintas kereta api dengan mempertimbangkan keempat faktor sumber risiko sekaligus masih terbatas ditemukan, khususnya pada konteks jalur Padang-BIM. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk (1) mengidentifikasi potensi kegagalan (failure mode) yang menyebabkan risiko operasional pada jalur Padang-BIM, (2) menganalisis tingkat risiko (nilai RPN) dari masing-masing failure mode berdasarkan empat faktor sumber risiko, (3) menentukan prioritas tertinggi risiko operasional yang harus segera ditangani, dan (4) memberikan rekomendasi mitigasi yang tepat berdasarkan hasil analisis FMEA.

2. KAJIAN TEORITIS

Risiko secara umum diartikan sebagai kemungkinan terjadinya suatu peristiwa yang dapat menimbulkan kerugian atau penyimpangan dari hasil yang diharapkan (Al Husaini 2023), atau peluang munculnya kejadian yang merugikan akibat ketidakpastian terhadap kondisi di masa mendatang (Yusnita, Judijanto, and Wandani 2023). International Organization for Standardization 31000:2018 mendefinisikan risiko sebagai *effect of uncertainty on objectives* (Gregory 2018). Berdasarkan tipenya, risiko dibedakan menjadi risiko murni, yaitu risiko yang hanya berpotensi menimbulkan kerugian, dan risiko spekulatif yang berpotensi menimbulkan kerugian maupun keuntungan sekaligus, seperti risiko operasional (Hanafi 2009).

Manajemen risiko merupakan metode terstruktur yang digunakan organisasi untuk mengenali, menganalisis, mengevaluasi, dan mengendalikan risiko yang dapat berdampak pada pencapaian tujuan organisasi, sekaligus berfungsi sebagai alat strategis untuk meningkatkan kualitas pengambilan keputusan (Hopkin 2018). Proses manajemen risiko umumnya terdiri atas identifikasi risiko, analisis risiko, evaluasi risiko, dan pengendalian risiko (Tengor, Murni, and Moniharapon 2015). Dalam konteks perkeretaapian, PT KAI mengacu pada ISO 31000:2018 yang saling melengkapi dengan SMKPD sesuai Permenhub Nomor 69 Tahun 2018 (PT Kereta Api Indonesia (Persero) 2024) melalui sistematika Plan-Do-Check-Action.

Risiko operasional didefinisikan sebagai risiko kerugian yang timbul akibat ketidakmemadaan atau kegagalan proses internal, manusia, sistem, atau kejadian eksternal (Ruiz-Canela López 2021). Pada sistem perkeretaapian, risiko operasional bersifat khusus karena dapat menimbulkan efek berantai, di mana masalah lokal dapat menyebar ke seluruh jaringan (Wang, Barkan, and Rapik Saat 2020) dan interaksi antarrisiko dapat meningkatkan probabilitas serta dampak negatif kecelakaan dibandingkan risiko yang berdiri sendiri (Zhao, Zhou, and Han 2025).

Faktor manusia (*human factor*) mencakup petugas operasional (masinis, PPKA, teknisi, petugas perawatan) maupun pengguna jalan di sekitar jalur rel (Chandra et al. 2025; Hong et al. 2024), dengan kesalahan manusia menjadi salah satu penyebab dominan gangguan keselamatan perkeretaapian meskipun sarana dan prasarana berada dalam kondisi baik (Nedeliaková, Hranický, and Valla 2022). Perilaku pengguna jalan yang tidak mematuhi aturan keselamatan, seperti menerobos palang pintu atau mengabaikan sinyal peringatan, merupakan penyebab dominan kecelakaan di perlintasan sebidang di berbagai negara (Hong et al. 2024; Read et al. 2021). Faktor peralatan dan infrastruktur mencakup kondisi sarana dan prasarana yang harus berfungsi optimal untuk menjamin keselamatan (Maulana and Wicaksono 2024);

kerusakan jalur rel dapat meningkatkan risiko anjlokkan, sementara kegagalan sistem persinyalan dapat mengganggu keselamatan operasional (Rahardjo 2017). Failure Mode and Effects Analysis (FMEA) adalah pendekatan sistematis untuk menemukan kemungkinan kegagalan, menganalisis penyebab dan dampaknya, serta menentukan prioritas penanganan berdasarkan nilai Risk Priority Number (RPN) (Maulana and Wicaksono 2024). Severity (S) merupakan tingkat keparahan dampak yang ditimbulkan apabila suatu failure mode terjadi; Occurrence (O) merupakan frekuensi atau kemungkinan terjadinya penyebab suatu failure mode; dan Detection (D) merupakan kemampuan sistem pengendalian untuk mendeteksi penyebab kegagalan sebelum menimbulkan dampak yang merugikan. RPN dihitung dari perkalian $S \times O \times D$, dan semakin tinggi nilai RPN, semakin tinggi prioritas risiko yang harus segera ditangani (Chandra et al. 2025).

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan mixed method dengan desain sequential exploratory design, yaitu data kualitatif dikumpulkan dan dianalisis terlebih dahulu untuk mengeksplorasi dan memperkaya pemahaman terhadap fenomena yang diteliti, kemudian digunakan sebagai dasar penyusunan instrumen kuantitatif pada tahap berikutnya (Nasarudin et al. 2024). Tahap kualitatif dilaksanakan melalui wawancara semi-terstruktur untuk memvalidasi dan melengkapi daftar failure mode yang telah diidentifikasi melalui studi literatur dan observasi lapangan, sedangkan tahap kuantitatif dilaksanakan melalui kuesioner Severity (S), Occurrence (O), dan Detection (D) untuk memperoleh nilai Risk Priority Number (RPN). Penelitian dilaksanakan di PT Kereta Api Indonesia (Persero) Divre II Sumatera Barat dengan objek jalur Padang-BIM, pada bulan Juli sampai Agustus 2026.

Variabel penelitian ini adalah faktor sumber risiko operasional yang terdiri atas faktor manusia, faktor peralatan dan infrastruktur, faktor lingkungan, dan faktor manajemen (Luan and Liu 2025), yang masing-masing dijabarkan ke dalam beberapa indikator. Setiap failure mode yang teridentifikasi pada keempat faktor tersebut dinilai menggunakan instrumen Severity, Occurrence, dan Detection untuk memperoleh nilai RPN sebagai dasar prioritas risiko.

Populasi penelitian adalah seluruh pegawai PT KAI Divre II Sumatera Barat yang terlibat langsung dalam operasional jalur Padang-BIM, meliputi masinis, PPKA, petugas perawatan sarana dan prasarana, penjaga perlintasan, serta supervisor/safety officer. Sampel ditentukan menggunakan purposive sampling karena metode FMEA memerlukan responden dengan kompetensi dan pemahaman teknis mendalam (Maulana and Wicaksono 2024), dengan

jumlah 18 responden yang ditetapkan mengacu pada prinsip saturasi data pada penelitian mixed method sejenis (Subhaktiyasa 2024) serta prinsip kecukupan pakar dalam metode FMEA. Kriteria responden meliputi pegawai aktif dengan masa kerja minimal dua tahun pada bidang terkait dan bertugas langsung pada salah satu dari empat faktor risiko yang dikaji. Mengingat setiap responden hanya menilai faktor yang relevan dengan bidang tugasnya, jumlah responden dinilai berbeda pada tiap faktor, yaitu Faktor Manusia dan Prasarana masing-masing 15 responden, Faktor Sarana dan Lingkungan masing-masing 9 responden, dan Faktor Manajemen 12 responden. Instrumen penelitian terdiri atas pedoman wawancara semi-terstruktur untuk tahap kualitatif, dan kuesioner tertutup dengan skala 1-10 untuk Severity, Occurrence, dan Detection pada tahap kuantitatif, dilengkapi lembar observasi dan panduan studi dokumentasi. Teknik pengumpulan data dilaksanakan melalui wawancara, kuesioner (metode paper-based dan web-based melalui Google Form, mempertimbangkan pola kerja shift responden sebagaimana disarankan oleh Ceccato et al. (2024)), observasi, dan studi dokumentasi terhadap laporan KNKT, dokumen internal PT KAI, serta peraturan dan publikasi terkait. Wawancara didokumentasikan melalui perekaman audio dengan persetujuan responden dan ditranskripsikan secara verbatim (Cheng et al. 2024).

Data kualitatif dianalisis menggunakan model interaktif Miles dan Huberman yang terdiri atas reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan/verifikasi (Qomaruddin and Sa'diyah 2024). Data kuantitatif dianalisis melalui tahapan FMEA: uji validitas isi instrumen oleh dosen pembimbing sebagai validator, mengingat uji validitas statistik kurang sesuai untuk sampel purposive berukuran kecil (Díaz Rincón et al. 2024); uji reliabilitas antarresponden menggunakan Kendall's Coefficient of Concordance (Kendall's W), yang lebih sesuai untuk data ordinal dibandingkan Cohen's kappa yang biasa diterapkan pada data nominal (Josfeld, Huebner, and On behalf of the Working Group Prevention and Integrative Oncology in the German Cancer Society 2023), dengan nilai W berkisar 0 (tidak ada kesepakatan) hingga 1 (kesepakatan sempurna) (Jia et al. 2024); tabulasi data dan perhitungan $RPN = S \times O \times D$; perankingan dan klasifikasi tingkat risiko; analisis Pareto terhadap failure mode berdasarkan prinsip 80/20 untuk mengidentifikasi kelompok kecil failure mode yang berkontribusi besar terhadap total risiko; serta interpretasi hasil dengan mengaitkannya kembali pada temuan kualitatif untuk merumuskan rekomendasi mitigasi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data penelitian dikumpulkan pada tanggal 20 Juli hingga 6 Agustus 2026 melalui kuesioner FMEA yang disebar kepada 18 responden operasional PT KAI Divre II Sumatera

Barat pada jalur Padang-BIM, mencakup masinis, PPKA, teknisi sarana, penjaga perlintasan (PJL), teknisi prasarana, dan safety inspector. Jalur Padang-BIM merupakan jalur rel tunggal (single track) sepanjang 22,7 km yang melayani 8 stasiun/pemberhentian dan 42 titik perlintasan sebidang (33 berpenjagaan dan 9 tidak berpenjagaan), dengan 12 perjalanan per hari dan waktu tempuh rata-rata 48 menit.

Instrumen penelitian memuat 44 failure mode pada 17 indikator, terbagi ke dalam Faktor Manusia (14 failure mode), Faktor Peralatan & Infrastruktur yang dianalisis terpisah sebagai Sarana (5 failure mode) dan Prasarana (10 failure mode), Faktor Lingkungan (5 failure mode), dan Faktor Manajemen (10 failure mode). Setiap failure mode dinilai menggunakan parameter Severity (S), Occurrence (O), dan Detection (D) berskala 1-10, kemudian nilai rata-rata ketiganya dikalikan untuk memperoleh RPN.

Uji Reliabilitas Instrumen

Sebelum nilai RPN digunakan sebagai dasar analisis, dilakukan uji reliabilitas antarresponden menggunakan Kendall's Coefficient of Concordance (Kendall's W) secara terpisah untuk setiap faktor dan setiap parameter (S, O, D), mengingat cakupan responden pada tiap faktor berbeda (Manusia dan Prasarana $n=15$, Sarana dan Lingkungan $n=9$, Manajemen $n=12$). Hasil pengujian menunjukkan bahwa mayoritas kombinasi faktor dan parameter memiliki nilai W kategori cukup kuat hingga sangat kuat dan signifikan secara statistik ($p < 0,05$), berkisar antara $W=0,363$ hingga $W=1,000$, yang mengindikasikan bahwa responden pada umumnya cukup sepakat dalam menilai tingkat risiko antarfailure mode. Pengecualian ditemukan pada parameter Occurrence untuk Faktor Manajemen ($W=0,139$; $p=0,090$), yang menunjukkan tingkat kesepakatan lemah dan tidak signifikan secara statistik, diduga disebabkan oleh sebaran nilai yang sempit (floor effect) karena mayoritas responden menilai seluruh failure mode Faktor Manajemen jarang terjadi.

Hasil Perhitungan Risk Priority Number (RPN)

Berdasarkan hasil perhitungan RPN dari seluruh 44 failure mode, dilakukan pengategorian tingkat risiko dengan ambang batas $RPN > 150$ (Risiko Tinggi), $120 < RPN \leq 150$ (Risiko Sedang), dan $RPN \leq 120$ (Risiko Rendah), mengacu pada Stamatis (2003). Distribusi kategori risiko disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Distribusi Kategori Risiko Seluruh Failure Mode.

Kategori Risiko	Jumlah Item	Failure Mode
Risiko Tinggi ($RPN > 150$)	4	A13, A14, A12, P2
Risiko Sedang ($120 < RPN \leq 150$)	1	L4

Risiko Rendah (RPN $\leq$ 120)

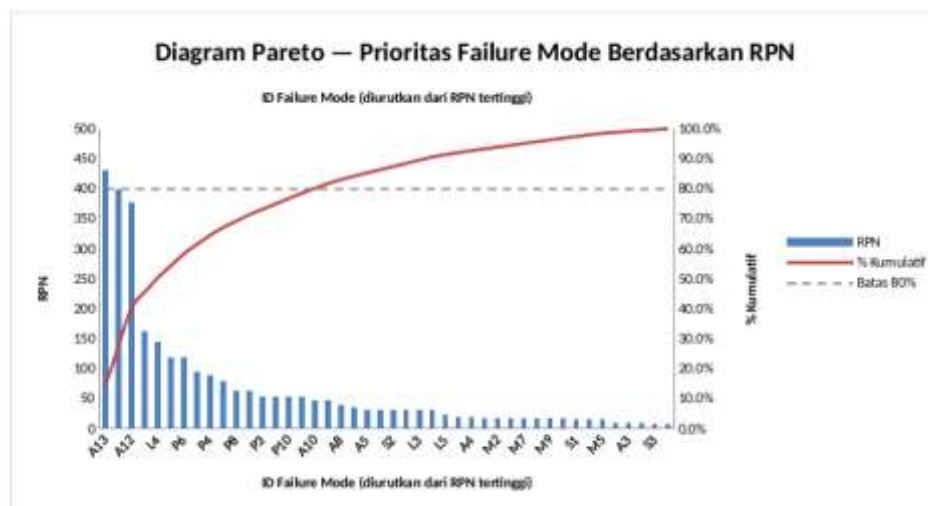
39

Sisanya

Sumber: Data primer diolah (2026)

Dari 44 failure mode yang diidentifikasi, mayoritas (39 failure mode atau 88,6%) berada pada kategori Risiko Rendah, sementara 4 failure mode (9,1%) berada pada kategori Risiko Tinggi dan 1 failure mode (2,3%) pada kategori Risiko Sedang. Failure mode dengan RPN tertinggi adalah A13 “Mengabaikan rambu peringatan perlintasan tanpa palang pintu (tidak dijaga)” (RPN=432), disusul A14 “Kendaraan mogok/terjebak di perlintasan sebidang” (RPN=400) dan A12 “Menerobos palang pintu dalam kondisi tertutup pada perlintasan berpenjagaan” (RPN=378). Ketiga failure mode tersebut seluruhnya berkaitan dengan perilaku pengguna jalan di perlintasan sebidang dan tergolong Faktor Manusia. Satu failure mode dari Faktor Prasarana, yaitu P2 “Rel patah/retak akibat kelelahan material” (RPN=162), juga termasuk kategori Risiko Tinggi, sedangkan satu-satunya failure mode kategori Risiko Sedang adalah L4 “Longsor menutup/merusak jalur” (RPN=144) dari Faktor Lingkungan.

Untuk melengkapi gambaran distribusi risiko secara kumulatif, dilakukan analisis Pareto terhadap nilai RPN seluruh 44 failure mode berdasarkan prinsip 80/20, yaitu bahwa sebagian kecil item umumnya berkontribusi terhadap sebagian besar total nilai yang diukur, guna mengidentifikasi kelompok failure mode yang berkontribusi paling besar terhadap total RPN kumulatif (“vital few”). Hasil analisis Pareto disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Pareto Nilai RPN Failure Mode Risiko Operasional Jalur Padang-BIM.

Diagram Pareto menunjukkan bahwa 17 dari 44 failure mode (38,6%) telah menyumbang sekitar 80% dari total RPN kumulatif. Analisis distribusi faktor pada kelompok 17 failure mode tersebut menunjukkan komposisi yang tidak merata antarfaktor: Faktor

Prasarana mendominasi dengan kontribusi 9 item (52,9%), diikuti Faktor Manusia 4 item (23,5%), Faktor Lingkungan 3 item (17,6%), dan Faktor Manajemen 1 item (5,9%), sementara Faktor Sarana tidak berkontribusi terhadap kelompok vital few ini. Temuan ini mengindikasikan bahwa di luar tiga failure mode dengan prioritas risiko tertinggi yang bersumber dari perilaku pengguna jalan, risiko kegagalan komponen dan kondisi infrastruktur jalur turut menjadi kontributor signifikan terhadap akumulasi risiko operasional secara keseluruhan, sehingga aspek pemeliharaan dan keandalan infrastruktur jalur perlu tetap menjadi perhatian dalam strategi mitigasi jangka menengah hingga panjang.

Pembahasan

Identifikasi Failure Mode Risiko Operasional

Hasil identifikasi menemukan 44 failure mode yang berpotensi menimbulkan risiko operasional pada jalur Padang-BIM, tersebar pada empat faktor sumber risiko. Dominasi Faktor Manusia sebagai kontributor failure mode terbanyak (14 dari 44 item, atau 31,8%) tidak dapat dilepaskan dari karakteristik indikator di dalamnya, yang mencakup baik kompetensi dan kepatuhan petugas operasional maupun perilaku pengguna jalan di titik perlintasan sebidang (A12, A13, A14). Risiko yang bersumber dari petugas operasional tergolong controllable risk karena berada dalam ranah kewenangan PT KAI melalui pelatihan, sertifikasi kompetensi, dan pengawasan kinerja internal, sedangkan risiko yang bersumber dari perilaku pengguna jalan tergolong exogenous risk yang memerlukan kolaborasi lintas-sektor dengan otoritas lalu lintas, pemerintah daerah, dan masyarakat.

Temuan ini konsisten dengan pola nasional. Data PT KAI menunjukkan tren kecelakaan di perlintasan sebidang yang meningkat dalam lima tahun terakhir, dari 269 kejadian pada 2020 menjadi 337 kejadian pada 2024, dengan total 1.226 korban selama 2020-2024, 450 di antaranya meninggal dunia (Masyarakat Transportasi Indonesia 2025), sementara Kementerian Perhubungan mencatat bahwa 85 persen kecelakaan terjadi di perlintasan yang tidak dijaga (Antara News 2024). Kesesuaian temuan jalur Padang-BIM dengan data nasional ini memperkuat validitas eksternal penelitian, sekaligus sejalan dengan literatur internasional yang menunjukkan bahwa mayoritas tabrakan di perlintasan sebidang disebabkan oleh kesalahan pengguna jalan, bukan kesalahan operator kereta (Hong et al. 2024).

Tingkat Risiko (Nilai RPN) Berdasarkan Faktor

Pada Faktor Manusia, sebelas failure mode terkait petugas operasional (A1-A11) memiliki Severity yang relatif setara dengan tiga failure mode terkait pengguna jalan (A12-A14), yaitu berkisar 7,80-10,00, namun menghasilkan RPN yang berbeda secara substansial (10-48 dibandingkan 378-432). Perbedaan tersebut ditentukan oleh nilai Occurrence dan

Detection: pada A1-A11 kedua parameter tergolong rendah (1,00-2,90), sedangkan pada A12-A14 nilai Detection mencapai 7,13-8,13, mendekati batas atas skala penilaian, yang mengindikasikan bahwa perilaku pelanggaran pengguna jalan dinilai sulit dicegah atau dideteksi secara dini.

Pola berbeda ditemukan pada Faktor Prasarana, yang secara konsisten memiliki Detection lebih tinggi (3,00-5,93) dibandingkan failure mode Faktor Manusia maupun Sarana (1,00-2,00), menjelaskan RPN tertinggi pada failure mode rel patah/retak (P2, RPN=162) meskipun frekuensi kejadiannya dinilai rendah (O=2,93). Kombinasi Severity tinggi (S=8,87) dan keterbatasan kapasitas deteksi dini keretakan struktural (D=5,93) menghasilkan risiko yang tetap signifikan. Pada Faktor Lingkungan, RPN tertinggi ditemukan pada longsor menutup/merusak jalur (L4, RPN=144), didorong oleh Occurrence dan Detection yang sama-sama moderat hingga tinggi (O=4,44; D=3,78), sejalan dengan kondisi geografis Sumatera Barat yang rawan bencana geologis. Sebaliknya, seluruh sepuluh failure mode pada Faktor Manajemen konsisten berada pada kategori Risiko Rendah (RPN maksimum 64), dengan Occurrence dan Detection yang seragam rendah (O: 1,08-2,87; D: 1,58-3,75) pada seluruh item, mengindikasikan bahwa tata kelola risiko operasional pada lingkup Divre II Sumatera Barat secara struktural telah berjalan relatif baik. Perbandingan keempat faktor menunjukkan pola gradasi yang konsisten pada dimensi Detection, dari yang paling mudah dideteksi (Faktor Manajemen dan Sarana, $D \leq 2,00$) hingga yang paling sulit dideteksi (perilaku pengguna jalan, D mencapai 8,13), yang menjadi faktor penentu utama tingginya peringkat risiko pada perlintasan sebidang.

Prioritas Risiko Tertinggi yang Harus Segera Ditangani

Kelima failure mode dengan prioritas risiko tertinggi disajikan pada Tabel 2. Ketiga failure mode dengan RPN tertinggi (A13, A14, A12) memiliki karakteristik dampak yang serupa, yaitu potensi tabrakan langsung antara rangkaian kereta dengan kendaraan atau pengguna jalan, yang berpotensi menimbulkan korban jiwa dan gangguan operasional akibat proses evakuasi dan investigasi. Karakteristik dampak yang bersifat katastrofik dan irreversible inilah yang mendasari tingginya Severity pada ketiga failure mode tersebut (S=8,53-9,67).

Tabel 2. Failure Mode dengan Prioritas Risiko Tertinggi.

Rank	Failure Mode	Faktor	RPN	Kategori
1	Mengabaikan rambu peringatan perlintasan tanpa palang pintu (tidak dijaga)	Manusia	432	Tinggi
2	Kendaraan mogok/terjebak di perlintasan sebidang	Manusia	400	Tinggi

3	Menerobos palang pintu dalam kondisi tertutup pada perlintasan berpenjagaan	Manusia	378	Tinggi
4	Rel patah/retak akibat kelelahan material	Peralatan-Prasarana	162	Tinggi
5	Longsor menutup/merusak jalur	Lingkungan	144	Sedang

Sumber: Data primer diolah (2026)

Failure mode rel patah/retak (P2) memiliki karakteristik dampak berbeda: potensi anjlokkan (derailment) yang selain berisiko menimbulkan korban jiwa dan kerusakan sarana bernilai ekonomis tinggi, juga berdampak pada penutupan jalur untuk perbaikan sehingga menghambat seluruh perjalanan pada segmen tersebut. Failure mode longsor (L4) memiliki efek gabungan risiko keselamatan dan kontinuitas operasional, karena proses pembersihan material longsor dan perbaikan struktur jalur memerlukan waktu penanganan yang tidak singkat, khususnya pada segmen jalur yang melintasi wilayah perbukitan.

Strategi Mitigasi yang Direkomendasikan

Berdasarkan hasil analisis FMEA, strategi mitigasi untuk mengabaikan rambu peringatan (A13) dan menerobos palang pintu tertutup (A12) meliputi peningkatan sosialisasi dan edukasi keselamatan perlintasan sebidang bekerja sama dengan pemerintah daerah dan kepolisian, mengingat program edukasi berbasis pengalaman simulatif terbukti dapat mengubah sikap dan niat perilaku pengguna jalan ke arah yang lebih aman (Aghastya et al. 2021); pemasangan rambu dan marka tambahan yang lebih mencolok; evaluasi kelayakan penambahan palang pintu otomatis pada titik rawan; serta peningkatan pengawasan bersama aparat penegak hukum, mengingat pemantauan yang tampak jelas (conspicuous monitoring) seperti kamera pengawas terbukti berpotensi menurunkan ketidakpatuhan pengguna jalan.

Untuk kendaraan mogok/terjebak di perlintasan (A14), mitigasi meliputi pemasangan rambu peringatan kondisi jalan, penyediaan nomor kontak darurat, dan koordinasi dengan dinas perhubungan untuk perbaikan kondisi jalan di sekitar perlintasan rawan. Untuk rel patah/retak (P2), mitigasi meliputi peningkatan frekuensi inspeksi jalur menggunakan track geometry car atau ultrasonic testing sejalan dengan praktik condition-based maintenance yang terbukti efektif mendeteksi keretakan rel secara dini (Bris-Peñalver, Verdecia-Peña, and Alonso 2026), serta penyusunan jadwal penggantian rel preventif berbasis usia pakai dan beban lalu lintas, bukan hanya bersifat reaktif. Untuk longsor (L4), mitigasi meliputi pemasangan sistem peringatan dini (early warning system) berbasis analisis curah hujan dan pergerakan lereng (Andang et al. 2025), kerja sama dengan BPBD dan BMKG untuk pemantauan curah hujan, serta penguatan struktur lereng pada titik-titik berisiko tinggi.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

Penelitian ini mengidentifikasi 44 failure mode risiko operasional pada jalur Padang-BIM yang tersebar pada empat faktor: Manusia, Peralatan & Infrastruktur, Lingkungan, dan Manajemen. Lima failure mode dengan RPN tertinggi adalah mengabaikan rambu peringatan pada perlintasan tanpa palang pintu (A13, RPN=432), kendaraan mogok/terjebak di perlintasan sebidang (A14, RPN=400), dan menerobos palang pintu tertutup (A12, RPN=378) yang seluruhnya bersumber dari perilaku pengguna jalan (Risiko Tinggi); rel patah/retak akibat kelelahan material (P2, RPN=162, Risiko Tinggi); serta longsor menutup/merusak jalur (L4, RPN=144, Risiko Sedang). Seluruh failure mode Faktor Manajemen sebaliknya berada pada kategori Risiko Rendah, mengindikasikan tata kelola manajerial pada jalur ini secara umum sudah berjalan baik. Temuan ini menunjukkan bahwa keselamatan perlintasan sebidang, bukan kegagalan teknis internal, merupakan risiko operasional paling kritis yang perlu ditangani segera.

Berdasarkan temuan tersebut, PT KAI Divre II Sumatera Barat disarankan memprioritaskan program keselamatan perlintasan sebidang (edukasi masyarakat, penambahan rambu/marka, evaluasi palang pintu otomatis, penegakan aturan bersama aparat terkait), meningkatkan inspeksi dan pemeliharaan preventif jalur rel, serta memasang sistem peringatan dini pada titik rawan longsor. Penelitian ini masih terbatas pada penilaian persepsional (self-report) yang belum divalidasi dengan data historis insiden aktual, sehingga penelitian selanjutnya disarankan melakukan validasi silang tersebut, mempertimbangkan pendekatan Fuzzy FMEA, serta mengevaluasi efektivitas implementasi strategi mitigasi yang direkomendasikan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT Kereta Api Indonesia (Persero) Divisi Regional II Sumatera Barat atas izin dan dukungan data yang diberikan selama proses penelitian, kepada seluruh responden yang telah meluangkan waktu untuk mengisi kuesioner dan wawancara, serta kepada dosen pembimbing atas arahan dan masukan yang diberikan. Artikel ini merupakan bagian dari skripsi penulis pada Program Studi Manajemen, Departemen Manajemen, Fakultas Ekonomi dan Bisnis, Universitas Negeri Padang.

DAFTAR REFERENSI

- Aghastya, Adya, Septiana Widi Astuti, Natriya Faisal Rachman, and Wahyu Tamtomo Adi. 2021. "Sosialisasi di Perlintasan Sebidang sebagai Upaya Meningkatkan Disiplin Pengguna Jalan." *Madiun Spoor (JPM)* 1(1). [doi:10.37367/jpm.v1i1.142](https://doi.org/10.37367/jpm.v1i1.142).
- Al Husaini, Cava Billa. 2023. "Pemahaman Resiko Dan Manajemen Resiko." *Jurnal Nuansa : Publikasi Ilmu Manajemen dan Ekonomi Syariah* 1(3):318–25. [doi:10.61132/nuansa.v1i3.272](https://doi.org/10.61132/nuansa.v1i3.272).
- Andang, Asep, Eka Wahyu Hidayat, Andhy Romdani, Prama Permana, Andre Taufik Firdaus, Miftahul Huda Pratama, and Elpan Ahmad Rifansyah. 2025. "Pengembangan purwarupa sistem peringatan dini longsor berbasis Internet of Things (IoT)." *JITEL (Jurnal Ilmiah Telekomunikasi, Elektronika, dan Listrik Tenaga)* 5(1):1–10. [doi:10.35313/jitel.v5.i1.2025.1-10](https://doi.org/10.35313/jitel.v5.i1.2025.1-10).
- Antara News. 2024. "KAI Catat 535 Kejadian Tabrakan Kereta Api Sepanjang Januari-Agustus." *ANTARA News*.
- Aprikasari, Manda, Laurence Benedicta, Nathanael Abel Adrielvino, and Afifah Trista Ayunda. 2024. "Penerapan ISO 31000:2018 untuk Manajemen Risiko IT pada Sistem Penerbitan PT. X." *Jurnal Informasi, Sains dan Teknologi* 7(2):154–67. [doi:10.55606/isaintek.v7i2.269](https://doi.org/10.55606/isaintek.v7i2.269).
- Bris-Peñalver, Francisco Javier, Randy Verdecia-Peña, and José I. Alonso. 2026. "A Survey of AI-Enabled Predictive Maintenance for Railway Infrastructure: Models, Data Sources, and Research Challenges." *Sensors* 26(3):906. [doi:10.3390/s26030906](https://doi.org/10.3390/s26030906).
- Ceccato, Vania, Gabriel Gliori, Per Näsman, and Catherine Sundling. 2024. "Comparing Responses from a Paper-Based Survey with a Web-Based Survey in Environmental Criminology." *Crime Prevention and Community Safety* 26(2):216–43. [doi:10.1057/s41300-024-00204-9](https://doi.org/10.1057/s41300-024-00204-9).
- Chandra, Primadi, Muhammad Riski Afandy, and Jatmiko Aji Wicaksono. 2025. "FAULT ANALYSIS ON LRT JABODEBEK FACILITIES USING FMEA AND FISHBONE METHODS." 01.
- Cheng, Qinqin, Yongyi Chen, Yinglong Duan, Jianfei Xie, Qinghui Zhang, and Hongling Zheng. 2024. "Exploring the Spiritual Needs of Patients with Advanced Cancer in China: A Qualitative Study." *Scientific Reports* 14(1):4009. [doi:10.1038/s41598-024-54362-9](https://doi.org/10.1038/s41598-024-54362-9).
- Díaz Rincón, Maritza, Paula Constanza Arango Franco, Jose Alejandro Vergel Torrado, and Olga Lucia Lora Díaz. 2024. "Validación de Contenido de Un Cuestionario Sobre Percepciones Del Personal de Salud Acerca de Las Tecnologías." *Revista Cuidarte* 16(1). [doi:10.15649/cuidarte.4145](https://doi.org/10.15649/cuidarte.4145).
- Gregory, Hutchinss. 2018. *ISO 31000: 2018 Enterprise Risk Management*. Greg Hutchins.
- Hamzah, Imam Royani, Rista Amelia, and Siti Khusnia. 2025. "Analisis Manajemen Risiko Operasional pada Bank Sumsel Babel Syari'ah KC. Belitung." *Jurnal Pendidikan Indonesia* 6(3):1490–1502. [doi:10.59141/japendi.v6i3.7561](https://doi.org/10.59141/japendi.v6i3.7561).
- Hanafi, Mamduh M. 2009. *Manajemen Risiko*. Yogyakarta: UPP STIM YKPN.

- Hendra, Franka, Roslina Mohammad, Astuty Amrin, Nurazeen Maarop, and Teuku Yuri Zagloel. 2024. "Systematic Literature Review of Risk Assessment Techniques, Standard and Guidelines for Railway." *International Journal of Technology* 15(4):1148. [doi:10.14716/ijtech.v15i4.6384](https://doi.org/10.14716/ijtech.v15i4.6384).
- Hong, Wei-Ting, Geoffrey Clifton, and John D. Nelson. 2024. "A Data-Driven Conceptual Framework for Understanding the Nature of Hazards in Railway Accidents." *Transport Policy* 152:102–17. [doi:10.1016/j.tranpol.2024.05.007](https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2024.05.007).
- Hopkin, Paul. 2018. *Fundamentals of Risk Management: Understanding, Evaluating and Implementing Effective Risk Management*. 5th ed. Kogan Page Publishers.
- Iskandar, Hendi, and Alif Athallah. 2026. "Pengaruh Infrastruktur Transportasi dan Mobilitas terhadap Kinerja Angkutan Barang Kereta Api di Indonesia Tahun 2020–2024." 5(2).
- Jia, Ying Ying, Zhi Tin Guo, Yu Ping Zhang, and Jian Ping Song. 2024. "Development of a Complex Intervention to Prevent Complications in Patients Recovering at Home after Transcatheter Aortic Valve Replacement by Optimizing Home-Based Cardiac Rehabilitation Processes: A Delphi Study." *Frontiers in Public Health* 12:1491311. [doi:10.3389/fpubh.2024.1491311](https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1491311).
- Jiang, Ying, Zhongyu Chen, Yuhong Wang, Jingjing Gao, Xiaomei Zhang, Ruoyu Hu, and Hao Wu. 2024. "The Impact of Precipitation Changes on the Safety of Railway Operations in China under the Background of Climate Change." *Frontiers in Earth Science* 12:1319736. [doi:10.3389/feart.2024.1319736](https://doi.org/10.3389/feart.2024.1319736).
- Josfeld, Lena, Jutta Huebner, and On behalf of the Working Group Prevention and Integrative Oncology in the German Cancer Society. 2023. "Development and Analysis of Quality Assessment Tools for Different Types of Patient Information – Websites, Decision Aids, Question Prompt Lists, and Videos." *BMC Medical Informatics and Decision Making* 23(1):111. [doi:10.1186/s12911-023-02204-5](https://doi.org/10.1186/s12911-023-02204-5).
- Li, Xiaoxi, Xueru Cao, Jinyan Deng, and Xinyuan Li. 2025. "Modeling and Simulation of Railway Safety Management with Public Supervision and Dynamic Incentives: A Four-Party Evolutionary Game and System Dynamics Approach" edited by Y.-H. Kuo. *PLOS One* 20(8):e0330100. [doi:10.1371/journal.pone.0330100](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0330100).
- Luan, Rui, and Rengkui Liu. 2025. "Risk Assessment Model for Railway Track Maintenance Operations Based on Combined Weights and Nonlinear FCE." *Applied Sciences* 15(13):7614. [doi:10.3390/app15137614](https://doi.org/10.3390/app15137614).
- Masyarakat Transportasi Indonesia. 2025. "Bahaya Masih Mengintai Di Perlintasan Sebidang." *Masyarakat Transportasi Indonesia*.
- Maulana, Angga Ahmad, and I. Wayan Suweca. 2023. "A Review of RAMS Analysis Application on Railway System." *Jurnal Teknologi Dan Manajemen* 4(2):57–77. [doi:10.31284/j.jtm.2023.v4i2.4523](https://doi.org/10.31284/j.jtm.2023.v4i2.4523).
- Maulana, Angga Tri, and Satrio Wicaksono. 2024. "Risk Analysis of Railway Infrastructure Asset Using Hazard Identification and FMEA Analysis on Track Asset." *Jurnal Perkeretaapian Indonesia (Indonesian Railway Journal)* 8(2):25–40. [doi:10.37367/jpi.v8i2.345](https://doi.org/10.37367/jpi.v8i2.345).
- Nasarudin, Mitra Rahayu, Dian Paramitha Asyari, Abdul Sofyan, Muhammad Fadli, Kurnia Krisna Hari, Berita Mambarasi Nehe, Yelfiza, Ely Mulyati, Saipul Abbas, Moh Safii, and Fatma Sarie. 2024. *Metode Penelitian Kombinasi (Mixed Method)*. CV. Gita Lentera.

- Nedeliaková, Eva, Michal Petr Hranický, and Michal Valla. 2022. "Risk Identification Methodology Regarding the Safety and Quality of Railway Services." *Production Engineering Archives* 28(1):21–29. [doi:10.30657/pea.2022.28.03](https://doi.org/10.30657/pea.2022.28.03).
- PT Kereta Api Indonesia (Persero). 2024. *Memperkuat Layanan Dan Menjamin Keselamatan Untuk Wujudkan Keberlanjutan*. Jakarta: PT Kereta Api Indonesia (Persero). https://www.kai.id/hubungan_investor/laporan/.
- Qomaruddin, Qomaruddin, and Halimah Sa'diyah. 2024. "Kajian Teoritis tentang Teknik Analisis Data dalam Penelitian Kualitatif: Perspektif Spradley, Miles dan Huberman." *Journal of Management, Accounting, and Administration* 1(2):77–84. [doi:10.52620/jomaa.v1i2.93](https://doi.org/10.52620/jomaa.v1i2.93).
- Rahardjo, Benedictus. 2017. "PERANCANGAN SISTEM MANAJEMEN GUDANG MATERIAL PENUNJANG DI PT XYZ." *J@ti Undip: Jurnal Teknik Industri* 12(2):127. doi:10.14710/jati.12.2.127-136.
- Read, Gemma J. M., Jolene A. Cox, Adam Hulme, Anjum Naweed, and Paul M. Salmon. 2021. "What Factors Influence Risk at Rail Level Crossings? A Systematic Review and Synthesis of Findings Using Systems Thinking." *Safety Science* 138:105207. [doi:10.1016/j.ssci.2021.105207](https://doi.org/10.1016/j.ssci.2021.105207).
- Ruiz-Canela López, José. 2021. "How Can Enterprise Risk Management Help in Evaluating the Operational Risks for a Telecommunications Company?" *Journal of Risk and Financial Management* 14(3):139. [doi:10.3390/jrfm14030139](https://doi.org/10.3390/jrfm14030139).
- Subhaktiyasa, Putu Gede. 2024. "Menentukan Populasi dan Sampel: Pendekatan Metodologi Penelitian Kuantitatif dan Kualitatif." *Jurnal Ilmiah Profesi Pendidikan* 9(4):2721–31. [doi:10.29303/jipp.v9i4.2657](https://doi.org/10.29303/jipp.v9i4.2657).
- Tengor, Rifangga C. T., Sri Murni, and Silcyljeova Moniharapon. 2015. "THE APPLICATION OF RISK MANAGEMENT TO MINIMIZE THE RISK OF BAD DEBTS IN PT. BANK SULUTGO."
- Wang, Brandon Z., Christopher P. L. Barkan, and M. Rapik Saat. 2020. "Quantitative Analysis of Changes in Freight Train Derailment Causes and Rates." *Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems* 146(11):04020127. [doi:10.1061/JTEPBS.0000453](https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000453).
- Weik, Norman, Matthias Volk, Joost-Pieter Katoen, and Nils Nießen. 2022. "DFT Modeling Approach for Operational Risk Assessment of Railway Infrastructure." *International Journal on Software Tools for Technology Transfer* 24(3):331–50. [doi:10.1007/s10009-022-00652-4](https://doi.org/10.1007/s10009-022-00652-4).
- Yusnita, Raja Ria, Loso Judijanto, and Shela Zahidah Wandani. 2023. *Manajemen Risiko*. PT MAFY MEDIA LITERASI INDONESIA.
- Zhao, Wenqiang, Leishan Zhou, and Chang Han. 2025. "A Hybrid Optimization Approach Combining Rolling Horizon with Deep-Learning-Embedded NSGA-II Algorithm for High-Speed Railway Train Rescheduling Under Interruption Conditions." *Sustainability* 17(6):2375. [doi:10.3390/su17062375](https://doi.org/10.3390/su17062375).