



Identifikasi Dan Analisis Risiko Pelaksanaan Proyek Jalan Tol Berbasis Severity Index: Studi Kasus Jalan Tol Prabumulih–Muara Enim

Kodrat Insany Taqwim^{1*}, Firdaus², Farlyn Rosyad³

¹⁻³ Universitas Bina Darma, Indonesia

email: kodratoi@gmail.com¹

Article Info :

Received:
02-01-2025
Revised:
20-01-2025
Accepted:
12-02-2025

Abstract

This study investigates dominant risks affecting time and cost performance in the Prabumulih–Muara Enim Toll Road Project (Zone 5) within the Trans Sumatra Toll Road corridor. The research adopts an empirical quantitative approach using a two-stage questionnaire and semi-structured interviews involving 24 key project stakeholders selected through purposive sampling. Risk variables were initially compiled from literature, project documents, and preliminary site observations, then validated through a Guttman-scale screening process to ensure contextual relevance. The validated risks were subsequently assessed using the Severity Index (SI) to quantify perceived probability and impact levels, and further mapped into a Probability–Impact Matrix to classify risk criticality and prioritize mitigation. The findings demonstrate that dominant risks emerge not only from technical construction factors but also from managerial coordination, procurement delays, logistical constraints, and safety and quality compliance, which collectively intensify schedule slippage and cost escalation. Methodologically, the integrated SI–PIM framework strengthens risk prioritization by combining structured screening, quantitative severity measurement, and decision-oriented mapping, offering a replicable model for toll road risk governance in large-scale infrastructure projects.

Keywords: Severity Index, Toll Road Project, Risk Analysis, Probability–Impact Matrix, Time and Cost Performance.

Abstrak

Penelitian ini mengkaji risiko-risiko utama yang memengaruhi kinerja waktu dan biaya dalam Proyek Jalan Tol Prabumulih–Muara Enim (Zona 5) di koridor Jalan Tol Trans Sumatra. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif empiris dengan metode kuesioner dua tahap dan wawancara semi-terstruktur yang melibatkan 24 pemangku kepentingan utama proyek yang dipilih melalui sampling purposif. Variabel risiko awalnya dikompilasi dari literatur, dokumen proyek, dan pengamatan awal di lokasi, kemudian diverifikasi melalui proses penyaringan skala Guttman untuk memastikan relevansi kontekstual. Risiko yang telah diverifikasi kemudian dievaluasi menggunakan Indeks Keparahatan (SI) untuk mengukur tingkat probabilitas dan dampak yang dirasakan, dan selanjutnya dipetakan ke dalam Matriks Probabilitas–Dampak untuk mengklasifikasikan tingkat kritisitas risiko dan memprioritaskan mitigasi. Temuan menunjukkan bahwa risiko dominan muncul tidak hanya dari faktor teknis konstruksi tetapi juga dari koordinasi manajerial, penundaan pengadaan, kendala logistik, dan kepatuhan terhadap keselamatan dan kualitas, yang secara kolektif memperparah keterlambatan jadwal dan kenaikan biaya. Secara metodologis, kerangka kerja terintegrasi SI–PIM memperkuat prioritas risiko dengan menggabungkan penyaringan terstruktur, pengukuran keparahan kuantitatif, dan pemetaan berorientasi keputusan, menawarkan model yang dapat direplikasi untuk tata kelola risiko jalan tol dalam proyek infrastruktur berskala besar.

Kata Kunci: Indeks Keparahatan, Proyek Jalan Tol, Analisis Risiko, Matriks Probabilitas–Dampak, Kinerja Waktu dan Biaya.



©2022 Authors.. This work is licensed under a Creative Commons Attribution-Non Commercial 4.0 International License.
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

PENDAHULUAN

Pembangunan jalan tol pada dekade terakhir semakin diposisikan sebagai infrastruktur strategis yang tidak hanya menghubungkan pusat-pusat ekonomi, tetapi juga menjadi instrumen utama dalam meningkatkan efisiensi logistik, ketahanan rantai pasok, dan daya saing kawasan dalam lanskap ekonomi global yang bergerak menuju integrasi jaringan transportasi berstandar tinggi. Di berbagai negara berkembang, percepatan pembangunan tol cenderung berjalan beriringan dengan peningkatan kompleksitas proyek, baik dari sisi teknis, pembiayaan, maupun tata kelola risiko, sehingga manajemen

risiko tidak lagi dapat dipahami sebagai prosedur administratif, melainkan sebagai mekanisme pengendalian kinerja proyek yang menentukan ketepatan waktu dan efisiensi biaya secara nyata (Darmawi, 2008). Konteks Indonesia menunjukkan dinamika serupa, di mana pengembangan jalan tol menjadi agenda nasional yang agresif dan berskala besar, sehingga eksposur terhadap risiko konstruksi, risiko operasional, serta risiko keselamatan kerja meningkat secara sistemik dalam berbagai fase pelaksanaan (Badan Pengatur Jalan Tol, 2021). Perkembangan mutakhir dalam kajian manajemen risiko konstruksi juga memperlihatkan kecenderungan menuju pendekatan kuantitatif yang lebih terstruktur melalui indeks risiko, pemetaan probabilitas–dampak, serta integrasi evaluasi risiko dengan indikator kinerja proyek, karena pendekatan kualitatif semata dinilai tidak cukup untuk memandu prioritas mitigasi pada proyek yang memiliki banyak ketidakpastian dan keterkaitan antar-risiko.

Literatur yang berkembang memperlihatkan bahwa penelitian risiko proyek konstruksi di Indonesia telah menghasilkan berbagai model identifikasi dan evaluasi risiko, terutama melalui metode yang berorientasi pada keselamatan kerja, standar manajemen risiko, serta indeks kuantifikasi dampak. Kajian HIRARC dan HAZOP, misalnya, menegaskan bahwa pemetaan bahaya dan penilaian risiko secara sistematis mampu mengungkap titik-titik kritis dalam aktivitas kerja, namun orientasinya cenderung kuat pada risiko K3 dan belum selalu dikaitkan langsung dengan kinerja waktu dan biaya proyek secara simultan (Akbar & Jufriyanto, 2025). Pendekatan berbasis ISO 31000:2018 juga menunjukkan bahwa struktur kerangka manajemen risiko dapat memperjelas proses identifikasi, analisis, dan perlakuan risiko, tetapi penerapannya sering kali berakhir pada pemetaan kategori risiko tanpa kuantifikasi prioritas yang cukup tajam untuk pengambilan keputusan berbasis data (Nugroho & Purwanto, 2024). Pada ranah risiko kecelakaan kerja, model Bowtie memberikan nilai tambah karena mampu memetakan hubungan sebab-akibat, barrier, dan konsekuensi secara eksplisit, namun model ini lebih menekankan logika kontrol bahaya daripada memetakan dominansi risiko proyek dalam perspektif biaya dan waktu (Prabowo & Anggita, 2023). Literatur review yang memetakan tren K3 dan respons kedaruratan di jalan tol juga memperlihatkan bahwa kajian risiko pada infrastruktur tol berkembang cepat, tetapi sebagian besar fokusnya masih pada aspek keselamatan operasional dan manajemen insiden, bukan pada integrasi risiko pelaksanaan konstruksi yang memengaruhi deviasi kinerja proyek (Effendi & Siregar, 2024).

Pada konteks proyek jalan tol secara spesifik, penelitian berbasis Severity Index telah menunjukkan kapasitasnya sebagai instrumen kuantitatif yang efektif untuk menentukan prioritas risiko dominan berdasarkan persepsi dan data lapangan, sehingga dapat membantu proyek mengidentifikasi risiko yang paling berpengaruh pada pelaksanaan. Studi pada proyek Jalan Tol Solo–Yogyakarta Seksi 1, misalnya, memperlihatkan bahwa Severity Index mampu menghasilkan pemeringkatan risiko yang operasional dan mudah diterjemahkan menjadi agenda mitigasi, terutama pada risiko teknis, sumber daya, serta faktor eksternal proyek (Marselina et al., 2022). Kajian risiko pada proyek tol Terbanggi Besar–Pematang Panggang–Kayu Agung juga menegaskan bahwa pendekatan identifikasi dan evaluasi risiko dapat digunakan untuk memetakan risiko dominan pelaksanaan, tetapi pembahasan dalam banyak studi masih cenderung tersegmentasi antara risiko yang memengaruhi waktu dan risiko yang memengaruhi biaya, sehingga hubungan simultan keduanya belum menjadi pusat analisis (Putra & Hidayat, 2024). Penelitian keselamatan jalan pada masa konstruksi melalui kombinasi work zone dan hotspot mapping memperkaya perspektif bahwa risiko dalam proyek tol tidak hanya bersumber dari aktivitas konstruksi internal, melainkan juga dari interaksi dengan lalu lintas dan perilaku pengguna jalan di sekitar zona kerja, namun kontribusinya lebih kuat pada aspek keselamatan lalu lintas dibanding pemetaan risiko dominan terhadap deviasi waktu dan biaya proyek (Jolanda et al., 2025). Literatur review mengenai manajemen risiko proyek juga mengindikasikan bahwa kecenderungan studi di Indonesia masih berputar pada inventarisasi faktor risiko, sementara kebutuhan akan model integratif yang mampu memetakan risiko dominan sekaligus menghubungkannya pada indikator kinerja proyek belum terjawab secara memadai (Prasetyo et al., 2023).

Keterbatasan utama dalam lanskap riset tersebut terletak pada masih dominannya pendekatan yang berfokus pada identifikasi risiko secara umum atau menganalisis dampak risiko terhadap waktu dan biaya secara terpisah, padahal dalam praktik proyek, keterlambatan dan pembengkakan biaya sering kali muncul sebagai konsekuensi yang saling mengunci dari risiko yang sama. Literatur yang membahas proyek di daerah 3T, misalnya, menunjukkan bahwa risiko eksternal seperti akses logistik, ketersediaan material, dan ketidakpastian sosial-lingkungan dapat menjadi faktor dominan, namun struktur analisisnya belum banyak menempatkan probabilitas risiko dan dampaknya terhadap dua dimensi

kinerja utama secara simultan dalam satu kerangka evaluasi (Iman & Rusgiyanto, 2025). Kesenjangan lain muncul pada aspek metodologis, yaitu keterbatasan penelitian berbasis data empiris lapangan yang mengombinasikan Severity Index dengan Matriks Probabilitas–Dampak untuk memetakan risiko dominan secara komprehensif pada konteks proyek jalan tol nasional, khususnya di wilayah Sumatera Selatan yang memiliki karakteristik geoteknik, logistik, serta dinamika proyek yang berbeda dari koridor lain. Dari sisi pengolahan data, banyak penelitian juga masih menggunakan teknik statistik yang bersifat deskriptif sederhana, sehingga belum selalu menunjukkan argumentasi kuat mengenai ketepatan pemilihan indikator dan perhitungan indeks untuk membangun prioritas risiko yang dapat diuji dan direplikasi (Akdon & Riduwan, 2010).

Kondisi tersebut menimbulkan urgensi ilmiah dan praktis yang jelas, karena proyek jalan tol berskala besar menuntut sistem pengendalian risiko yang mampu menghasilkan prioritas mitigasi yang berbasis bukti, bukan sekadar intuisi manajerial atau pengalaman proyek sebelumnya. Dalam realitas pelaksanaan proyek, risiko yang tampak kecil pada tahap awal dapat berkembang menjadi deviasi waktu yang signifikan ketika probabilitasnya tinggi dan konsekuensinya memengaruhi rantai aktivitas kritis, sementara risiko biaya sering kali tidak muncul sebagai lonjakan langsung, melainkan sebagai akumulasi klaim, perubahan desain, pemborosan sumber daya, serta gangguan produktivitas yang berkepanjangan. Kerangka manajemen risiko klasik telah menekankan bahwa risiko harus dipahami sebagai kombinasi ketidakpastian dan konsekuensi, sehingga pemetaan yang hanya menyoroti daftar risiko tanpa kuantifikasi probabilitas dan dampak akan menghasilkan mitigasi yang tidak proporsional terhadap ancaman nyata proyek (Darmawi, 2008). Pada proyek infrastruktur nasional, kebutuhan tersebut menjadi semakin penting karena keputusan mitigasi tidak hanya berdampak pada kontraktor, tetapi juga pada owner, pengguna jalan, dan stabilitas pembiayaan publik, sehingga pemetaan risiko dominan yang terstruktur dapat meningkatkan kualitas pengambilan keputusan dan akuntabilitas pelaksanaan proyek (Badan Pengatur Jalan Tol, 2021).

Penelitian ini ditempatkan dalam lanskap keilmuan manajemen risiko konstruksi sebagai upaya memperkuat integrasi antara pendekatan kuantitatif berbasis Severity Index dan pemetaan probabilitas–dampak untuk menghasilkan identifikasi risiko dominan yang relevan secara operasional pada proyek jalan tol. Fokus riset diarahkan pada pelaksanaan Proyek Pembangunan Jalan Tol Prabumulih–Muara Enim Zona 5 (Sta. 95+800 hingga 103+800), Kabupaten Muara Enim, Sumatera Selatan, yang merupakan bagian dari koridor Tol Trans Sumatera dan memiliki dinamika risiko khas karena skala pekerjaan, karakteristik lapangan, serta tuntutan kinerja waktu dan biaya yang ketat. Penelitian dilakukan pada periode Juli–Agustus 2021 dengan pendekatan kuantitatif untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan menentukan risiko dominan yang memengaruhi kinerja waktu dan biaya pada fase pelaksanaan. Kontribusi teoretis yang ditawarkan terletak pada pengayaan model evaluasi risiko proyek jalan tol melalui integrasi indeks dominansi risiko dan pemetaan probabilitas–dampak dalam satu kerangka analisis yang konsisten, sementara kontribusi metodologisnya terletak pada penerapan Severity Index yang dipadukan dengan Matriks Probabilitas–Dampak untuk menghasilkan pemetaan risiko yang lebih terstruktur, terukur, dan dapat dijadikan dasar prioritas mitigasi bagi owner maupun kontraktor dalam meningkatkan kinerja waktu dan biaya proyek.

METODE PENELITIAN

Studi ini bersifat **empiris** karena seluruh temuan utama dibangun dari data lapangan yang dikumpulkan secara langsung pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Prabumulih–Muara Enim Zona 5 (Sta. 95+800–103+800), Kabupaten Muara Enim, Sumatera Selatan, selama periode Juli–Agustus 2021, dengan tujuan menghasilkan pemetaan risiko dominan yang berbasis bukti dan dapat direplikasi. Inovasi metodologis penelitian terletak pada pengembangan prosedur kuantitatif dua-tahap yang mengintegrasikan *risk screening* berbasis skala Guttman dan pemeringkatan risiko berbasis Severity Index (SI) yang kemudian diproyeksikan ke Matriks Probabilitas–Dampak untuk memperoleh klasifikasi risiko dominan yang simultan terhadap kinerja waktu dan biaya, bukan sekadar inventarisasi risiko atau evaluasi parsial. Tahap pertama dilakukan melalui identifikasi awal variabel risiko dari studi literatur, dokumen proyek (kontrak, jadwal, dan laporan pelaksanaan), serta observasi awal lapangan, yang menghasilkan 54 variabel risiko kandidat sebagai *risk register* awal. Tahap kedua mengoperasionalkan validasi relevansi risiko melalui kuesioner tahap 1 dengan skala Guttman (Ya/Tidak) dan ambang batas relevansi 50%, sehingga hanya risiko yang memiliki dukungan empiris memadai dari responden yang dipertahankan untuk analisis lanjutan. Tahap ketiga melakukan

pengukuran probabilitas dan dampak risiko menggunakan kuesioner tahap 2 berbasis skala ordinal 0–4 untuk menghitung Severity Index, disertai wawancara semi-terstruktur untuk memperkaya interpretasi dan mengurangi bias persepsi, sehingga hasil kuantitatif tidak berdiri sebagai angka semata melainkan terhubung dengan konteks operasional proyek. Populasi penelitian mencakup pihak-pihak yang terlibat langsung dalam pengelolaan proyek, sementara sampel ditentukan menggunakan *purposive sampling* dengan kriteria pengalaman kerja minimal lima tahun dan keterlibatan dalam keputusan teknis maupun manajerial, menghasilkan 24 responden yang terdiri dari Project Manager, Site Operational Manager, Contract and Risk Manager, Administration Manager, Engineering Manager, Procurement Manager, serta QHSE Manager, yang dipandang memadai untuk studi berbasis persepsi risiko karena komposisinya mewakili fungsi-fungsi kunci yang menjadi sumber utama kejadian risiko di proyek jalan tol.

Ketahanan metodologis penelitian ini dijaga melalui validasi instrumen, triangulasi data, serta metrik evaluasi yang eksplisit dan dapat diaudit, sehingga hasil pemetaan risiko tidak bersifat spekulatif maupun sekadar opini kelompok tertentu. Validasi internal instrumen dilakukan sebelum analisis utama melalui uji validitas korelasi item–total (*Corrected Item-Total Correlation*) untuk memastikan setiap butir pertanyaan memiliki keterkaitan yang memadai dengan konstruk risiko yang diukur, sementara reliabilitas diuji menggunakan koefisien Cronbach's Alpha dengan ambang $>0,70$ untuk menjamin konsistensi internal dan stabilitas pengukuran. Evaluasi risiko dilakukan menggunakan dua metrik utama yang saling melengkapi, yaitu (i) Severity Index sebagai ukuran kuantitatif dominansi risiko berdasarkan agregasi bobot respons, serta (ii) nilai tingkat risiko pada Matriks Probabilitas–Dampak yang dihitung melalui perkalian probabilitas dan dampak ($R = P \times I$) pada skala 1–5, sehingga risiko tidak hanya diurutkan berdasarkan persepsi “besar-kecil” semata tetapi juga diposisikan dalam kuadran pengendalian yang relevan untuk pengambilan keputusan mitigasi. Nilai SI kemudian diklasifikasikan ke dalam lima kategori interval (0–20 sangat rendah, 21–40 rendah, 41–60 sedang, 61–80 tinggi, 81–100 sangat tinggi) untuk memastikan interpretasi bersifat standar dan konsisten lintas-risiko, sementara matriks probabilitas–dampak digunakan untuk menegaskan risiko dominan yang berada pada zona probabilitas tinggi dan dampak tinggi terhadap waktu maupun biaya secara simultan. Keunikan evaluasi penelitian ini terletak pada penggunaan dua lapis mekanisme prioritas, yaitu *screening* relevansi risiko berbasis Guttman untuk menekan *noise* variabel yang tidak kontekstual, diikuti pengukuran dominansi berbasis SI dan pemetaan keputusan berbasis matriks, sehingga hasil akhir tidak hanya berupa daftar risiko, melainkan sebuah peta risiko dominan yang secara langsung dapat diterjemahkan menjadi prioritas mitigasi yang operasional bagi owner dan kontraktor.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Identifikasi Risiko dan Profil Probabilitas Kejadian pada Tahap Pelaksanaan Proyek

Temuan awal penelitian menegaskan bahwa tahap identifikasi risiko bukan sekadar inventarisasi variabel, melainkan proses validasi empiris yang menentukan apakah suatu risiko benar-benar dipersepsikan sebagai ancaman nyata oleh aktor proyek yang memiliki kewenangan dan pengalaman dalam pengambilan keputusan. Dalam kerangka manajemen risiko konstruksi, validasi berbasis persepsi responden dipandang relevan karena risiko proyek jalan tol bersifat *dynamic* dan dipengaruhi ketidakpastian eksternal maupun internal, sehingga pengetahuan praktis para pengelola proyek menjadi sumber informasi penting untuk membangun *risk register* yang operasional (Thompson & Perry, 1991; Soemarno, 2008). Penggunaan survei pendahuluan skala Guttman dengan ambang relevansi $\geq 50\%$ memperkuat posisi metodologis penelitian ini karena memungkinkan penyaringan risiko secara sistematis berdasarkan konsensus minimal, bukan preferensi individu atau intuisi peneliti, selaras dengan prinsip statistik terapan yang menuntut kejelasan bahwa data yang diproses merupakan data yang lolos uji kelayakan (Akdon & Riduwan, 2010). Hasil yang menunjukkan 54 variabel risiko dinyatakan relevan sekaligus mengindikasikan bahwa proyek Jalan Tol Prabumulih–Muara Enim Zona 5 berada pada kondisi kompleksitas tinggi, di mana ketidakpastian tidak terkonsentrasi pada pekerjaan fisik semata, melainkan menyebar pada aspek kontraktual, finansial, dan tata kelola pelaksanaan, sebagaimana karakteristik risiko pada proyek infrastruktur besar yang ditandai oleh interaksi multiaktor, dependensi rantai pasok, serta tekanan target layanan publik (Santosa, 2009; Williams et al., 1998). Kompleksitas ini juga sejalan dengan konteks pembangunan jalan tol nasional yang dalam laporan BPJT menunjukkan proyek tol tidak hanya berfungsi sebagai objek konstruksi, tetapi sebagai infrastruktur strategis yang terikat oleh kepentingan pembiayaan, regulasi, serta akuntabilitas

pelayanan, sehingga spektrum risiko cenderung melebar (Badan Pengatur Jalan Tol, 2021). Pola dominasi risiko pada aspek kontraktual dan finansial yang terlihat pada hasil identifikasi menjadi sinyal bahwa gangguan terhadap kinerja proyek lebih mungkin muncul dari masalah tata kelola kontrak, keterlambatan arus kas, serta dinamika persetujuan pekerjaan, dibandingkan sekadar kegagalan teknis lapangan, dan pola ini konsisten dengan literatur yang menempatkan risiko administratif dan finansial sebagai pemicu utama deviasi kinerja pada proyek jalan tol (Putra & Hidayat, 2024; Prasetyo et al., 2023).

Validasi risiko pada penelitian ini memperlihatkan bahwa risiko-risiko yang memperoleh tingkat relevansi sangat tinggi cenderung berkaitan dengan faktor yang bersifat lintas-tahap dan lintas-aktor, seperti pembebasan lahan, kejelasan klausul kontrak, serta keterlambatan pembayaran, yang secara teoritis merupakan risiko sistemik karena dapat memicu efek berantai pada pekerjaan lain. Risiko pembebasan lahan misalnya tidak hanya menghambat mobilisasi pekerjaan, tetapi juga mengubah urutan kerja, menimbulkan kebutuhan *re-sequencing*, serta meningkatkan beban biaya tidak langsung akibat idle resources, sehingga secara konseptual masuk dalam kategori risiko yang memiliki *propagation effect* tinggi (Darmawi, 2008; Soemarno, 2008). Keberadaan risiko “ketidakjelasan pasal kontrak” yang dinyatakan relevan 100% mengindikasikan bahwa kontrak dalam praktik proyek tidak selalu berfungsi sebagai instrumen stabilisasi, melainkan dapat menjadi sumber ambiguitas yang memicu perselisihan klaim, perubahan pekerjaan, dan keterlambatan administrasi, suatu kondisi yang sering muncul pada proyek dengan banyak *interface* pekerjaan (Thompson & Perry, 1991). Dari perspektif manajemen proyek, risiko-risiko yang berada pada domain kontraktual dan finansial memiliki kecenderungan lebih sulit dimitigasi dibanding risiko teknis karena memerlukan negosiasi, keputusan lintas institusi, serta waktu penyelesaian yang tidak sepenuhnya berada dalam kontrol kontraktor (Santosa, 2009). Pada saat yang sama, hasil identifikasi yang mencakup risiko pandemi COVID-19 sebagai risiko relevan 100% menunjukkan bahwa proyek juga menghadapi risiko eksternal berskala makro yang tidak dapat dieliminasi melalui kontrol internal, tetapi dapat dikelola melalui strategi adaptasi operasi, protokol kesehatan, dan pengendalian rantai pasok (Effendi & Siregar, 2024). Temuan ini memperlihatkan bahwa profil risiko proyek jalan tol di Sumatera Selatan tidak hanya merepresentasikan risiko klasik konstruksi, melainkan juga risiko kontemporer yang berkaitan dengan ketahanan sistem proyek terhadap gangguan global. Dalam konteks tersebut, identifikasi risiko yang luas menjadi prasyarat untuk melakukan pemetaan risiko yang benar-benar mencerminkan realitas lapangan, bukan model ideal yang terputus dari praktik.

Secara kuantitatif, analisis probabilitas menggunakan Severity Index (SI) menghasilkan temuan bahwa risiko keterlambatan pembebasan lahan (B2) memiliki nilai SI probabilitas tertinggi sebesar 89,58% dan masuk kategori “sangat sering”, sementara risiko lain seperti perubahan desain akibat kondisi lapangan (C3), kenaikan harga material (F2), pandemi COVID-19 (G7), keterlambatan pembayaran vendor (D9), serta kurangnya dana finansial dari owner (D8) berada pada kategori “sering”. Pola ini memperlihatkan bahwa risiko yang paling sering terjadi merupakan risiko yang bersifat struktural dan berulang, bukan kejadian insidental, sehingga menuntut pendekatan mitigasi yang bersifat sistemik dan berbasis kebijakan proyek, bukan hanya respons operasional harian (Darmawi, 2008). Dominasi pembebasan lahan sebagai risiko paling sering memperkuat argumentasi bahwa isu lahan merupakan bottleneck kronis dalam pembangunan jalan tol di Indonesia, terutama pada proyek yang melewati wilayah dengan fragmentasi kepemilikan tanah dan proses administratif panjang, sehingga probabilitasnya cenderung tinggi pada berbagai konteks proyek (Putra & Hidayat, 2024). Hasil ini juga menunjukkan bahwa pendekatan SI efektif menangkap intensitas kejadian risiko berdasarkan agregasi persepsi responden, sehingga dapat digunakan sebagai alat prioritisasi pada kondisi data historis proyek yang terbatas, sebagaimana juga ditunjukkan pada studi jalan tol yang menggunakan SI untuk memetakan risiko dominan berbasis persepsi (Marselina et al., 2022). Pada level teoretis, hasil probabilitas yang tinggi pada risiko finansial seperti D8 dan D9 mengindikasikan bahwa ketahanan proyek sangat dipengaruhi oleh stabilitas arus kas, dan ketika arus kas terganggu, risiko lain cenderung ikut meningkat melalui penurunan produktivitas, keterlambatan pengadaan, dan potensi *work stoppage* (Williams et al., 1998). Temuan ini juga relevan dengan studi tentang proyek infrastruktur di daerah dengan tantangan logistik dan akses yang menunjukkan bahwa faktor finansial dan koordinasi sering menjadi sumber probabilitas risiko tinggi, meskipun konteksnya berbeda, karena keduanya merupakan faktor yang mempengaruhi kemampuan proyek mempertahankan ritme pelaksanaan (Iman & Rusgiyanto, 2025).

Kecenderungan probabilitas tinggi pada risiko perubahan desain akibat kondisi lapangan (C3) menunjukkan adanya gap antara perencanaan teknis awal dan kondisi aktual di lapangan, yang dalam praktik proyek jalan tol sering dipicu oleh keterbatasan investigasi geoteknik, perubahan kebutuhan pemangku kepentingan, atau penyesuaian desain terhadap kendala lahan. Secara konseptual, perubahan desain merupakan risiko yang memiliki karakter ganda, yakni dapat muncul sebagai risiko teknis tetapi efeknya sering bersifat kontraktual dan finansial karena memicu variasi pekerjaan, klaim, serta revisi jadwal, sehingga probabilitasnya tidak dapat dipahami hanya dari sisi engineering (Thompson & Perry, 1991). Temuan probabilitas C3 yang mencapai 73,96% menandakan bahwa perubahan desain bukan anomali, melainkan fenomena berulang yang mengindikasikan ketidakstabilan baseline proyek, suatu kondisi yang pada literatur manajemen proyek dipandang sebagai sumber utama deviasi kinerja (Santosa, 2009). Di sisi lain, risiko kenaikan harga material (F2) yang memiliki SI 78,13% mengindikasikan bahwa volatilitas harga material menjadi faktor yang sering muncul, terutama pada proyek berskala besar dengan ketergantungan rantai pasok lintas wilayah, sehingga strategi pengadaan dan kontrak material menjadi komponen penting dalam manajemen risiko biaya (Williams et al., 1998). Probabilitas pandemi COVID-19 yang juga tinggi mengonfirmasi bahwa risiko eksternal tidak dapat diperlakukan sebagai kejadian “sekali terjadi”, melainkan sebagai kondisi yang dapat mempengaruhi proyek dalam durasi panjang melalui gangguan tenaga kerja, pembatasan mobilitas, dan perubahan prosedur kerja, sebagaimana dipetakan dalam kajian tren K3 respons darurat di jalan tol (Effendi & Siregar, 2024). Dalam kerangka ini, penelitian menunjukkan bahwa probabilitas risiko di proyek tol tidak hanya ditentukan oleh faktor internal proyek, tetapi juga oleh faktor makro yang membentuk ekosistem konstruksi. Hal tersebut menguatkan relevansi penelitian empiris berbasis persepsi karena mampu menangkap pengalaman aktual responden dalam menghadapi risiko yang bersifat multi-level.

Kualitas hasil probabilitas juga dipengaruhi oleh desain sampling yang memilih responden dengan pengalaman minimal lima tahun dan keterlibatan langsung dalam keputusan teknis maupun manajerial, sehingga penilaian probabilitas yang diperoleh merepresentasikan *expert judgement* yang relatif stabil. Dalam praktik manajemen risiko, *expert judgement* merupakan pendekatan yang diterima luas ketika data historis tidak lengkap, selama prosesnya transparan, terstruktur, dan menggunakan skala pengukuran yang konsisten (Soemarno, 2008). Pemilihan Severity Index sebagai teknik agregasi penilaian juga menunjukkan keunikan metodologis karena SI tidak hanya menghasilkan skor, tetapi memungkinkan pembobotan frekuensi respons secara proporsional, sehingga mengurangi distorsi yang dapat muncul jika hanya menggunakan rata-rata sederhana (Akdon & Riduwan, 2010). Kelebihan lain dari SI dalam konteks penelitian ini ialah kemampuannya menghasilkan kategori probabilitas yang dapat langsung dipakai untuk pemetaan matriks probabilitas–dampak, sehingga alur analisis menjadi konsisten dan tidak memerlukan transformasi data yang kompleks. Keselarasan ini penting karena penelitian bertujuan menghasilkan output yang dapat dipakai oleh praktisi, sehingga model analisis harus tetap kuat secara akademik tetapi juga mudah diterjemahkan ke kebijakan proyek (Darmawi, 2008). Pada saat yang sama, hasil probabilitas yang tinggi pada beberapa risiko kunci mengindikasikan bahwa proyek membutuhkan pendekatan mitigasi yang lebih proaktif, terutama pada risiko yang bersifat sistemik dan berpotensi menjadi *root cause* keterlambatan. Temuan ini membuka ruang argumentasi bahwa manajemen risiko pada proyek tol perlu dimulai sejak pra-konstruksi, bukan hanya pada fase pelaksanaan, karena beberapa risiko paling sering justru berkaitan dengan kesiapan lahan dan kepastian kontrak.

Dalam perspektif komparatif, pola risiko yang ditemukan pada penelitian ini memperlihatkan konsistensi dengan studi jalan tol lain yang menempatkan pembebasan lahan sebagai risiko dominan, namun penelitian ini memberikan nilai tambah karena memposisikan risiko tersebut sebagai risiko paling sering secara kuantitatif, bukan sekadar risiko penting secara naratif. Studi Marselina et al. (2022) yang menggunakan Severity Index pada proyek Tol Solo–Yogyakarta menunjukkan bahwa metode SI efektif untuk memetakan risiko dominan berbasis persepsi, tetapi penelitian ini memperluas penerapan dengan mengintegrasikan hasil probabilitas tersebut untuk analisis simultan terhadap waktu dan biaya pada tahap berikutnya. Penelitian Putra dan Hidayat (2024) juga mengidentifikasi risiko pada proyek jalan tol, namun temuan penelitian ini menegaskan bahwa risiko finansial seperti kurangnya dana dari owner dan keterlambatan pembayaran vendor memiliki probabilitas tinggi yang berpotensi memicu efek domino terhadap produktivitas, sehingga isu finansial tidak dapat diposisikan sebagai risiko sekunder. Literatur *review* tentang manajemen risiko proyek juga menunjukkan bahwa banyak penelitian masih berhenti pada tahap identifikasi atau klasifikasi risiko, sedangkan pengukuran

probabilitas yang terstandardisasi dan terhubung ke pemetaan dominansi masih relatif terbatas, sehingga hasil penelitian ini memperkaya pendekatan kuantitatif pada studi risiko konstruksi (Prasetyo et al., 2023). Temuan probabilitas yang tinggi pada risiko K3LMP secara konseptual juga relevan untuk dibaca berdampingan dengan literatur K3 yang menggunakan HIRARC, HIRADC, atau kombinasi metode lain, karena menunjukkan bahwa risiko proyek jalan tol tidak dapat dilepaskan dari konteks keselamatan dan kesehatan kerja, terutama pada masa pandemi (Akbar & Jufriyanto, 2025; Sunarko & Prasetyo, 2025). Meski fokus penelitian ini bukan risiko K3 secara spesifik, keberadaan pandemi sebagai risiko dominan memperlihatkan bahwa dimensi keselamatan dan kesehatan tetap menjadi determinan kinerja proyek. Studi tentang K3 pada peningkatan ruas jalan dan proyek jembatan juga menunjukkan bahwa kegagalan pengelolaan risiko K3 dapat memicu keterlambatan, gangguan operasional, dan biaya tambahan, sehingga temuan penelitian ini memperkuat argumen bahwa risiko non-teknis sering berinteraksi dengan risiko teknis (Soeparyanto & Nuhun, 2025; Nugroho & Purwanto, 2024).

Secara teoritis, hasil identifikasi dan probabilitas risiko dapat dipahami melalui konsep risiko sebagai kombinasi ketidakpastian dan konsekuensi yang mempengaruhi pencapaian tujuan proyek, di mana tujuan utama proyek jalan tol adalah ketepatan waktu, ketepatan biaya, dan keberlangsungan operasi konstruksi. Dalam konsep manajemen risiko klasik, risiko dengan probabilitas tinggi memiliki prioritas tinggi untuk pengendalian karena meskipun dampaknya sedang, frekuensi kejadian dapat mengakumulasi konsekuensi menjadi signifikan (Williams et al., 1998). Temuan penelitian ini memperlihatkan bahwa risiko-risiko berprobabilitas tinggi cenderung bersifat *organizational* dan *governance-related*, yang dalam konteks proyek tol berhubungan dengan koordinasi antara owner, kontraktor, konsultan, vendor, dan institusi pengadaan lahan. Pola tersebut memperkuat tesis bahwa manajemen risiko proyek infrastruktur tidak cukup dikelola dengan pendekatan engineering, melainkan memerlukan pendekatan manajerial yang memadukan kontrak, keuangan, dan pengendalian perubahan (Santosa, 2009). Keunikan penelitian ini juga terlihat pada proses validasi dua tahap yang meminimalkan risiko memasukkan variabel yang tidak relevan, sehingga probabilitas yang dihitung benar-benar merepresentasikan risiko yang hidup dalam realitas proyek, bukan daftar risiko generik. Dalam konteks tersebut, hasil identifikasi dan probabilitas menjadi dasar ilmiah yang kuat untuk tahap analisis dampak dan pemetaan risiko dominan. Struktur temuan ini menegaskan bahwa pendekatan kuantitatif berbasis SI dapat menjadi alternatif praktis yang tetap robust ketika penelitian dilakukan pada proyek nyata dengan keterbatasan data historis.

Pada tataran implikasi praktis, temuan probabilitas risiko memberikan informasi awal tentang area intervensi manajerial yang paling mendesak, terutama pada risiko yang probabilitasnya tinggi dan berkaitan langsung dengan stabilitas pelaksanaan. Risiko pembebasan lahan yang sangat sering menuntut strategi mitigasi yang tidak hanya reaktif, melainkan proaktif melalui koordinasi pra-konstruksi, percepatan legal-administratif, serta penyusunan rencana kerja yang adaptif terhadap ketersediaan lahan. Risiko finansial seperti kurangnya dana owner dan keterlambatan pembayaran vendor menuntut strategi pengendalian arus kas, perencanaan pembayaran yang realistis, serta mekanisme kontraktual yang mencegah *payment delay* menjadi gangguan sistemik. Risiko perubahan desain akibat kondisi lapangan menuntut penguatan proses review RTA dan kontrol perubahan, sehingga variasi pekerjaan tidak menjadi sumber pembengkakan waktu dan biaya. Risiko pandemi COVID-19 menuntut kesiapan protokol operasional, pengaturan tenaga kerja, dan adaptasi metode kerja, sebagaimana literatur K3 jalan tol menekankan pentingnya kesiapsiagaan respons darurat dalam operasi konstruksi (Effendi & Siregar, 2024). Temuan ini memperlihatkan bahwa manajemen risiko proyek tol perlu dipahami sebagai sistem pengendalian yang menghubungkan ketidakpastian eksternal dan internal ke strategi mitigasi yang berbasis prioritas. Kerangka ini menegaskan bahwa hasil probabilitas bukan sekadar output statistik, tetapi peta awal yang memandu logika mitigasi pada tahap berikutnya.

Berikut disajikan ringkasan hasil identifikasi risiko dan nilai Severity Index probabilitas risiko yang menjadi dasar untuk analisis dampak pada waktu dan biaya pada sub-bagian berikutnya, sehingga hubungan antara temuan kuantitatif dan interpretasi manajerial tetap terjaga.

Tabel 1. Hasil Identifikasi Risiko Proyek Jalan Tol Prabumulih–Muara Enim Zona 5

Kode	Variabel Risiko	Relevansi (%)	Keterangan
------	-----------------	---------------	------------

A1	Bencana alam	100,00	Relevan
A2	Epidemi	75,00	Relevan
A3	Kebakaran	75,00	Relevan
A4	Kerusuhan, perang, dan huru-hara	75,00	Relevan
B2	Keterlambatan pembebasan lahan	100,00	Relevan
B5	Ketidakjelasan pasal kontrak	100,00	Relevan
C3	Perubahan desain akibat kondisi lapangan	83,33	Relevan
D7	Keterlambatan pembayaran dari owner	91,67	Relevan
D8	Kurangnya dana finansial dari owner	83,33	Relevan
D9	Keterlambatan pembayaran pada vendor	91,67	Relevan
E1	Pekerjaan tidak sesuai desain	100,00	Relevan
F2	Kenaikan harga material	100,00	Relevan
G7	Pandemi COVID-19	100,00	Relevan

Sumber: Hasil Penelitian (2021).

Tabel 2. Nilai Severity Index (SI) Probabilitas Risiko

Kode	Variabel Risiko	SI Probabilitas (%)	Kategori
B2	Keterlambatan pembebasan lahan	89,58	Sangat Sering
C3	Perubahan desain akibat kondisi lapangan	73,96	Sering
D9	Keterlambatan pembayaran vendor	67,71	Sering
D8	Kurangnya dana finansial dari owner	65,63	Sering
F2	Kenaikan harga material	78,13	Sering
G7	Pandemi COVID-19	73,96	Sering

Sumber: Hasil Penelitian (2021).

Temuan pada Tabel 1 dan Tabel 2 memperlihatkan bahwa risiko yang dinilai paling sering terjadi tidak hanya berkaitan dengan gangguan eksternal seperti pandemi dan volatilitas material, tetapi juga terkait langsung dengan tata kelola proyek seperti kesiapan lahan dan stabilitas pendanaan, sehingga pengendalian risiko tidak dapat dibatasi pada strategi teknis lapangan. Dalam literatur, risiko yang berakar pada aspek governance sering memerlukan mitigasi berbasis sistem, misalnya melalui penyesuaian mekanisme kontrak, struktur pembayaran, serta penguatan koordinasi lintas institusi, karena risiko semacam ini memiliki kapasitas untuk memicu keterlambatan yang bersifat multiplikatif (Thompson & Perry, 1991; Darmawi, 2008). Hal yang paling kritis dari hasil probabilitas ialah fakta bahwa pembebasan lahan tidak hanya relevan, tetapi memiliki intensitas kejadian yang sangat tinggi, sehingga layak diposisikan sebagai risiko pengendali (*controlling risk*) yang dapat menentukan

stabilitas proyek secara keseluruhan. Temuan ini juga memberi sinyal bahwa upaya mitigasi yang hanya difokuskan pada aspek K3 atau aspek teknis pekerjaan tanpa memperbaiki aspek kontraktual-finansial akan menghasilkan efektivitas terbatas, karena risiko dominan justru muncul dari sisi tata kelola proyek. Pada titik ini, analisis dampak risiko terhadap waktu dan biaya menjadi tahap berikutnya yang diperlukan untuk membuktikan apakah risiko yang sering terjadi juga merupakan risiko yang paling merusak kinerja proyek. Kerangka berpikir tersebut menjaga konsistensi antara hasil empiris, pendekatan SI, dan kebutuhan praktis proyek jalan tol yang berorientasi pada ketepatan jadwal dan efisiensi biaya.

Dampak Risiko terhadap Kinerja Waktu dan Biaya Proyek Jalan Tol

Analisis dampak risiko pada penelitian ini difokuskan pada dua sasaran kinerja utama proyek, yaitu waktu pelaksanaan dan biaya pelaksanaan, karena kedua indikator tersebut merupakan dimensi paling sensitif dalam proyek jalan tol berskala besar yang memiliki tekanan target layanan publik dan batasan pembiayaan yang ketat (Badan Pengatur Jalan Tol, 2021). Secara konseptual, pengukuran dampak dipahami sebagai estimasi konsekuensi apabila suatu risiko terjadi, sehingga dampak tidak hanya merepresentasikan “besar-kecilnya gangguan”, tetapi juga menunjukkan potensi perubahan jalur kritis (*critical path*) dan perubahan struktur biaya langsung maupun tidak langsung (Santosa, 2009). Dalam kerangka manajemen risiko, hubungan antara probabilitas dan dampak menghasilkan tingkat risiko, sehingga analisis dampak menjadi elemen yang menentukan apakah risiko yang sering terjadi juga berkonsekuensi serius terhadap target proyek (Darmawi, 2008). Penggunaan Severity Index (SI) untuk mengukur dampak waktu dan biaya memperkuat karakter empiris penelitian ini karena penilaian tidak dibangun dari asumsi teoritis semata, melainkan berasal dari persepsi aktor proyek yang terlibat langsung dalam pengendalian jadwal dan anggaran pada kondisi lapangan aktual (Akdon & Riduwan, 2010). Temuan pada sub-bagian ini juga relevan dengan literatur risiko proyek jalan tol yang menekankan bahwa keterlambatan dan pembengkakan biaya sering dipicu oleh risiko sistemik seperti lahan, perubahan desain, dan ketidakstabilan pendanaan, yang sifatnya lintas-aktor dan lintas-tahap (Putra & Hidayat, 2024; Zayed et al., 2008).

Pada dimensi waktu, hasil penelitian menunjukkan bahwa risiko yang memiliki dampak terbesar bukan semata risiko teknis pekerjaan, melainkan risiko yang mengganggu akses kerja, urutan pekerjaan, serta kesinambungan arus kas yang memengaruhi produktivitas dan mobilisasi sumber daya. Pola ini selaras dengan teori risiko konstruksi yang menempatkan keterlambatan sebagai konsekuensi dari gangguan terhadap *resource availability* dan *workflow continuity*, bukan hanya akibat kesalahan metode kerja (Thompson & Perry, 1991). Keterlambatan pembebasan lahan (B2) memperoleh SI dampak waktu tertinggi sebesar 71,88%, menunjukkan bahwa hambatan lahan bukan hanya sering terjadi, tetapi juga memiliki kapasitas tinggi untuk memotong jalur kritis proyek melalui tertundanya pekerjaan utama dan *re-sequencing* yang memaksa kontraktor mengubah strategi pelaksanaan (Soemarno, 2008). Perubahan desain akibat kondisi lapangan (C3) juga memiliki dampak waktu besar (69,79%), yang mengindikasikan adanya tekanan perubahan *baseline* teknis yang memicu proses persetujuan ulang, revisi RTA, dan keterlambatan eksekusi, sehingga durasi proyek meningkat meskipun sumber daya fisik tersedia (Santosa, 2009). Dampak besar risiko keterlambatan pembayaran dari owner (D7) dan kurangnya dana finansial dari owner (D8) memperlihatkan bahwa stabilitas finansial berperan sebagai pengendali produktivitas, karena keterbatasan kas menyebabkan keterlambatan pengadaan, keterbatasan pembayaran tenaga kerja, serta penurunan kemampuan mempertahankan ritme kerja (Williams et al., 1998). Secara akademik, temuan ini menguatkan argumen bahwa risiko finansial tidak dapat dipisahkan dari risiko waktu, karena keterlambatan pembayaran berfungsi sebagai pemicu laten yang memperbesar konsekuensi risiko lain, terutama ketika proyek berjalan pada jadwal padat dan memerlukan suplai material kontinu (Prasetyo et al., 2023).

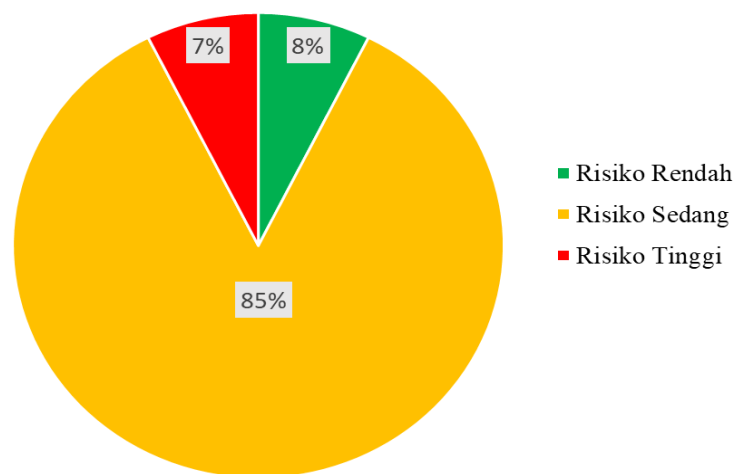
Tabel 3. Dampak Risiko terhadap Waktu Proyek

Kode	Variabel Risiko	SI Dampak Waktu (%)
B2	Keterlambatan pembebasan lahan	71,88
C3	Perubahan desain akibat kondisi lapangan	69,79

D7	Keterlambatan pembayaran dari owner	65,63
D8	Kurangnya dana finansial dari owner	67,71
G7	Pandemi COVID-19	57,29

Sumber: Hasil Penelitian (2021).

Data pada Tabel 3 memperlihatkan bahwa empat risiko utama masuk kategori dampak besar terhadap waktu, sedangkan pandemi COVID-19 (G7) berada pada kategori dampak cukup, yang menunjukkan bahwa gangguan pandemi lebih sering mempengaruhi efisiensi kerja dibanding memblokir jalur kritis secara langsung. Klasifikasi ini penting karena dalam manajemen proyek, risiko dengan dampak besar terhadap waktu memiliki implikasi langsung pada klaim EOT, perubahan kurva-S, serta potensi penalti apabila tidak dikelola melalui mekanisme kontraktual yang memadai (Thompson & Perry, 1991). Pola dominasi risiko lahan dan desain menunjukkan bahwa proyek jalan tol memiliki ketergantungan tinggi pada kesiapan *front kerja*, sehingga gangguan pada akses lahan dan perubahan desain akan memicu efek berantai pada pekerjaan tanah, struktur, dan pengadaan material yang telah dijadwalkan secara berurutan (Putra & Hidayat, 2024). Temuan ini konsisten dengan kajian risiko proyek di daerah 3T yang menekankan bahwa gangguan akses dan ketidakpastian lapangan cenderung menghasilkan keterlambatan yang tidak dapat dipulihkan hanya dengan penambahan sumber daya, karena kendalanya bersifat struktural (Iman & Rusgiyanto, 2025). Dalam perspektif metodologis, SI yang tinggi pada D7 dan D8 juga menegaskan bahwa responden menilai risiko finansial sebagai risiko yang langsung memukul kemampuan proyek menjaga produktivitas harian, bukan sekadar risiko administratif yang efeknya tertunda. Keterkaitan ini sejalan dengan studi tentang faktor dominan *cost overrun* pada proyek jalan tol KPBU yang menempatkan aspek pendanaan dan arus kas sebagai faktor yang berinteraksi kuat dengan deviasi jadwal (Raditya et al., 2026).



Gambar 1. Presentase Tingkat Risiko Terhadap Waktu

Sumber: Hasil Penelitian, 2021

Distribusi tingkat risiko terhadap waktu pada Gambar 1 mengindikasikan bahwa proporsi risiko kategori besar lebih dominan dibanding kategori cukup, sehingga profil keterlambatan proyek cenderung ditentukan oleh risiko yang bersifat *high-impact* daripada akumulasi gangguan kecil. Secara teoritis, kondisi ini menunjukkan bahwa manajemen risiko proyek perlu berorientasi pada pengendalian risiko pengungkit (*leverage risks*), yaitu risiko yang ketika terjadi akan mengubah struktur jadwal dan jalur kritis, bukan hanya memperlambat pekerjaan secara marginal (Darmawi, 2008). Risiko lahan dan desain berfungsi sebagai *schedule drivers* karena keduanya mempengaruhi kesiapan lokasi kerja, ketersediaan desain final, dan kecepatan persetujuan, sehingga konsekuensinya lebih sulit dipulihkan melalui strategi *crashing* atau *fast-tracking* (Santosa, 2009). Pada sisi lain, risiko pandemi COVID-19 meskipun berdampak cukup, tetap relevan karena dapat meningkatkan *cycle time* aktivitas, menurunkan produktivitas tenaga kerja, dan memicu pembatasan mobilitas yang mengganggu pengiriman material,

sebagaimana dipetakan pada kajian tren respons darurat K3 pada jalan tol (Effendi & Siregar, 2024). Temuan ini juga memperlihatkan bahwa risiko K3LMP tidak hanya memunculkan konsekuensi keselamatan, tetapi juga konsekuensi waktu, karena prosedur pengendalian keselamatan dapat mengubah pola kerja, durasi inspeksi, dan pembatasan aktivitas pada area tertentu (Nugroho & Purwanto, 2024). Dengan demikian, interpretasi terhadap Gambar 1 menegaskan bahwa pengendalian keterlambatan pada proyek jalan tol memerlukan strategi yang simultan antara penyelesaian kendala struktural (lahan dan desain) dan peningkatan ketahanan operasional (protokol kesehatan dan keselamatan).

Pada dimensi biaya, hasil penelitian menunjukkan bahwa profil dampak risiko bersifat paralel dengan profil dampak waktu, namun memiliki intensitas yang lebih tinggi pada risiko tertentu, terutama risiko pembebasan lahan yang mencapai SI dampak biaya 78,13% dalam kategori besar. Secara manajerial, keterlambatan lahan menimbulkan biaya tidak langsung yang meningkat karena perpanjangan durasi sewa alat, biaya overhead lapangan, biaya pengamanan, serta biaya tenaga kerja yang tidak produktif, sehingga biaya membengkak bahkan ketika volume pekerjaan fisik tidak berubah (Williams et al., 1998). Perubahan desain akibat kondisi lapangan (C3) juga berdampak besar terhadap biaya (67,71%) karena perubahan desain biasanya memicu variasi pekerjaan, penyesuaian spesifikasi, serta kebutuhan material tambahan yang menuntut perubahan rencana pengadaan dan potensi eskalasi harga (Soemarno, 2008). Risiko keterlambatan pembayaran vendor (D9) yang memiliki dampak biaya besar (69,79%) memperlihatkan bahwa masalah pembayaran bukan hanya memengaruhi jadwal, tetapi juga memicu kenaikan biaya melalui denda keterlambatan, biaya logistik tambahan, serta meningkatnya harga akibat ketidakpastian transaksi, yang sering terjadi pada proyek dengan rantai pasok panjang (Prasetyo et al., 2023). Kurangnya dana finansial dari owner (D8) yang berdampak besar terhadap biaya (65,63%) mengindikasikan bahwa ketidakstabilan pendanaan meningkatkan biaya pembiayaan internal kontraktor, seperti kebutuhan pinjaman jangka pendek atau *bridging finance*, yang pada akhirnya memperbesar *project cost* (Raditya et al., 2026). Temuan ini menguatkan literatur bahwa *cost overrun* pada proyek jalan tol sering berasal dari kombinasi keterlambatan dan instabilitas pendanaan, sehingga biaya membengkak melalui mekanisme tidak langsung, bukan semata dari pembelian material tambahan (Zayed et al., 2008).

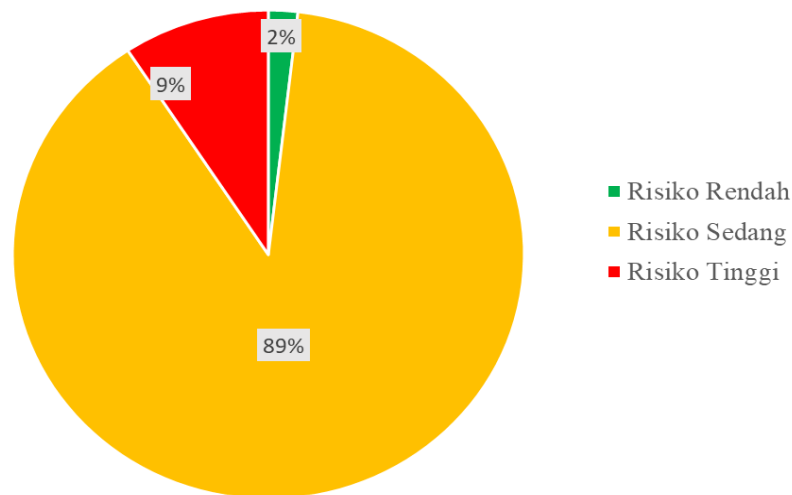
Tabel 4. Dampak Risiko terhadap Biaya Proyek

Kode	Variabel Risiko	SI Dampak Biaya (%)
B2	Keterlambatan pembebasan lahan	78,13
C3	Perubahan desain akibat kondisi lapangan	67,71
D8	Kurangnya dana finansial dari owner	65,63
D9	Keterlambatan pembayaran vendor	69,79
G7	Pandemi COVID-19	57,29

Sumber: Hasil Penelitian (2021).

Berdasarkan Tabel 4, terlihat bahwa empat risiko masuk kategori dampak besar terhadap biaya, sementara pandemi COVID-19 kembali berada pada kategori dampak cukup, yang mengindikasikan bahwa pandemi lebih dominan menambah biaya melalui protokol kesehatan dan gangguan rantai pasok, tetapi tidak selalu menghasilkan lonjakan biaya sebesar risiko lahan atau desain. Dalam literatur keselamatan kerja, pandemi dapat diposisikan sebagai risiko K3LMP yang menuntut penguatan prosedur pengendalian bahaya, dan biaya yang timbul sering berupa biaya pencegahan, bukan biaya kegagalan struktural, sehingga dampaknya cenderung moderat dibanding risiko yang memicu perpanjangan durasi (Effendi & Siregar, 2024). Namun demikian, kategori dampak cukup tetap signifikan karena biaya pencegahan dapat bersifat kontinu selama proyek berlangsung, terutama jika proyek berjalan dalam periode pembatasan sosial dan perubahan regulasi kesehatan kerja. Secara akademik, hasil ini memperkuat argumentasi bahwa risiko K3 pada proyek infrastruktur tidak hanya

perlu dilihat sebagai risiko keselamatan, tetapi juga sebagai risiko ekonomi karena biaya mitigasi keselamatan dapat menjadi komponen biaya proyek yang nyata (Sunarko & Prasetyo, 2025). Keterkaitan antara risiko biaya dan keselamatan juga didukung oleh penelitian risiko K3 pada proyek jembatan berbasis ISO 31000 yang menekankan bahwa ketidakpatuhan terhadap pengendalian keselamatan dapat memicu kerugian finansial akibat penghentian kerja, insiden, dan klaim, sehingga risiko keselamatan dapat menjadi sumber *cost overrun* (Nugroho & Purwanto, 2024). Dengan demikian, profil biaya pada Tabel 4 menunjukkan bahwa proyek jalan tol membutuhkan mitigasi yang menargetkan akar penyebab struktural (lahan, desain, pendanaan) dan sekaligus memperkuat ketahanan keselamatan untuk menekan biaya pencegahan dan biaya gangguan.



Gambar 2. Presentase Tingkat Risiko Terhadap Biaya

Sumber: Hasil Penelitian, 2021

Distribusi tingkat risiko terhadap biaya pada Gambar 2 memperlihatkan dominasi risiko kategori besar yang menandakan bahwa pembengkakan biaya pada proyek lebih mungkin dipicu oleh kejadian risiko utama dibanding akumulasi deviasi kecil, sehingga strategi pengendalian biaya harus diarahkan pada risiko dominan, bukan sekadar efisiensi operasional rutin. Dalam teori manajemen risiko, kondisi ini merepresentasikan prinsip Pareto pada proyek konstruksi, di mana sejumlah kecil risiko memberikan kontribusi besar terhadap variasi kinerja, sehingga pengendalian yang efektif harus memprioritaskan risiko dengan konsekuensi terbesar (Darmawi, 2008). Risiko lahan menjadi determinan utama karena memperpanjang durasi, sedangkan durasi berfungsi sebagai pengganda biaya tidak langsung, sehingga dampak biaya cenderung lebih besar dibanding dampak waktu dalam bentuk persentase SI, sebagaimana terlihat pada perbandingan B2 yang lebih tinggi pada biaya dibanding waktu. Temuan ini konsisten dengan kajian *cost overrun* proyek jalan tol yang menekankan bahwa perpanjangan durasi merupakan mekanisme utama pembengkakan biaya karena memicu biaya overhead dan pembiayaan tambahan, terutama pada proyek dengan struktur pendanaan kompleks (Raditya et al., 2026). Pada sisi lain, dampak biaya dari perubahan desain dan pembayaran vendor memperlihatkan bahwa biaya proyek tidak hanya ditentukan oleh volume pekerjaan, tetapi juga oleh stabilitas rantai pasok, ketepatan transaksi, dan efisiensi proses persetujuan teknis, yang merupakan domain manajerial dan kontraktual (Thompson & Perry, 1991). Dengan demikian, Gambar 2 memperkuat interpretasi bahwa pengendalian biaya pada proyek jalan tol memerlukan pendekatan terintegrasi antara manajemen kontrak, manajemen pendanaan, dan pengendalian perubahan desain, bukan sekadar pengendalian harga material.

Implikasi penting dari analisis dampak waktu dan biaya adalah bahwa risiko yang memiliki dampak besar pada kedua dimensi cenderung merupakan risiko yang bersifat sistemik dan lintas fungsi, sehingga mitigasinya memerlukan koordinasi lintas aktor dan penguatan mekanisme tata kelola proyek. Risiko lahan, desain, dan pendanaan memiliki karakter *interdependent*, karena keterlambatan lahan memicu perubahan desain lapangan, perubahan desain memperbesar kebutuhan pendanaan, dan ketidakstabilan pendanaan memperburuk keterlambatan, sehingga ketiganya membentuk *risk cluster* yang saling memperkuat (Soemarno, 2008). Pola ini selaras dengan literatur yang menyatakan bahwa

risiko proyek konstruksi jarang berdiri sendiri, melainkan membentuk jaringan sebab-akibat yang dapat dianalisis dengan pendekatan seperti FMEA, fishbone, atau fault tree, meskipun penelitian ini menggunakan SI sebagai alat prioritisasi utama (Wibowo et al., 2025; Wulandari et al., 2025). Relevansi perspektif jaringan risiko juga terlihat dari posisi risiko pembayaran vendor dan pembayaran owner yang berdampak besar, karena keduanya menciptakan *bottleneck* pada rantai pasok, yang pada akhirnya dapat meningkatkan risiko keselamatan melalui penurunan kualitas pengawasan, tekanan target kerja, dan pengurangan prosedur K3 (Akbar & Jufriyanto, 2025). Temuan ini konsisten dengan studi risiko kecelakaan kerja yang menunjukkan bahwa tekanan jadwal dan kondisi kerja yang tidak stabil sering memperbesar probabilitas hazard, sehingga risiko manajerial dapat bertransformasi menjadi risiko K3 (Prabowo & Anggita, 2023). Pada titik ini, analisis dampak tidak hanya menjelaskan besarnya konsekuensi, tetapi juga memperlihatkan mekanisme bagaimana risiko-risiko dominan dapat menggeser keseimbangan kinerja proyek secara simultan.

Secara metodologis, penggunaan Severity Index untuk mengukur dampak waktu dan biaya menunjukkan kelebihan dalam menghasilkan pemeringkatan yang konsisten dan dapat dibandingkan antar risiko, karena seluruh variabel dinilai pada skala yang sama oleh responden yang memiliki kompetensi manajerial. Pendekatan ini sejalan dengan penelitian Marselina et al. (2022) yang menegaskan bahwa SI efektif digunakan pada proyek jalan tol untuk memetakan risiko dominan berbasis persepsi, terutama ketika data kuantitatif historis tidak tersedia secara lengkap. Namun, penelitian ini memperluas penerapan SI dengan memisahkan dampak waktu dan biaya, sehingga risiko dapat dibaca lebih tajam apakah dominan pada jadwal, dominan pada biaya, atau dominan pada keduanya. Dalam perspektif analisis keputusan, pemisahan dimensi dampak ini penting karena strategi mitigasi berbeda antara risiko waktu dan risiko biaya, misalnya risiko waktu membutuhkan intervensi jalur kritis dan klaim EOT, sedangkan risiko biaya membutuhkan pengendalian cash flow dan penguatan kontrol perubahan (Santosa, 2009). Selain itu, temuan bahwa pandemi COVID-19 berada pada kategori dampak cukup baik pada waktu maupun biaya memperlihatkan bahwa risiko eksternal dapat dinilai secara proporsional, tidak selalu dipersepsikan sebagai risiko terbesar, sehingga hasil SI dapat mencegah bias “overestimation” terhadap risiko yang sedang populer dalam narasi publik (Effendi & Siregar, 2024). Dengan demikian, analisis dampak pada sub-bagian ini membangun dasar empiris yang kuat untuk tahap berikutnya, yaitu pemetaan risiko dominan melalui Matriks Probabilitas–Dampak, karena risiko yang memiliki probabilitas tinggi dan dampak besar pada kedua dimensi secara logis akan muncul sebagai risiko dominan.

Secara keseluruhan, hasil dampak waktu dan biaya memperlihatkan bahwa risiko dominan proyek jalan tol pada tahap pelaksanaan lebih banyak berakar pada isu kesiapan lahan, perubahan desain, dan ketidakstabilan pendanaan dibanding risiko teknis murni, sehingga karakter risiko proyek lebih dekat pada risiko tata kelola dan manajemen kontrak. Temuan ini sejalan dengan laporan BPJT yang menunjukkan bahwa tantangan pembangunan jalan tol nasional tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga dipengaruhi oleh koordinasi lintas institusi dan mekanisme pendanaan (Badan Pengatur Jalan Tol, 2021). Konsistensi hasil dengan studi proyek jalan tol lain memperkuat validitas eksternal temuan, khususnya terkait dominasi risiko lahan dan perubahan desain yang berulang pada berbagai konteks proyek (Putra & Hidayat, 2024; Marselina et al., 2022). Namun, penelitian ini memberikan kontribusi tambahan karena menunjukkan bahwa risiko pembayaran dan pendanaan memiliki dampak besar terhadap waktu dan biaya secara simultan, sehingga aspek finansial perlu diposisikan sebagai prioritas mitigasi setara dengan aspek lahan. Dalam kerangka ISO 31000 yang menekankan integrasi manajemen risiko ke seluruh proses organisasi, temuan ini mengindikasikan bahwa pengendalian risiko pada proyek tol harus diposisikan sebagai fungsi strategis, bukan fungsi administratif, karena risiko dominan berada pada level kebijakan proyek (Nugroho & Purwanto, 2024). Relevansi aspek keselamatan juga tetap penting karena gangguan waktu dan biaya dapat meningkatkan tekanan kerja dan potensi hazard, sehingga manajemen risiko proyek perlu memandang risiko K3 sebagai komponen integral dari stabilitas kinerja, sebagaimana ditunjukkan pada studi keselamatan jalan pada masa konstruksi dan pendekatan hotspot mapping (Jolanda et al., 2025). Pada tahap selanjutnya, hasil dampak ini akan digunakan untuk membangun matriks probabilitas–dampak guna menetapkan risiko dominan yang menjadi dasar mitigasi prioritas pada proyek Jalan Tol Prabumulih–Muara Enim Zona 5.

Risiko Dominan terhadap Kinerja Waktu dan Biaya Proyek Jalan Tol

Risiko dominan pada proyek jalan tol tidak dapat dipahami sebagai sekadar daftar variabel dengan skor tinggi, melainkan sebagai konfigurasi ketidakpastian yang secara simultan membentuk tekanan sistemik terhadap dua indikator kinerja utama proyek, yaitu waktu dan biaya, sehingga analisis dominansi harus ditempatkan dalam kerangka manajemen risiko proyek konstruksi yang menekankan hubungan sebab-akibat antara probabilitas kejadian, besaran konsekuensi, serta kapasitas pengendalian organisasi proyek (Thompson & Perry, 1991; Williams et al., 1998). Pada konteks Proyek Jalan Tol Prabumulih–Muara Enim Zona 5, dominansi risiko muncul ketika suatu risiko tidak hanya sering terjadi, tetapi juga menghasilkan efek berantai pada jalur kritis pekerjaan, produktivitas lapangan, dan stabilitas arus kas, yang dalam literatur manajemen proyek dipahami sebagai mekanisme utama pembentuk keterlambatan dan pembengkakan biaya pada proyek infrastruktur berskala besar (Santosa, 2009; Soemarno, 2008). Temuan penelitian menunjukkan bahwa lima risiko berada pada zona probabilitas tinggi dan dampak tinggi, sehingga berstatus sebagai risiko dominan terhadap waktu dan biaya, yang mengindikasikan bahwa sistem proyek menghadapi kombinasi gangguan eksternal dan kelemahan tata kelola internal secara bersamaan, bukan persoalan teknis lapangan semata (Putra & Hidayat, 2024; Marselina et al., 2022). Risiko keterlambatan pembebasan lahan menempati posisi paling kritis karena memiliki probabilitas tertinggi dan dampak besar terhadap waktu serta biaya, yang secara teoritis konsisten dengan pandangan bahwa proyek jalan tol memiliki ketergantungan tinggi pada kesiapan ruang kerja, sehingga kegagalan pra-konstruksi akan memproduksi konsekuensi paling berat pada fase konstruksi melalui penundaan mobilisasi, perubahan urutan kerja, dan peningkatan biaya overhead (Badan Pengatur Jalan Tol, 2021; Darmawi, 2008). Karakter dominan ini memperlihatkan bahwa risiko pada proyek jalan tol bersifat multidimensi, karena variabel dominan tidak hanya berasal dari ranah teknis konstruksi, tetapi juga dari ranah kontraktual, finansial, dan ketahanan sistem operasional terhadap gangguan eksternal, yang dalam kajian risk management modern dipandang sebagai indikator kedewasaan sistem pengendalian proyek (Prasetyo et al., 2023; Zayed et al., 2008).

Hasil pemetaan dominansi risiko secara kuantitatif menggunakan Matriks Probabilitas–Dampak menegaskan bahwa risiko yang memengaruhi waktu dan biaya secara simultan merupakan risiko yang berada pada “pusat gravitasi” kinerja proyek, karena risiko semacam ini tidak dapat dimitigasi melalui tindakan sektoral yang terpisah, melainkan memerlukan pendekatan koordinatif lintas fungsi proyek seperti engineering, procurement, finance, contract management, dan QHSE (Soemarno, 2008; Santosa, 2009). Risiko kurangnya dana finansial dari owner dan keterlambatan pembayaran kepada vendor sama-sama memiliki nilai $P \times I$ sebesar 16, yang menunjukkan bahwa stabilitas pendanaan merupakan faktor dominan yang bukan hanya memengaruhi kelancaran pembelian material dan pembayaran subkontraktor, tetapi juga memengaruhi kemampuan kontraktor mempertahankan ritme pekerjaan, kapasitas tenaga kerja, dan produktivitas alat berat di lapangan (Raditya et al., 2026; Darmawi, 2008). Pada proyek jalan tol, hubungan antara risiko finansial dan keterlambatan waktu sering bersifat non-linear, karena keterlambatan pembayaran tidak sekadar menunda aktivitas tertentu, melainkan dapat memicu eskalasi biaya melalui idle time, klaim tambahan biaya, penurunan kualitas pengawasan, serta peningkatan risiko K3 akibat tekanan percepatan kerja ketika pendanaan kembali tersedia (Thompson & Perry, 1991; Williams et al., 1998). Risiko perubahan desain akibat kondisi lapangan juga berada pada tingkat dominan, yang menegaskan bahwa ketidakpastian kondisi lapangan dan kualitas investigasi awal masih menjadi isu struktural pada proyek infrastruktur, sehingga perubahan desain tidak hanya menghasilkan pekerjaan tambah-kurang, tetapi juga memaksa perubahan metode kerja dan menggeser jalur kritis proyek (Putra & Hidayat, 2024; Marselina et al., 2022). Risiko pandemi COVID-19 muncul sebagai risiko dominan dengan nilai $P \times I$ sebesar 16, yang memperlihatkan bahwa proyek jalan tol tidak kebal terhadap gangguan sistemik, karena pandemi tidak hanya memengaruhi tenaga kerja dan rantai pasok, tetapi juga memengaruhi protokol keselamatan dan biaya operasional harian proyek, sebagaimana ditunjukkan oleh tren riset K3 pada jalan tol yang menempatkan emergency response dan adaptasi sistem kerja sebagai isu penting pada masa gangguan besar (Effendi & Siregar, 2024; Jolanda et al., 2025). Dominansi lima risiko ini mengonfirmasi bahwa karakter risiko pada proyek jalan tol bukan sekadar risiko konstruksi tradisional, melainkan risiko lintas domain yang memerlukan model mitigasi yang mampu membaca interaksi antar-risiko, terutama interaksi antara risiko pra-konstruksi, risiko finansial, dan risiko perubahan teknis (Prasetyo et al., 2023; Soemarno, 2008).

Tabel 5. Risiko Dominan terhadap Waktu dan Biaya Proyek

No	Variabel Risiko	P	I	$P \times I$	Tingkat Risiko
1	Keterlambatan pembebasan lahan	5	4	20	Tinggi
2	Kurangnya dana finansial dari owner	4	4	16	Tinggi
3	Keterlambatan pembayaran pada vendor	4	4	16	Tinggi
4	Perubahan desain akibat kondisi lapangan	4	4	16	Tinggi
5	Pandemi COVID-19	4	4	16	Tinggi

Sumber: Hasil Penelitian

Tabel 5 menunjukkan bahwa dominansi risiko tidak didorong oleh variasi dampak yang ekstrem, melainkan oleh konsistensi kombinasi probabilitas dan dampak pada level tinggi, sehingga proyek menghadapi “cluster risiko” yang saling menguatkan dan berpotensi menghasilkan akumulasi kerugian kinerja apabila mitigasi tidak difokuskan pada akar penyebab (Darmawi, 2008; Soemarno, 2008). Secara konseptual, hasil ini sejalan dengan prinsip manajemen risiko konstruksi bahwa risiko yang berada pada kuadran tinggi–tinggi harus diprioritaskan karena biaya mitigasi relatif lebih kecil dibandingkan biaya konsekuensi, khususnya pada proyek jalan tol yang memiliki struktur biaya overhead besar dan sensitivitas tinggi terhadap keterlambatan (Thompson & Perry, 1991; Williams et al., 1998). Dominansi keterlambatan pembebasan lahan juga mengindikasikan bahwa manajemen risiko pada proyek jalan tol tidak dapat hanya difokuskan pada fase konstruksi, karena risiko paling kritis justru berasal dari proses pra-konstruksi yang berada di luar kontrol langsung tim lapangan, sehingga tata kelola proyek perlu memperkuat integrasi koordinasi lintas pemangku kepentingan sejak tahap awal (Badan Pengatur Jalan Tol, 2021; Santosa, 2009). Temuan mengenai risiko finansial memperkuat literatur yang menyatakan bahwa cost overrun pada proyek jalan tol sering kali bukan semata akibat kenaikan harga material, tetapi akibat kegagalan mekanisme pendanaan, keterlambatan pembayaran, dan ketidakseimbangan alokasi risiko dalam kontrak yang memunculkan tekanan arus kas dan memicu efek domino pada produktivitas proyek (Raditya et al., 2026; Putra & Hidayat, 2024). Pada level implementasi, risiko keterlambatan pembayaran vendor dan kurangnya dana owner dapat dipahami sebagai risiko tata kelola rantai pasok, karena vendor dan subkontraktor merupakan simpul operasional utama yang menentukan kelancaran material, alat, dan tenaga kerja, sehingga gangguan pembayaran cenderung langsung mengubah performa harian proyek (Santosa, 2009; Darmawi, 2008). Dominansi perubahan desain menegaskan bahwa risiko teknis tidak hilang meskipun risiko kontraktual dan finansial kuat, karena perubahan desain memiliki implikasi langsung pada mutu pekerjaan, risiko rework, dan risiko keselamatan kerja yang meningkat ketika pekerjaan dilakukan dalam kondisi percepatan atau tekanan jadwal (Nugroho & Purwanto, 2024; Wulandari et al., 2025).

Keterkaitan risiko dominan terhadap aspek keselamatan kerja juga penting untuk ditegaskan karena proyek jalan tol merupakan proyek dengan intensitas aktivitas lapangan tinggi, penggunaan alat berat masif, serta keterpaparan pada risiko kecelakaan kerja dan kecelakaan lalu lintas di work zone, sehingga dominansi risiko waktu–biaya berpotensi mendorong kompromi keselamatan apabila mitigasi tidak dirancang secara terintegrasi (Jolanda et al., 2025; Effendi & Siregar, 2024). Literatur K3 pada proyek konstruksi menunjukkan bahwa tekanan jadwal dan tekanan finansial sering menjadi pemicu laten yang meningkatkan probabilitas perilaku tidak aman, menurunkan kepatuhan prosedur, dan meningkatkan risiko insiden, sehingga mitigasi risiko dominan seharusnya dipadukan dengan penguatan sistem K3 berbasis identifikasi bahaya yang sistematis (Akbar & Jufriyanto, 2025; Sunarko

& Prasetyo, 2025). Pendekatan seperti HIRARC/HAZOP, HIRADC, dan analisis kecelakaan berbasis Bowtie telah digunakan pada berbagai konteks proyek untuk memperkuat kontrol risiko keselamatan, namun pada proyek jalan tol, integrasi antara kontrol keselamatan dan kontrol kinerja waktu-biaya masih sering berjalan terpisah, sehingga risiko dominan dapat “bermigrasi” menjadi risiko keselamatan ketika terjadi percepatan kerja (Prabowo & Anggita, 2023; Akbar & Jufriyanto, 2025). Temuan penelitian ini memperlihatkan bahwa risiko dominan memiliki karakter yang relevan untuk dihubungkan dengan kajian keselamatan, karena perubahan desain, keterlambatan lahan, dan gangguan pendanaan sama-sama memicu perubahan metode kerja, perubahan staging, dan perubahan work zone yang dapat meningkatkan kompleksitas manajemen keselamatan jalan pada masa konstruksi (Jolanda et al., 2025; Soeparyanto & Nuhun, 2025). Pada ranah manajemen SDM proyek, dominansi risiko juga dapat dipahami melalui lensa kualitas sumber daya manusia, karena risiko finansial dan perubahan desain menuntut kapasitas manajerial dan teknis yang tinggi, sehingga kelemahan kompetensi atau koordinasi akan memperbesar konsekuensi risiko yang sebenarnya dapat dikendalikan (Wulandari et al., 2025; Santosa, 2009). Dalam studi lain, kegagalan kinerja proyek sering kali berkorelasi dengan faktor manusia seperti kualitas pengambilan keputusan, kemampuan perencanaan, dan disiplin pengendalian, yang berarti mitigasi risiko dominan memerlukan strategi peningkatan kapabilitas organisasi proyek, bukan hanya strategi administratif (Wulandari et al., 2025; Soemarno, 2008). Secara metodologis, pemetaan risiko dominan berbasis P×I memberikan dasar prioritas mitigasi yang lebih operasional dibandingkan sekadar ranking SI, karena matriks memaksa risiko diposisikan pada logika pengendalian yang sesuai dengan standar manajemen risiko, termasuk ISO 31000 yang banyak digunakan pada kajian risiko konstruksi (Nugroho & Purwanto, 2024; Darmawi, 2008).

Interpretasi dominansi risiko pada proyek ini juga memperlihatkan bahwa risiko jalan tol memiliki pola yang relatif konsisten dengan studi-studi jalan tol lain di Indonesia, meskipun perbedaan konteks geografis dan struktur proyek tetap memengaruhi intensitasnya, sehingga hasil penelitian ini dapat dibaca sebagai konfirmasi sekaligus spesifikasi empiris pada konteks Sumatera Selatan (Marselina et al., 2022; Putra & Hidayat, 2024). Studi berbasis Severity Index pada Tol Solo–Yogyakarta menunjukkan bahwa risiko tertentu seperti perubahan desain dan faktor eksternal memiliki peran besar, yang konsisten dengan temuan penelitian ini, namun penelitian ini memperluas pemahaman melalui integrasi matriks probabilitas–dampak untuk menegaskan dominansi terhadap dua indikator kinerja secara simultan (Marselina et al., 2022; Prasetyo et al., 2023). Pada konteks wilayah, temuan dominansi risiko juga dapat dibandingkan dengan kajian proyek jalan di daerah 3T yang menunjukkan bahwa risiko akses, logistik, dan ketidakpastian lapangan cenderung meningkatkan intensitas risiko, sehingga faktor lokasi tetap menjadi determinan penting yang memodulasi dominansi risiko pada proyek infrastruktur (Iman & Rusgiyanto, 2025; Thompson & Perry, 1991). Proyek Tol Prabumulih–Muara Enim sebagai bagian dari Tol Trans Sumatera menghadapi kompleksitas sosial-ekonomi dan tata kelola lahan yang khas, sehingga dominansi pembebasan lahan bukan sekadar masalah teknis administratif, tetapi mencerminkan dinamika koordinasi multi-aktor yang menjadi tantangan klasik pada pembangunan jaringan jalan tol nasional (Badan Pengatur Jalan Tol, 2021; Williams et al., 1998). Pada saat yang sama, dominansi risiko finansial menegaskan bahwa proyek KPBU maupun proyek jalan tol dengan skema pembiayaan kompleks memiliki sensitivitas tinggi terhadap cashflow, sehingga pengendalian biaya tidak dapat dipisahkan dari pengendalian pembayaran, struktur kontrak, dan strategi procurement (Raditya et al., 2026; Santosa, 2009). Dalam perspektif evaluasi kuantitatif, penggunaan Severity Index sebagai dasar penentuan probabilitas dan dampak memperlihatkan kekuatan pendekatan statistik deskriptif terstruktur yang sesuai untuk penelitian berbasis persepsi responden, karena SI mengagregasi penilaian ordinal menjadi ukuran numerik yang dapat dibandingkan lintas risiko, sebagaimana prinsip pengolahan data statistik terapan (Akdon & Riduwan, 2010; Marselina et al., 2022). Pemanfaatan SI juga menunjukkan relevansi inovasi metodologis penelitian ini, karena pendekatan tersebut mempertahankan keterlacakan proses kuantifikasi risiko, namun tetap kompatibel dengan kebutuhan interpretasi lapangan melalui wawancara semi-terstruktur, sehingga hasil dominansi tidak berhenti pada angka, melainkan memiliki makna operasional untuk pengambilan keputusan mitigasi (Soemarno, 2008; Prasetyo et al., 2023).

Implikasi ilmiah dari dominansi lima risiko ini terletak pada penegasan bahwa manajemen risiko proyek jalan tol perlu memprioritaskan risiko yang bersifat sistemik, karena risiko sistemik cenderung memiliki efek simultan pada waktu dan biaya, sedangkan risiko yang hanya berdampak pada salah satu indikator lebih mudah ditangani melalui kontrol parsial (Thompson & Perry, 1991; Williams et al.,

1998). Dalam teori manajemen proyek, risiko dominan semacam ini sering dipandang sebagai risiko “pengungkit”, karena mitigasi terhadapnya akan memberikan efek pengurangan risiko yang lebih besar dibandingkan mitigasi terhadap risiko-risiko minor, terutama pada proyek dengan struktur pekerjaan linear dan ketergantungan tinggi seperti konstruksi jalan tol (Santosa, 2009; Soemarno, 2008). Temuan bahwa seluruh risiko dominan berada pada tingkat “tinggi” juga memperlihatkan bahwa proyek menghadapi kondisi risiko yang terkonsentrasi pada beberapa variabel kunci, yang berarti strategi mitigasi seharusnya dirancang lebih mendalam pada sedikit risiko, bukan menyebar tipis pada banyak risiko, agar sumber daya pengendalian tidak terfragmentasi (Darmawi, 2008; Prasetyo et al., 2023). Pada tataran praktis, dominansi pembebasan lahan mengarahkan fokus mitigasi pada perbaikan mekanisme koordinasi pra-konstruksi, penguatan legal readiness, serta sinkronisasi jadwal konstruksi dengan realisasi lahan, yang pada proyek jalan tol nasional telah menjadi salah satu indikator utama keberhasilan pembangunan jaringan jalan tol (Badan Pengatur Jalan Tol, 2021; Putra & Hidayat, 2024). Dominansi risiko perubahan desain mengindikasikan perlunya peningkatan kualitas investigasi lapangan, perencanaan desain, dan prosedur persetujuan RTA, karena perubahan desain yang terjadi pada fase konstruksi cenderung meningkatkan risiko rework, menambah beban koordinasi, dan meningkatkan risiko mutu serta keselamatan (Nugroho & Purwanto, 2024; Jolanda et al., 2025). Pada risiko finansial, dominansi menunjukkan bahwa pengendalian proyek jalan tol harus memperlakukan cashflow sebagai variabel teknis strategis, bukan sekadar urusan administrasi, karena gangguan cashflow memengaruhi produktivitas lapangan dan stabilitas rantai pasok, yang pada akhirnya berkontribusi pada cost overrun dan keterlambatan (Raditya et al., 2026; Darmawi, 2008).

Dalam kerangka pengembangan metodologi, pemetaan risiko dominan melalui integrasi Severity Index dan Matriks Probabilitas–Dampak memperkuat ketahanan metodologis penelitian karena hasil dominansi tidak semata bergantung pada ranking SI, melainkan dikonfirmasi melalui klasifikasi kuadran yang secara konseptual lebih dekat dengan logika keputusan mitigasi pada manajemen risiko modern (Soemarno, 2008; Williams et al., 1998). Kekuatan pendekatan ini juga terletak pada kemampuannya menangkap risiko lintas domain, karena variabel dominan yang muncul tidak terbatas pada risiko teknis konstruksi, tetapi juga risiko finansial, kontraktual, dan gangguan eksternal, yang dalam literatur manajemen risiko proyek dipahami sebagai karakter utama proyek infrastruktur publik (Thompson & Perry, 1991; Zayed et al., 2008). Pada saat yang sama, temuan ini menunjukkan bahwa metode berbasis persepsi dapat menghasilkan peta risiko yang bermakna ketika responden dipilih secara purposif dari fungsi-fungsi kunci proyek dan instrumen telah melalui validasi reliabilitas, sehingga bias persepsi dapat ditekan melalui desain pengukuran yang disiplin (Akdon & Riduwan, 2010; Darmawi, 2008). Penggunaan skala ordinal dan pengolahan SI juga relevan untuk kondisi proyek dengan keterbatasan data kuantitatif historis, karena pada banyak proyek konstruksi di Indonesia, data kejadian risiko tidak terdokumentasi secara sistematis, sehingga pendekatan persepsi menjadi salah satu jalur realistis untuk membangun risk register berbasis bukti lapangan (Prasetyo et al., 2023; Putra & Hidayat, 2024). Dominansi risiko pandemi COVID-19 menegaskan bahwa sistem manajemen risiko proyek harus memiliki dimensi resiliensi, karena gangguan makro seperti pandemi dapat mengubah pola kerja, kebutuhan biaya, dan strategi keselamatan secara cepat, yang telah menjadi tren kajian K3 pada jalan tol dan proyek konstruksi dalam beberapa tahun terakhir (Effendi & Siregar, 2024; Jolanda et al., 2025). Dalam konteks kontrol keselamatan, dominansi risiko waktu–biaya juga mengindikasikan bahwa penguatan K3 perlu dibangun sebagai sistem pencegahan yang adaptif, karena tekanan keterlambatan dan tekanan biaya sering mendorong peningkatan eksposur bahaya, sehingga metode identifikasi bahaya seperti JSA, FMEA, dan Fishbone menjadi relevan untuk memperkuat mitigasi operasional (Wibowo et al., 2025; Akbar & Jufriyanto, 2025). Kajian-kajian K3 lain menunjukkan bahwa risiko keselamatan tidak berdiri sendiri, melainkan berinteraksi dengan risiko manajerial dan risiko teknis, sehingga dominansi risiko dalam penelitian ini dapat dibaca sebagai peringatan bahwa pengendalian kinerja proyek perlu dibarengi dengan pengendalian keselamatan yang ketat (Soeparyanto & Nuhun, 2025; Prabowo & Anggita, 2023).

Secara keseluruhan, dominansi risiko yang ditemukan memperlihatkan bahwa proyek jalan tol memiliki struktur risiko yang relatif dapat dipetakan dengan baik melalui kombinasi pendekatan SI dan Matriks Probabilitas–Dampak, karena kedua metode tersebut mampu menangkap risiko yang bersifat “sering” dan “berdampak besar” secara simultan, sehingga hasilnya lebih relevan untuk penentuan prioritas mitigasi dibandingkan pendekatan yang hanya memetakan risiko berdasarkan satu dimensi (Marselina et al., 2022; Putra & Hidayat, 2024). Temuan ini juga menegaskan bahwa dominansi risiko

bukan hanya soal besar kecilnya konsekuensi, tetapi soal kapasitas proyek mengendalikan risiko dalam kondisi keterbatasan sumber daya, keterbatasan lahan, serta dinamika pemangku kepentingan, yang merupakan karakter khas proyek jalan tol nasional (Badan Pengatur Jalan Tol, 2021; Thompson & Perry, 1991). Risiko pembebasan lahan menjadi simbol dominansi karena ia bersifat struktural, berada di hulu, dan memiliki daya rusak tinggi terhadap seluruh sistem penjadwalan proyek, sedangkan risiko finansial menjadi dominan karena ia bersifat transversal dan memengaruhi seluruh fungsi proyek dari procurement hingga operasional lapangan (Darmawi, 2008; Raditya et al., 2026). Risiko perubahan desain menegaskan bahwa kualitas informasi awal proyek masih menentukan kinerja pelaksanaan, sedangkan pandemi COVID-19 memperlihatkan bahwa ketahanan proyek terhadap shock eksternal merupakan faktor yang tidak dapat diabaikan pada pengembangan infrastruktur jangka panjang (Effendi & Siregar, 2024; Jolanda et al., 2025). Pada aspek manajemen proyek, temuan ini memberikan dasar argumentatif bahwa prioritas mitigasi harus dirancang berbasis risiko dominan yang terukur, bukan berbasis intuisi, karena keputusan mitigasi yang tidak fokus berisiko menghasilkan pengeluaran kontrol yang tinggi namun tidak menurunkan risiko pada titik paling kritis (Santosa, 2009; Soemarno, 2008). Pada aspek pengembangan penelitian, hasil ini membuka ruang untuk integrasi metode kuantitatif yang lebih kaya, misalnya AHP atau pendekatan multi-kriteria untuk memperdalam bobot antar-risiko, sebagaimana telah digunakan dalam konteks proyek jalan raya internasional, meskipun penelitian ini telah memadai untuk menghasilkan peta risiko dominan berbasis bukti lapangan yang dapat direplikasi (Zayed et al., 2008; Akdon & Riduwan, 2010).

Risiko dominan yang teridentifikasi juga memiliki implikasi pada strategi pengendalian kontrak dan klaim, karena risiko seperti keterlambatan lahan, perubahan desain, dan keterlambatan pembayaran merupakan pemicu utama klaim Extension of Time dan klaim biaya tambahan, yang dalam praktik proyek jalan tol sering menjadi sumber konflik antara owner dan kontraktor apabila tidak dikelola dengan sistem dokumentasi dan prosedur persetujuan yang ketat (Soemarno, 2008; Santosa, 2009). Dalam literatur manajemen risiko, konflik kontraktual dipahami sebagai konsekuensi lanjutan dari risiko dominan yang tidak dimitigasi sejak awal, karena ketika risiko terjadi, pihak-pihak proyek akan berusaha mengalihkan konsekuensi finansial melalui mekanisme kontrak, sehingga dominansi risiko juga dapat dibaca sebagai dominansi potensi sengketa (Williams et al., 1998; Thompson & Perry, 1991). Temuan dominansi risiko finansial memperkuat argumentasi bahwa cost overrun pada proyek jalan tol sering kali dipicu oleh faktor-faktor yang tampak administratif, padahal sesungguhnya memiliki konsekuensi teknis langsung terhadap produktivitas dan kualitas pekerjaan, yang juga ditemukan dalam kajian faktor dominan cost overrun pada proyek jalan tol dengan skema KPBU (Raditya et al., 2026). Pada sisi operasional, risiko dominan juga berkaitan dengan kesiapan sistem pengadaan, karena keterlambatan pembayaran vendor dapat menurunkan kepastian pasokan material dan mengganggu jadwal pekerjaan, sehingga risiko ini memiliki hubungan kuat dengan kenaikan biaya tidak langsung, yang dalam manajemen proyek dipahami sebagai biaya yang meningkat seiring bertambahnya durasi (Santosa, 2009; Darmawi, 2008). Pada konteks proyek jalan tol, risiko dominan juga dapat diposisikan sebagai indikator kesehatan organisasi proyek, karena proyek yang memiliki sistem manajemen risiko matang seharusnya mampu mengendalikan risiko finansial dan risiko perubahan desain melalui perencanaan yang lebih kuat, koordinasi yang lebih ketat, serta pengendalian dokumen yang lebih disiplin (Soemarno, 2008; Prasetyo et al., 2023). Dalam dimensi keselamatan, dominansi risiko waktu-biaya harus dipandang sebagai faktor pemicu latent hazard, karena tekanan keterlambatan sering mendorong percepatan kerja yang meningkatkan risiko kecelakaan, sehingga integrasi kontrol kinerja dan kontrol K3 menjadi syarat untuk mempertahankan keberhasilan proyek secara menyeluruh (Akbar & Jufriyanto, 2025; Wibowo et al., 2025). Literatur K3 berbasis JSA, FMEA, dan pendekatan sebab-akibat menekankan bahwa pengendalian keselamatan harus berangkat dari identifikasi sumber risiko dan akar penyebabnya, yang selaras dengan logika penelitian ini yang menempatkan risiko dominan sebagai fokus prioritas mitigasi (Wibowo et al., 2025; Sunarko & Prasetyo, 2025).

Temuan risiko dominan pada penelitian ini juga memperlihatkan pentingnya membedakan antara risiko yang “populer” dalam diskursus proyek dan risiko yang benar-benar dominan secara empiris, karena hasil penelitian menunjukkan bahwa risiko dominan tidak selalu identik dengan risiko teknis lapangan yang tampak kasat mata, melainkan risiko yang memiliki daya pengaruh lintas proses (Marselina et al., 2022; Putra & Hidayat, 2024). Dominansi risiko pembebasan lahan dan finansial menegaskan bahwa keberhasilan proyek jalan tol sangat dipengaruhi oleh tata kelola eksternal dan tata kelola internal yang berjalan bersamaan, sehingga pendekatan mitigasi yang hanya berfokus pada

peningkatan kinerja lapangan tanpa memperbaiki sistem pendanaan dan koordinasi pra-konstruksi akan memiliki efektivitas terbatas (Badan Pengatur Jalan Tol, 2021; Darmawi, 2008). Dominansi perubahan desain mengindikasikan bahwa sistem perencanaan teknis masih memerlukan peningkatan, karena perubahan desain pada fase konstruksi sering menimbulkan konsekuensi biaya dan waktu yang lebih besar dibandingkan perubahan desain yang diselesaikan pada fase desain awal, terutama pada proyek jalan tol yang memiliki volume pekerjaan linear dan dependensi tinggi antar segmen (Santosa, 2009; Soemarno, 2008). Dominansi pandemi COVID-19 menegaskan bahwa proyek infrastruktur modern harus memiliki skenario kontinjensi untuk risiko yang bersifat low-frequency high-impact, karena risiko semacam ini dapat memaksa perubahan sistem kerja dan struktur biaya secara cepat, yang telah menjadi tren pembahasan dalam literatur emergency response pada jalan tol (Effendi & Siregar, 2024; Jolanda et al., 2025). Pada tataran evaluasi kuantitatif, penggunaan P×I sebagai indikator tingkat risiko memperlihatkan bahwa risiko dominan bukan sekadar risiko dengan SI tinggi pada satu dimensi, melainkan risiko yang memiliki keseimbangan antara frekuensi dan konsekuensi, yang merupakan prinsip dasar pemetaan risiko dalam manajemen risiko modern (Williams et al., 1998; Thompson & Perry, 1991). Hasil dominansi ini juga memberikan justifikasi bahwa strategi mitigasi harus memprioritaskan risiko yang berada pada zona “tinggi”, karena risiko pada zona ini berpotensi menghasilkan kerugian terbesar pada kinerja proyek apabila terjadi secara berulang atau tidak tertangani, sebagaimana ditekankan dalam literatur manajemen risiko konstruksi (Soemarno, 2008; Darmawi, 2008).

Pemetaan risiko dominan ini memperlihatkan kontribusi empiris yang kuat karena hasilnya tidak hanya memperkuat temuan-temuan sebelumnya mengenai pentingnya pembebasan lahan dan perubahan desain, tetapi juga menegaskan peran risiko finansial sebagai determinan dominan yang memengaruhi waktu dan biaya secara simultan, yang dalam banyak penelitian sering dibahas terpisah (Marselina et al., 2022; Putra & Hidayat, 2024). Dalam perspektif inovasi metodologis, penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi SI dan Matriks Probabilitas–Dampak dapat digunakan sebagai alat prioritas yang efisien pada proyek dengan keterbatasan data historis, karena pendekatan tersebut tetap mampu menghasilkan peta risiko dominan yang dapat diterjemahkan menjadi tindakan mitigasi berbasis prioritas (Akdon & Riduwan, 2010; Prasetyo et al., 2023). Temuan dominansi risiko finansial dan pembayaran vendor juga relevan dengan pendekatan risk management klasik yang menempatkan risiko ekonomi sebagai salah satu kategori risiko paling menentukan dalam proyek, karena ia memengaruhi kemampuan proyek mempertahankan sumber daya dan mempertahankan kontinuitas operasi (Williams et al., 1998; Darmawi, 2008). Pada konteks pengembangan sistem mitigasi, dominansi risiko yang teridentifikasi memberikan dasar bagi penerapan kontrol yang lebih spesifik seperti penguatan prosedur pengendalian perubahan desain, penguatan sistem pembayaran back-to-back, serta penguatan sistem klaim yang terdokumentasi, yang merupakan strategi manajerial yang sering direkomendasikan dalam manajemen proyek konstruksi (Santosa, 2009; Soemarno, 2008). Di sisi keselamatan, dominansi risiko waktu–biaya perlu dipahami sebagai faktor penguat risiko K3, sehingga strategi mitigasi yang baik seharusnya tidak hanya menurunkan risiko keterlambatan dan cost overrun, tetapi juga menurunkan risiko kecelakaan kerja melalui pengendalian tekanan kerja dan penguatan sistem prosedural (Akbar & Jufriyanto, 2025; Prabowo & Anggita, 2023). Pada perspektif kualitas SDM, dominansi risiko juga mengindikasikan bahwa keberhasilan mitigasi sangat ditentukan oleh kapasitas manajerial dan koordinasi lintas fungsi, sehingga penguatan kompetensi SDM proyek menjadi bagian integral dari strategi pengurangan risiko dominan (Wulandari et al., 2025; Santosa, 2009). Dengan fokus pada risiko dominan yang terukur, penelitian ini memberikan landasan akademik dan praktis untuk menyusun prioritas mitigasi pada proyek jalan tol, terutama pada proyek-proyek jaringan Trans Sumatera yang memiliki karakteristik risiko serupa dalam aspek lahan, pendanaan, dan ketidakpastian lapangan.

KESIMPULAN

Penelitian ini menegaskan bahwa pelaksanaan proyek jalan tol memiliki struktur risiko yang kompleks, saling terkait, dan tidak dapat dipahami secara memadai apabila hanya dipetakan melalui pendekatan identifikasi umum tanpa pengukuran kuantitatif yang menghubungkan probabilitas serta dampak terhadap kinerja waktu dan biaya secara simultan. Penerapan Severity Index yang dipadukan dengan Matriks Probabilitas–Dampak terbukti mampu menyaring risiko-risiko yang paling dominan berdasarkan persepsi aktor proyek yang berpengalaman, sekaligus memetakan posisi risiko dalam zona

prioritas mitigasi secara lebih terstruktur, terukur, dan dapat dipertanggungjawabkan. Temuan penelitian memperlihatkan bahwa risiko dominan tidak hanya bersumber dari aspek teknis konstruksi, tetapi juga dipengaruhi oleh faktor manajerial, logistik, pengadaan, koordinasi lintas pihak, serta kepatuhan terhadap standar mutu dan keselamatan kerja, yang seluruhnya memiliki implikasi langsung terhadap potensi keterlambatan dan pembengkakan biaya. Ketika risiko-risiko tersebut dianalisis melalui integrasi metode kuantitatif, terlihat bahwa sebagian besar risiko yang tampak “rutin” pada praktik lapangan justru memiliki tingkat keparahan tinggi karena terjadi berulang dan memengaruhi beberapa komponen proyek secara bersamaan. Kontribusi utama penelitian ini terletak pada penyediaan kerangka pemetaan risiko berbasis data lapangan yang tidak hanya menghasilkan daftar risiko, melainkan menghasilkan prioritas risiko dominan yang relevan untuk mendukung keputusan mitigasi berbasis evidensi pada proyek jalan tol berskala besar, khususnya dalam konteks pembangunan Tol Trans Sumatera.

DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, K. M., & Jufriyanto, M. (2025). Analisis Risiko Keselamatan Dan Kesehatan Kerja Menggunakan Metode Hirarc Dan Hazop Di Area Fabrikasi. *Jurnal Teknologi Dan Manajemen Industri Terapan*, 4(4), 2027-2034. <https://doi.org/10.55826/Jtmit.V4i4.1349>
- Akdon, & Riduwan. (2010). *Rumus Dan Data Dalam Analisis Statistika* (Cet. Ke-2). Bandung: Alfabeta.
- Badan Pengatur Jalan Tol. (2021). *Laporan Tahunan Badan Pengatur Jalan Tol 2020: Transformasi Jalan Tol, Merajut Nusantara*. Jakarta: Kementerian Pekerjaan Umum Dan Perumahan Rakyat Republik Indonesia.
- Darmawi, H. (2008). *Manajemen Risiko*. Jakarta: Bumi Aksara.
- Effendi, K., & Siregar, M. R. (2024). Mapping Of Latest Methods And Trends In K3 Emergency Response On Toll Roads: Literature Review. *Radinka Journal Of Health Science*, 2(1), 196-208. <https://doi.org/10.56778/Rjhs.V2i1.291>
- Iman, M., & Rusgiyanto, F. (2025). Analisa Manajemen Risiko Proyek Di Daerah 3t (Terluar–Terdepan–Tertinggal). Studi Kasus Pembangunan Jalan Di Pulau Siberut, Kep. Mentawai, Sumatera Barat. *Jurnal Teknik: Media Pengembangan Ilmu Dan Aplikasi Teknik*, 24(1), 24-33. <https://doi.org/10.55893/Jt.Vol24no1.722>
- Jolanda, M. M., Agustini, M., & Putri, R. D. A. (2025). Analisa Keselamatan Jalan Pada Masa Konstruksi Dengan Metode Kombinasi Work Zone Dan Hotspot Mapping. *Jurnal Deformasi*, 10(2), 234-246. <https://doi.org/10.31851/Deformasi.V10i2.20405>
- Marselina, S., Hasanuddin, A., & Putra, P. P. (2022). Analisis Risiko Proyek Pembangunan Jalan Tol Solo-Yogyakarta Seksi 1 Menggunakan Metode Severity Index. *Jurnal Teknik Sipil Dan Teknologi Konstruksi*, 8(2), 78-88. <https://doi.org/10.35308/Jts-Utu.V8i2.5226>
- Nugroho, H. P., & Purwanto, E. (2024). Analisis Manajemen Risiko Keselamatan Dan Kesehatan Kerja Pada Proyek Pembangunan Jembatan Berdasarkan Iso 31000: 2018. *Journal Sains Student Research*, 2(5), 194-206. <https://doi.org/10.61722/Jssr.V2i5.2632>
- Prabowo, S. H., & Anggita, R. (2023, October). Analisis Risiko Kecelakaan Kerja Pada Proyek Pembongkaran Unit Gas Kompresor Di Fasilitas Produksi Migas Menggunakan Bowtie. In *Seminar Nasional Teknik Sipil* (Vol. 1, Pp. 157-165). <https://doi.org/10.56071/Sintesi.V1i1.696>
- Prasetyo, A., Setyaning, L. B. T., & Riyanto, E. (2023). Literature Review: Analisis Manajemen Risiko Pada Proyek. *Renovasi: Rekayasa Dan Inovasi Teknik Sipil*, 8(1). <https://doi.org/10.30738/Renovasi.V8i1.14425>
- Putra, F. P., & Hidayat, T. (2024). Analisis Risiko Pada Proyek Pembangunan Jalan Tol (Studi Kasus Proyek Pembangunan Jalan Tol Terbanggi Besar–Pematang Panggang–Kayu Agung). *Jurnal Kajian Teknik Sipil*, 9(1), 1-19. <https://doi.org/10.52447/Jkts.V9i1.7166>
- Raditya, A., Wiguna, I. P. A., & Waliulu, Y. E. P. R. (2026). Faktor Dominan Penyebab Cost Overrun Pada Proyek Jalan Tol Dengan Skema Kpbu Di Indonesia. *Sentri: Jurnal Riset Ilmiah*, 5(1), 837-851. <https://doi.org/10.55681/Sentri.V5i1.5680>
- Santosa, B. (2009). *Manajemen Proyek*. Yogyakarta: Graha Ilmu.
- Soemarno. (2008). *Manajemen Risiko Proyek Konstruksi: Risiko Dan Analisisnya*. Jakarta: Erlangga.

- Soeparyanto, T. S., & Nuhun, R. S. (2025). Identifikasi Risiko K3 (Kesehatan Dan Keselamatan) Kerja Pada Peningkatan Ruas Jalan Ululakara-Palangga Di Kabupaten Konawe Selatan Provinsi Sulawesi Tenggara. *Jurnal Kacapuri: Jurnal Keilmuan Teknik Sipil*, 8(2), 257-271. <https://dx.doi.org/10.31602/jk.v8i2.19546>
- Sunarko, S., & Prasetyo, Y. P. W. (2025). Analisis Risiko K3 Dengan Hiradc Pada Proyek Flat Type 60 Tni Al Banyuwangi. *Innovative: Journal Of Social Science Research*, 5(4), 3490-3501. <https://doi.org/10.31004/innovative.v5i4.20528>
- Thompson, P., & Perry, J. (1991). *Engineering Construction Risk*. London: Thomas Telford.
- Wibowo, N. A., Andivas, M., Harits, D., & Misrianto, M. (2025). Job Safety Analysis (Jsa) Dengan Pendekatan Fmea Dan Fishbone Diagram Pada Pemasangan Scaffolding Dalam Proyek Instalasi Annulus Operating Access. *Journal Of Industrial Engineering And Operation Management (Jieom)*, 8(2). <https://dx.doi.org/10.31602/jieom.v8i2.17240>
- Williams, C. A., Smith, M. L., & Young, P. C. (1998). *Risk Management And Insurance*. Boston, Ma: McGraw-Hill.
- Wulandari, D. A. R., Trisiana, A., Kusuma, N. S. A. U., & Tistogondo, J. (2025). Pengaruh Kualitas Sumber Daya Manusia Terhadap Risiko Kegagalan Pencapaian Kinerja Menggunakan Metode Fault Tree Analysis (Studi Kasus: Proyek Pembangunan Rsptn Universitas Jember). *Jurnal Ilmiah Mitsu (Media Informasi Teknik Sipil Universitas Wiraraja)*, 13(2), 235-252. <https://doi.org/10.24929/ft.v13i2.4031>
- Zayed, T., Amer, M., & Pan, J. (2008). Assessing Risk And Uncertainty Inherent In Chinese Highway Projects Using Ahp. *International Journal Of Project Management*, 26(4), 408–419. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2007.05.012>