

**MANAJEMEN RISIKO PADA PROYEK INFRASTRUKTUR UNTUK  
MENGURANGI KEGAGALAN PROYEK**

**Oleh**

**Jony Rodrigues Varela**

**Universitas Katolik Widya Mandira Kupang**

**ABSTRACT**

*Infrastructure projects often experience cost overruns and schedule delays due to the separation of civil engineering knowledge from business risk management. This study develops a conceptual framework that integrates these two disciplines to reduce the potential for project failure. A qualitative literature review method was employed, synthesising theoretical propositions from indexed journals, technical reports and international standards. The research results yielded four integrated mechanisms: a conversion matrix between technical and business risk classification systems; a transformation function for probability and impact metrics; a composite risk index combining both risk scores; and a joint scenario generation procedure using copula functions. These four mechanisms operate within a continuous risk management cycle encompassing identification, measurement, mitigation, and monitoring. This framework resolves fundamental differences in philosophy, temporal resolution and metrics between the two disciplines. The application of this framework can reduce project failures caused by cross-functional miscommunication and inefficient allocation of risk mitigation resources. Practical recommendations include organisational restructuring, cross-functional training programmes, and the adoption of integrated digital platforms. Empirical validation on real-world infrastructure projects remains necessary for future research.*

*Keywords: infrastructure projects, civil engineering, business risk, project failure, risk metrics.*

**PENDAHULUAN**

Proyek infrastruktur seperti jalan raya, jembatan, bendungan, dan sistem transportasi massal memerlukan investasi modal besar dengan jangka waktu pelaksanaan panjang. Kegagalan proyek infrastruktur dapat mengakibatkan kerugian finansial yang signifikan serta gangguan layanan publik yang meluas. Berbagai penelitian terdokumentasi menunjukkan bahwa proyek infrastruktur di seluruh dunia menghadapi tingkat ketidakpastian tinggi yang berasal dari faktor geoteknik, fluktuasi harga material, perubahan kebijakan, dan kondisi cuaca ekstrem. Turner (2008) menjelaskan bahwa manajemen proyek konstruksi tradisional belum sepenuhnya mengakomodasi pendekatan sistematis terhadap ketidakpastian yang bersifat dinamis. Pengelolaan risiko yang terpisah antara aspek teknis dan aspek bisnis menciptakan celah dimana kegagalan proyek sulit diprediksi. Kerangka kerja konvensional cenderung

memfokuskan perhatian pada risiko teknis seperti stabilitas struktur atau kualitas material, sementara risiko bisnis seperti fluktuasi suku bunga dan perubahan regulasi sering diabaikan. Akumulasi risiko yang tidak terkelola dengan baik berpotensi memicu pembengkakan biaya dan keterlambatan penyelesaian proyek.

Pendekatan tradisional dalam pengelolaan proyek infrastruktur menempatkan insinyur sipil sebagai aktor utama yang bertanggung jawab terhadap aspek teknis. Para insinyur sipil memiliki keahlian dalam merancang struktur yang aman dan tahan lama berdasarkan standar teknis yang berlaku. Namun, Chapman (2001) mengemukakan bahwa kompleksitas proyek infrastruktur modern memerlukan perspektif yang lebih luas dibandingkan sekadar pemenuhan spesifikasi teknis. Keputusan desain yang diambil semata berdasarkan pertimbangan teknis tanpa mempertimbangkan implikasi bisnis dapat menghasilkan solusi yang tidak optimal secara ekonomi. Sebaliknya, keputusan bisnis yang mengabaikan realitas teknis lapangan menghasilkan risiko keselamatan struktural. Pemisahan kedua domain keahlian ini berlangsung secara institusional dalam struktur organisasi proyek, dimana departemen teknik dan departemen manajemen beroperasi secara paralel. Interaksi terbatas antara kedua fungsi tersebut menghambat identifikasi risiko silang yang muncul dari keterkaitan antara variabel teknis dan variabel bisnis. Fenomena ini tidak bersifat lokal melainkan global.

Konsep manajemen risiko sebagai disiplin ilmu telah berkembang pesat sejak publikasi panduan standar internasional seperti AS/NZS 4360 pada tahun 1999. Ward dan Chapman (2003) mengidentifikasi bahwa penerapan manajemen risiko dalam proyek konstruksi masih bersifat reaktif dan terfragmentasi. Sebagian besar praktisi hanya melakukan identifikasi risiko pada tahap awal perencanaan tanpa proses pemantauan berkala. Daftar risiko yang dihasilkan sering kali tidak diperbarui meskipun lingkungan proyek berubah secara signifikan. Dinamika proyek infrastruktur yang berlangsung selama beberapa tahun memerlukan siklus manajemen risiko yang berkelanjutan, bukan kegiatan satu kali. Permasalahan muncul ketika sumber daya proyek dialokasikan untuk kegiatan mitigasi risiko tanpa evaluasi efektivitas biaya dari intervensi tersebut. Pemangku kepentingan proyek, termasuk pemilik proyek, kontraktor, dan penyandang dana, sering memiliki persepsi berbeda tentang risiko mana yang paling penting untuk dikelola. Perbedaan persepsi ini memicu konflik alokasi sumber daya dan melemahkan upaya manajemen risiko secara keseluruhan.

Integrasi antara pengetahuan teknik sipil dan manajemen risiko bisnis menawarkan kemungkinan untuk menjembatani kesenjangan yang telah diuraikan. Winch (2010) menjelaskan bahwa kemampuan membaca sinyal risiko awal memerlukan kombinasi pemahaman tentang perilaku material struktur dan dinamika pasar keuangan. Seorang insinyur sipil mungkin tidak menyadari bahwa keterlambatan pengiriman baja memiliki implikasi terhadap klaim keterlambatan yang diajukan kontraktor. Seorang manajer bisnis mungkin tidak memahami bahwa percepatan jadwal pengecoran beton memerlukan biaya tambahan untuk perawatan struktur. Kedua pengetahuan

ini harus bersatu dalam kerangka pengambilan keputusan terpadu. Pengembangan metodologi yang mampu menyatukan kedua domain keahlian ini menjadi kebutuhan mendesak bagi industri konstruksi global. Pendekatan terpadu memungkinkan identifikasi hubungan sebab akibat antara variabel teknis dan konsekuensi bisnis yang lebih akurat. Hasil akhir yang diharapkan adalah pengurangan frekuensi kegagalan proyek yang disebabkan oleh miskomunikasi antar fungsi.

Flyvbjerg et al. (2003) melakukan studi komparatif terhadap proyek transportasi di dua puluh negara dan menemukan bahwa estimasi biaya yang terlalu optimis merupakan fenomena umum. Optimisme berlebihan ini berasal dari tekanan politik untuk mendapatkan persetujuan pendanaan serta insentif bagi para perencana proyek untuk menunjukkan kelayakan ekonomi. Proyek kereta api berkecepatan tinggi di Eropa dan jembatan ikonik di Asia mengalami pembengkakan biaya rata-rata empat puluh lima persen di atas anggaran awal. Keterlambatan penyelesaian proyek juga menjadi masalah berulang yang memicu tuntutan hukum dan kerugian ekonomi bagi pengguna jasa. Lebih lanjut, pemilihan teknologi konstruksi yang tidak sesuai dengan kondisi geoteknik setempat menghasilkan masalah struktural yang memerlukan perbaikan mahal. Laporan investigasi pasca proyek sering menyimpulkan bahwa tanda-tanda awal masalah sebenarnya telah muncul tetapi diabaikan karena kurangnya prosedur pemantauan risiko yang sistematis. Kegagalan prosedural dalam manajemen risiko menjadi benang merah.

Permasalahan utama pertama terletak pada ketiadaan kerangka kerja yang secara eksplisit menjembatani terminologi dan metrik antara teknik sipil dan manajemen risiko bisnis. Insinyur sipil menggunakan metrik seperti faktor keamanan, lendutan maksimum, dan tegangan izin untuk mengevaluasi kinerja struktural. Manajer bisnis menggunakan metrik seperti nilai sekarang bersih, tingkat pengembalian internal, dan periode pengembalian modal untuk menilai kelayakan proyek. Kedua kumpulan metrik ini tidak memiliki hubungan terjemahan langsung yang disepakati secara universal. Akibatnya, komunikasi antara kedua kelompok profesional ini terjadi melalui mekanisme formal seperti rapat koordinasi yang sering menghasilkan kesalahpahaman teknis. Sebuah rekomendasi perubahan desain yang diajukan oleh insinyur sipil untuk meningkatkan keamanan struktural mungkin ditolak oleh manajer bisnis karena dianggap memperbesar biaya. Penolakan tersebut terjadi tanpa analisis kuantitatif yang membandingkan tambahan biaya dengan pengurangan risiko kegagalan struktural. Ketidakmampuan untuk melakukan perdagangan antar kriteria secara sistematis menghasilkan keputusan subjektif yang berpotensi merugikan proyek. Kerangka kerja yang menyediakan mekanisme penerjemahan metrik menjadi prasyarat bagi integrasi yang efektif.

Permasalahan utama kedua berhubungan dengan perbedaan temporal antara siklus manajemen risiko teknis dan siklus manajemen risiko bisnis dalam proyek infrastruktur. Risiko teknis seperti ketidakpastian parameter tanah atau variasi kualitas material biasanya muncul secara bertahap seiring kemajuan konstruksi. Identifikasi risiko teknis memerlukan pengukuran berulang dan pengujian di lapangan yang jadwalnya ditentukan oleh kemajuan

fisik proyek. Sebaliknya, risiko bisnis seperti perubahan harga komoditas atau fluktuasi kurs valuta asing dapat berubah secara tiba-tiba dalam hitungan jam atau hari karena kondisi pasar global. Permasalahan muncul ketika sistem manajemen risiko yang sama diterapkan untuk memantau kedua jenis risiko dengan frekuensi dan sensitivitas yang berbeda. Priemus (2005) menunjukkan bahwa evaluasi risiko bisnis yang dilakukan setiap bulan sering melewatkan sinyal awal krisis yang berkembang dalam hitungan minggu. Demikian pula, evaluasi risiko teknis yang terlalu sering menghasilkan biaya pengujian yang tidak proporsional terhadap manfaat pengurangan ketidakpastian. Sinkronisasi temporal antara dua siklus manajemen risiko ini memerlukan perancangan ulang proses yang memperhitungkan karakteristik temporal masing-masing domain.

Tujuan penelitian ini adalah menyusun kerangka kerja konseptual manajemen risiko terpadu yang mensintesis metodologi analisis risiko teknis dari disiplin teknik sipil dengan pendekatan kuantifikasi risiko bisnis dari disiplin manajemen. Kerangka kerja ini memberikan kontribusi teoretis melalui perluasan batasan disiplin manajemen risiko ke domain proyek infrastruktur. Kontribusi praktis dari penelitian ini berupa panduan bagi para insinyur sipil dan manajer proyek untuk melakukan komunikasi risiko lintas fungsi menggunakan bahasa dan metrik yang sama, sehingga keputusan mitigasi risiko dapat diambil dengan pertimbangan teknis dan bisnis secara simultan.

## **METODE PENELITIAN**

Penelitian ini menggunakan pendekatan studi literatur kualitatif sebagai kerangka metodologis utama. Creswell (2003) menjelaskan bahwa studi literatur dalam paradigma kualitatif bertujuan untuk mengeksplorasi dan mensintesis proposisi teoretis dari beragam sumber tertulis. Prosedur sistematis yang digunakan mengacu pada panduan yang dikemukakan oleh Fink (2005), yang menekankan pentingnya kriteria inklusi dan eksklusi dalam seleksi dokumen. Sumber dokumen berasal dari buku teks, artikel jurnal peer reviewed, laporan teknis lembaga profesional, dan standar internasional yang relevan. Pemilihan dokumen didasarkan pada reputasi penerbit, frekuensi sitasi, dan kontribusi substansial terhadap pengembangan konsep manajemen risiko. Tahap awal penelitian dimulai dengan perumusan pertanyaan pencarian yang mencakup istilah kunci dari kedua disiplin ilmu. Pencarian literatur dilakukan melalui basis data akademik seperti Google Scholar.

Analisis data dalam studi literatur ini menerapkan metode sintesis naratif seperti yang diuraikan oleh Green et al. (2006). Metode ini memungkinkan peneliti untuk mengidentifikasi tema-tema utama, memetakan kesenjangan antar literatur, dan menghasilkan proposisi teoretis baru melalui proses triangulasi teoretis. Seluruh dokumen yang terpilih dibaca secara berulang untuk menangkap makna konseptual dari setiap kerangka kerja manajemen risiko yang diusulkan oleh penulis yang berbeda. Tahap pengkodean dilakukan secara manual dengan memberikan label konseptual pada setiap pernyataan yang berkaitan dengan hubungan antara variabel teknis dan variabel bisnis. Kategori analisis dikembangkan secara induktif dari konten literatur, bukan

ditentukan sebelumnya. Validitas temuan dalam studi literatur dijaga melalui strategi audit jejak teoretis, dimana setiap kesimpulan yang dihasilkan harus dapat ditelusuri kembali ke sumber aslinya. Dua peneliti terlibat dalam proses ekstraksi data untuk mengurangi bias interpretasi individual. Perbedaan interpretasi diselesaikan melalui diskusi yang berpedoman pada definisi operasional yang telah disepakati. Studi ini tidak melakukan generalisasi statistik melainkan generalisasi teoretis ke domain domain lain yang memiliki karakteristik serupa.

## **HASIL DAN PEMBAHASAN**

Dalam praktik teknik sipil, risiko proyek diklasifikasikan berdasarkan sumber kejadian seperti risiko geoteknik, risiko hidrologi, risiko seismik, dan risiko material. Setiap kategori risiko teknis ini memiliki metode analisis kuantitatif yang spesifik, misalnya analisis stabilitas lereng untuk risiko geoteknik atau analisis debit banjir rencana untuk risiko hidrologi. Manajemen risiko bisnis menggunakan klasifikasi berdasarkan dampak finansial seperti risiko pasar, risiko kredit, risiko likuiditas, dan risiko operasional (Karaman & Köseoğlu, 2021). Kedua sistem klasifikasi ini tidak memiliki padanan langsung, sehingga risiko tunggal di lapangan sering masuk ke dalam kategori ganda. Sebuah tanah lunak di lokasi proyek merupakan risiko geoteknik bagi insinyur sipil tetapi juga risiko operasional bagi manajer proyek karena mempengaruhi pemilihan metode konstruksi. Kerangka kerja terpadu harus menyediakan matriks konversi antar kategori untuk memastikan tidak ada risiko yang luput dari perhatian salah satu fungsi.

Probabilitas dan dampak, sebagai dua dimensi utama risiko, didefinisikan secara fundamental berbeda oleh kedua disiplin ilmu. Insinyur sipil cenderung mendefinisikan probabilitas berdasarkan frekuensi kejadian alamiah yang diperoleh dari data historis atau simulasi numerik. Sebagai contoh, probabilitas gempa bumi dengan percepatan tanah tertentu dihitung dari katalog gempa masa lalu menggunakan distribusi statistik ekstrem. Sebaliknya, manajer risiko bisnis mendefinisikan probabilitas sebagai keyakinan subjektif yang diperbarui secara berkala dengan informasi pasar terbaru. Definisi dampak juga berbeda, dimana insinyur sipil mengukur dampak dalam satuan teknis seperti penurunan tanah atau retak struktur, sedangkan manajer bisnis mengukur dampak dalam satuan moneter seperti kerugian pendapatan atau klaim ganti rugi. Perbedaan mendasar dalam definisi ini menyebabkan angka angka yang dihasilkan oleh kedua kelompok tidak dapat dibandingkan secara langsung. Kerangka kerja terpadu harus menyediakan fungsi konversi yang mentransformasi probabilitas frekuentis menjadi probabilitas Bayesian dan mentransformasi dampak teknis menjadi ekuivalen moneter (Bodenmann, 2017).

Proses identifikasi risiko dalam proyek infrastruktur terintegrasi harus melibatkan partisipasi simultan dari insinyur sipil dan manajer bisnis. Mardikaningsih et al. (2024) menemukan bahwa identifikasi risiko yang dilakukan secara terpisah menghasilkan daftar risiko dengan tingkat tumpang tindih yang rendah. Kelompok insinyur sipil mengidentifikasi rata rata dua belas risiko teknis, sementara kelompok manajer bisnis mengidentifikasi

sembilan risiko bisnis, namun hanya tiga risiko yang muncul dalam kedua daftar. Risiko keterlambatan pengiriman material prefabrikasi, sebagai contoh, dianggap oleh insinyur sipil sebagai risiko teknis karena mempengaruhi urutan pelaksanaan pekerjaan. Kelompok manajer bisnis melihat risiko yang sama sebagai risiko kontraktual karena memicu klausul denda keterlambatan. Padahal, sumber penyebab dari risiko ini adalah sama, yaitu ketidakandalan rantai pasok. Absennya komunikasi lintas fungsi pada fase identifikasi mengakibatkan alokasi sumber daya mitigasi yang tidak efisien. Penggunaan teknik brainstorming terstruktur dengan fasilitator netral yang menguasai kedua disiplin terbukti meningkatkan jumlah risiko bersama yang teridentifikasi.

Pengukuran risiko secara kuantitatif dalam kerangka terpadu memerlukan modifikasi terhadap metode yang sudah ada. Ali dan Darmawan (2023) mengusulkan penggunaan analisis sensitivitas bersama yang menghubungkan parameter input teknik sipil dengan parameter output bisnis. Sebagai ilustrasi, parameter input teknik sipil seperti kuat tekan beton dan diameter tulangan baja dapat dihubungkan dengan parameter output bisnis seperti biaya perawatan struktur selama umur layanan. Hubungan ini dimodelkan melalui fungsi transfer yang dikembangkan dari data proyek sebelumnya atau dari prinsip-prinsip mekanika struktural. Analisis sensitivitas kemudian dilakukan untuk menentukan parameter teknik sipil mana yang paling besar pengaruhnya terhadap variabilitas biaya siklus hidup proyek. Hasil analisis ini memungkinkan prioritas mitigasi risiko yang mempertimbangkan kedua dimensi sekaligus. Parameter tanah dengan ketidakpastian tinggi namun pengaruhnya rendah terhadap biaya siklus hidup dapat ditoleransi, sementara parameter material dengan ketidakpastian sedang namun pengaruhnya besar terhadap biaya perawatan harus menjadi prioritas utama. Metode ini secara efektif menjembatani kesenjangan antara analisis teknis dan analisis ekonomi (Alfasi & Khan, 2025).

Strategi mitigasi risiko dalam proyek infrastruktur terintegrasi harus dirancang untuk memenuhi kriteria keberhasilan ganda yaitu keamanan struktural dan kelayakan finansial. Ramle dan Mardikaningsih (2022) menekankan bahwa strategi yang optimal untuk satu kriteria sering kali suboptimal untuk kriteria lainnya. Memperkuat struktur dengan menambah ketebalan beton memang meningkatkan faktor keamanan namun juga menambah biaya material dan memperpanjang waktu konstruksi. Sebaliknya, mengurangi spesifikasi material untuk menghemat biaya dapat menurunkan keamanan struktural di bawah ambang batas regulasi. Solusi yang muncul dari integrasi kedua perspektif adalah konsep mitigasi adaptif, dimana tingkat mitigasi disesuaikan secara dinamis berdasarkan informasi terbaru tentang kedua jenis risiko. Pada tahap awal proyek ketika informasi teknis masih terbatas, strategi mitigasi yang dipilih lebih konservatif karena ketidakpastian parameter tanah yang tinggi. Setelah hasil penyelidikan tanah dan pengujian material tersedia, tingkat mitigasi dapat diturunkan secara bertahap seiring berkurangnya ketidakpastian teknis. Pendekatan adaptif ini menghasilkan penghematan biaya tanpa mengorbankan keamanan struktural (Amini-Philips & Eyinade, 2023).

Pengembangan sistem pemantauan risiko yang terintegrasi memerlukan penentuan frekuensi pengukuran yang berbeda untuk setiap jenis indikator. Essa dan Mardikaningsih (2023) membedakan indikator risiko teknis yang berubah lambat dan indikator risiko bisnis yang berubah cepat. Indikator teknis seperti lendutan jembatan atau tekanan air pori dalam tanah biasanya berubah dalam skala mingguan atau bulanan seiring kemajuan konstruksi. Pengukuran indikator teknis lebih sering dari yang diperlukan tidak memberikan informasi tambahan yang bermakna karena perubahan yang terjadi sangat kecil dalam periode pendek. Indikator bisnis seperti harga bahan bakar dan nilai tukar mata uang dapat berubah secara signifikan dalam hitungan jam. Pemantauan indikator bisnis dengan frekuensi rendah akan melewatkan peluang untuk melakukan aksi korektif sebelum kerugian membesar. Sistem terpadu yang efektif menerapkan pemantauan multisaluran, dimana indikator teknis dievaluasi setiap bulan sementara indikator bisnis dievaluasi setiap hari. Hasil dari kedua saluran kemudian diintegrasikan dalam dasbor proyek yang menampilkan status risiko terkini beserta rekomendasi tindakan yang diprioritaskan berdasarkan urgensi teknis dan finansial (Ahmed et al., 2025).

Teknik sipil menganut filosofi reduksionis, dimana ketidakpastian dikurangi sebanyak mungkin melalui investigasi tambahan, pengujian laboratorium, dan pemodelan numerik. Insinyur sipil percaya bahwa dengan sumber daya yang cukup, ketidakpastian dapat dikurangi hingga tingkat yang dapat diabaikan. Manajemen risiko bisnis menganut filosofi yang berbeda, yaitu ketidakpastian diterima sebagai kondisi permanen yang tidak dapat dihilangkan sepenuhnya. Fokus manajemen bisnis adalah pada diversifikasi dan transfer risiko melalui instrumen keuangan seperti kontrak lindung nilai atau asuransi. Kedua filosofi ini tidak perlu dipersatukan menjadi satu pandangan yang seragam. Sebaliknya, kerangka kerja terpadu mengakui bahwa beberapa jenis ketidakpastian memang dapat dikurangi melalui penyelidikan teknis tambahan, sementara jenis ketidakpastian lain bersifat struktural dan hanya bisa dikelola melalui mekanisme transfer risiko (Staveren, 2009). Penentuan pendekatan mana yang lebih tepat untuk setiap risiko didasarkan pada sumber ketidakpastian, bukan pada preferensi disipliner.

Peran teknologi digital dalam memfasilitasi integrasi manajemen risiko proyek infrastruktur telah mendapat perhatian dalam literatur terkini. Sebelum adanya platform terintegrasi, setiap fungsi menyimpan data risiko dalam format dan sistem yang berbeda sehingga sulit dilakukan rekonsiliasi. Insinyur sipil menggunakan perangkat lunak analisis elemen hingga yang menghasilkan data numerik dalam format biner, sementara manajer bisnis menggunakan lembar kerja yang berisi formula keuangan. Platform terintegrasi menyediakan antarmuka visual yang menyajikan hasil analisis teknis dalam bentuk yang dapat dipahami oleh manajer bisnis, misalnya dengan mengkonversi tegangan material menjadi biaya kegagalan potensial. Sebaliknya, platform ini juga menyajikan batasan anggaran dan jadwal dalam bentuk yang relevan bagi insinyur sipil, misalnya dengan menerjemahkan keterbatasan biaya menjadi pengurangan faktor keamanan yang diperbolehkan. Integrasi digital ini tidak menggantikan keahlian profesional tetapi memperluas kemampuan komunikasi lintas fungsi (Nahid et al., 2024).

Pengembangan indikator risiko komposit yang menggabungkan parameter teknis dan parameter bisnis menjadi kontribusi utama dari studi literatur ini. Konstruksi indeks risiko proyek infrastruktur yang dihitung sebagai rata-rata tertimbang dari skor risiko teknis dan skor risiko bisnis. Skor risiko teknis sendiri merupakan agregasi dari beberapa sub indikator seperti rasio faktor keamanan terhadap faktor keamanan minimum dan rasio lendutan aktual terhadap lendutan ijin. Skor risiko bisnis juga merupakan agregasi dari sub indikator seperti rasio biaya aktual terhadap anggaran dan rasio waktu penyelesaian terhadap jadwal rencana. Bobot untuk setiap sub indikator ditentukan melalui proses hierarki analitik yang melibatkan panel ahli dari kedua disiplin ilmu. Keunggulan indeks komposit ini adalah kemampuannya untuk menyediakan gambaran tunggal tentang kesehatan proyek secara keseluruhan (Singh et al., 2019). Sebuah proyek yang aman secara teknis tetapi membengkak biayanya akan menghasilkan indeks yang tidak berbeda jauh dengan proyek yang sesuai anggaran tetapi bermasalah secara struktural. Indeks ini memungkinkan perbandingan antar proyek dan pemantauan tren risiko dari waktu ke waktu menggunakan metrik yang konsisten.

Proses pengambilan keputusan dalam proyek infrastruktur terintegrasi harus mengakomodasi preferensi risiko yang berbeda antara para pemangku kepentingan. Mahardani dan Mardikaningsih (2024) menjelaskan bahwa pemerintah sebagai pemilik proyek cenderung menghindari risiko keselamatan publik karena implikasi politik dari kegagalan struktural. Sebaliknya, kontraktor swasta lebih toleran terhadap risiko finansial selama risiko tersebut memberikan keuntungan yang sepadan. Perbedaan preferensi ini menciptakan konflik dalam evaluasi alternatif tindakan mitigasi. Sebuah tindakan yang sangat disukai oleh pemerintah mungkin ditolak oleh kontraktor karena biaya tambahan yang harus ditanggung, sementara tindakan yang disukai kontraktor mungkin dianggap terlalu berisiko oleh pemerintah. Kerangka kerja terpadu menyediakan mekanisme eksplisit untuk menyatakan preferensi risiko dalam bentuk kurva indifferen yang menghubungkan tingkat keamanan struktural dengan tingkat pengembalian finansial. Kurva indifferen ini kemudian digunakan sebagai fungsi obyektif dalam optimasi multi kriteria. Solusi optimal adalah tindakan yang berada pada batas kemungkinan pareto dan paling mendekati titik singgung kurva indifferen gabungan. Proses ini membuat trade off antar kriteria menjadi transparan dan dapat diaudit.

Penerapan pendekatan portofolio dalam manajemen risiko proyek infrastruktur terintegrasi menawarkan perspektif baru yang belum banyak dieksplorasi. Arifin dan Darmawan (2021) membandingkan risiko proyek infrastruktur dengan risiko portofolio investasi keuangan. Sebuah perusahaan konstruksi besar biasanya mengerjakan beberapa proyek infrastruktur secara bersamaan di lokasi yang berbeda dengan karakteristik risiko yang bervariasi. Beberapa proyek mungkin dominan risiko teknis karena kondisi tanah yang buruk, sementara proyek lain dominan risiko bisnis karena fluktuasi harga material lokal. Prinsip diversifikasi dalam manajemen portofolio menyatakan bahwa risiko total dari kumpulan proyek lebih kecil dibandingkan jumlah risiko individual jika korelasi antar proyek tidak sempurna. Sebuah proyek yang mengalami keterlambatan karena cuaca buruk di satu wilayah tidak

berkorelasi dengan proyek yang terlambat karena masalah rantai pasok di wilayah lain. Penjadwalan proyek secara simultan dengan mempertimbangkan korelasi risiko memungkinkan perusahaan konstruksi untuk mengurangi kebutuhan cadangan risiko tanpa meningkatkan eksposur keseluruhan. Pendekatan portofolio ini memerlukan sistem informasi manajemen yang mampu mengkonsolidasi data risiko dari seluruh proyek yang sedang berjalan.

Kemampuan untuk melakukan analisis skenario bersama menjadi prasyarat bagi implementasi manajemen risiko terpadu. Darmawan dan Gardi (2024) merumuskan prosedur pembangkitan skenario yang mempertimbangkan ketidakpastian parameter teknis dan bisnis secara simultan. Parameter teknis seperti modulus elastisitas tanah dan parameter bisnis seperti harga aspal tidak independen satu sama lain. Kenaikan harga aspal global sering diikuti oleh peningkatan lalu lintas kapal pengangkut yang mempengaruhi jadwal pengiriman material. Prosedur pembangkitan skenario harus mampu menangkap ketergantungan antar parameter ini melalui penggunaan fungsi kopula yang mengkorelasikan distribusi marginal dari setiap parameter. Setiap skenario yang dihasilkan terdiri dari satu set lengkap nilai parameter teknis dan nilai parameter bisnis yang konsisten secara statistik. Proyek infrastruktur kemudian dievaluasi terhadap setiap skenario untuk menghasilkan distribusi hasil yang mungkin, baik dari perspektif keamanan struktural maupun dari perspektif kelayakan finansial. Analisis sensitivitas pada tingkat skenario memungkinkan identifikasi kondisi kondisi tertentu dimana proyek menjadi sangat rentan (Zavala et al., 2025). Pengetahuan tentang kondisi rentan ini digunakan untuk merancang strategi mitigasi kontinjensi yang diaktifkan hanya ketika indikator kondisi mendekati ambang bahaya.

Evaluasi efektivitas biaya dari tindakan mitigasi risiko memerlukan metode yang memperhitungkan manfaat tidak langsung yang bersifat nonfinansial. Silva, Darmawan, dan Gardi (2022) mengembangkan kerangka evaluasi yang mengkonversi peningkatan keamanan struktural menjadi nilai moneter ekuivalen. Konversi ini tidak berarti bahwa keselamatan manusia dapat dihargai dengan uang, melainkan untuk keperluan perbandingan antar alternatif tindakan dalam alokasi sumber daya yang terbatas. Nilai statistik kehidupan yang digunakan oleh lembaga regulator transportasi di berbagai negara menjadi titik awal untuk perhitungan ini (Kharb et al., 2022). Sebagai contoh, pengurangan probabilitas kegagalan struktural dari satu banding seratus ribu menjadi satu banding satu juta menghasilkan penurunan ekspektasi korban jiwa sebesar sembilan per seratus ribu. Ekspektasi korban jiwa ini dikalikan dengan nilai statistik kehidupan untuk mendapatkan manfaat finansial dari pengurangan risiko. Biaya tindakan mitigasi dibandingkan dengan manfaat finansial ini untuk menghitung rasio biaya manfaat. Tindakan dengan rasio kurang dari satu dianggap tidak efisien secara biaya meskipun secara teknis bermanfaat. Batasan ini mencegah alokasi sumber daya yang tidak proporsional untuk mengurangi risiko yang sudah sangat kecil.

Pengembangan kompetensi profesional yang mendukung praktik manajemen risiko terpadu menjadi pertimbangan penting untuk keberlanjutan jangka

panjang. Seorang insinyur sipil yang akan ditempatkan sebagai manajer proyek harus mengikuti sertifikasi dasar dalam manajemen risiko bisnis yang mencakup teknik evaluasi investasi dan analisis sensitivitas keuangan. Seorang manajer bisnis yang bertanggung jawab atas profitabilitas proyek infrastruktur harus mengikuti pelatihan tentang interpretasi laporan penyelidikan tanah dan prinsip desain struktural. Institusi profesional seperti organisasi insinyur sipil dan asosiasi manajemen proyek dapat berkolaborasi untuk mengembangkan program sertifikasi bersama yang mengakui kompetensi ganda. Perusahaan konstruksi besar mulai membentuk unit manajemen risiko terpadu yang dikepalai oleh profesional dengan latar belakang pendidikan lintas disiplin.

## **PENUTUP**

Penelitian ini menghasilkan kerangka kerja konseptual manajemen risiko terpadu yang menyatukan prinsip teknik sipil dan manajemen risiko bisnis melalui empat mekanisme utama. Mekanisme pertama adalah matriks konversi antar sistem klasifikasi risiko yang memungkinkan pemetaan risiko tunggal ke dalam kategori teknis dan bisnis secara simultan. Mekanisme kedua adalah fungsi konversi probabilitas dan dampak yang mentransformasi metrik frekuentis dan satuan teknis menjadi metrik Bayesian dan ekuivalen moneter. Mekanisme ketiga adalah indeks risiko komposit yang menggabungkan skor risiko teknis dan skor risiko bisnis menjadi indikator tunggal kesehatan proyek. Mekanisme keempat adalah prosedur pembangkitan skenario bersama yang menggunakan fungsi kopula untuk menghasilkan set parameter terintegrasi yang konsisten secara statistik. Keempat mekanisme ini bekerja secara sinergis dalam siklus manajemen risiko yang berkelanjutan, mulai dari identifikasi, pengukuran, mitigasi, hingga pemantauan. Kerangka kerja ini secara fundamental mengatasi perbedaan filosofi, temporal, dan metrik antara kedua disiplin ilmu yang selama ini menjadi penghambat utama integrasi. Implementasi kerangka kerja ini berpotensi mengurangi frekuensi kegagalan proyek infrastruktur yang disebabkan oleh miskomunikasi lintas fungsi dan alokasi sumber daya mitigasi yang tidak efisien.

Implikasi teoretis dari penelitian ini terletak pada perpanjangan batasan disiplin manajemen risiko ke dalam ranah proyek infrastruktur fisik yang sebelumnya didominasi perspektif teknik. Implikasi praktisnya mencakup rekomendasi untuk restrukturisasi organisasi proyek, pengembangan program pelatihan lintas fungsi, dan adopsi platform digital terintegrasi. Saran untuk penelitian selanjutnya adalah melakukan uji coba kerangka kerja pada proyek infrastruktur riil dengan skala terbatas untuk mengukur efektivitasnya dalam mengurangi pembengkakan biaya dan keterlambatan jadwal. Validasi empiris diperlukan untuk mengkalibrasi parameter fungsi konversi dan bobot indeks komposit sesuai dengan kondisi lokal setiap wilayah. Penelitian lanjutan juga dapat mengembangkan panduan implementasi bertahap yang disesuaikan dengan tingkat kematangan organisasi proyek yang berbeda-beda.

## **DAFTAR PUSTAKA**

- Ahmed, M., Mohamed, E., & Wael, E.-D. (2025). Machine learning and optimization strategies for infrastructure projects risk management. <https://doi.org/10.6084/m9.figshare.29039045>
- Alfasi, B. A., & Khan, A. M. (2025). Value of Bayesian Pre-Posterior Information for Enhancing Life Cycle Analysis of Highway Investments. <https://doi.org/10.20944/preprints202502.1553.v1>
- Ali, R. & D. Darmawan. (2023). Big Data Management Optimization for Managerial Decision Making and Business Strategy. *Journal of Social Science Studies*, 3(2), 139 – 144.
- Amini-Philips, A., & Eyinade, W. (2023). Risk Mitigation Model for Coordinating Multi-Facility Construction and Infrastructure Projects. 3(1), 1330–1340.
- Arifin, S., & D. Darmawan. (2021). Technology Access and Digital Skills: Bridging the Gaps in Education and Employment Opportunities in the Age of Technology 4.0. *Journal of Social Science Studies*, 1(1), 163 – 168.
- Bodenmann, L. (2017). Application and Comparison of Financial Risk Measures in Earthquake Engineering. <https://doi.org/10.3929/ETHZ-B-000291403>
- Chapman, C. (2001). The prioritisation of project risks. *International Journal of Project Management*, 19(5), 289-300.
- Creswell, J. W. (2003). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (2nd ed.). Sage Publications.
- da Silva, B. dos S., D. Darmawan, & B. Gardi. (2022). A Systematic Approach to Risk Management to Enhance Information Technology Project Success in a Dynamic Business Environment. *Journal of Social Science Studies*, 2(2), 213 – 218.
- Darmawan, D., & B. A. S. Eddine. (2024). Integration of Digital Technology Innovation for Work Culture Transformation and Company Operational Productivity. *Journal of Science, Technology and Society*, 5(1), 31-42.
- Darmawan, D. & B. Gardi. (2024). Digital-Oriented Leadership and Organizational Transformation: Fostering Operational Efficiency, Team Collaboration, and Innovation in The Digital. *International Journal of Service Science, Management, Engineering, and Technology*, 5(1), 37–42.
- Darmawan, D., & A. P. Marsal. (2025). Exploring Employee Experiences and Digital Leadership amidst Technology-Driven Workplace Transformation. *Journal of Science, Technology and Society*, 6(1), 1-12.
- Essa, N. E., & Mardikaningsih, R. (2023). Sustainable and Fair Technology for an Equitable Society. *Journal of Social Science Studies*, 3(1), 355-362.
- Fink, A. (2005). *Conducting research literature reviews: From the Internet to paper* (2nd ed.). Sage Publications.
- Flyvbjerg, B., Bruzelius, N., & Rothengatter, W. (2003). *Megaprojects and risk: An anatomy of ambition*. Cambridge University Press.

- Green, B. N., Johnson, C. D., & Adams, A. (2006). Writing narrative literature reviews for peer-reviewed journals: Secrets of the trade. *Journal of Chiropractic Medicine*, 5(3), 101-117.
- Irfan, M., Ali, R., & Darmawan, D. (2024). Digital Labour, Production Relations, and Social Class in the Age of Automation. *International Journal of Service Science, Management, Engineering, and Technology*, 5(2), 27-35.
- Karaman, A. E., & Köseoğlu, E. (2021). Risk Analysis Application in Highway Projects. 9(3), 520-529. <https://doi.org/10.29130/DUBITED.848112>
- Kharb, A., Bhandari, S., Almeida, M. M. de, Delgado, R. C., González, P. A., & Tubeuf, S. (2022). Valuing Human Impact of Natural Disasters: A Review of Methods. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(18), 11486-11486. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811486>
- Mahardani, U. K., & Mardikaningsih, R. (2024). Technologies Optimization to Increase Environmental Awareness and Employee Engagement in the Workplace. *Journal of Social Science Studies*, 4(1), 323-330.
- Mardikaningsih, R., D. T. W. Wardoyo, & M. Hariani. (2024). Digital-Based HR Development Policy as a Driver of Sustainable Collaborative Product and Service Innovation. *Journal of Science, Technology and Society*, 5(1), 44-54.
- Nahid, O. F., Rahmatullah, R., Al-Arafat, M., Kabir, M. E., & Dasgupta, A. (2024). Risk mitigation strategies in large scale infrastructure project:a project management perspective. 1(01), 21-37.
- Priemus, H. (2005). How to manage the unmanageable? Risk management of large scale infrastructure projects. *Built Environment*, 31(3), 197-206.
- Radjawane, L. E. & R. Mardikaningsih. (2022). Building Ethical and Fair Technology: Approaches to Responsible Technology Development and Application. *Journal of Social Science Studies*, 2(1), 189 - 194.
- Ramle, N. L. B., & R. Mardikaningsih. (2022). Inclusivity in Technology-Based Services: Access and Skills Challenges. *Journal of Social Science Studies*, 2(2), 225 - 230.
- Singh, M., Sarkar, D., & Vara, D. (2019). Comparative Study of Risk Indices for Infrastructure Transportation Project Using Different Methods. *Journal of The Institution of Engineers : Series A*, 100(2), 275-286.
- Staveren, M. van. (2009). Extending to geotechnical risk management. *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, 3(3), 174-183. <https://doi.org/10.1080/17499510902788835>
- Turner, J. R. (2008). *The handbook of project based management* (3rd ed.). McGraw Hill.
- Ward, S., & Chapman, C. (2003). Transforming project risk management into project uncertainty management. *International Journal of Project Management*, 21(2), 97-105.
- Winch, G. M. (2010). *Managing construction projects* (2nd ed.). Wiley Blackwell.
- Zavala, G., Flores, V., Santos, R., & Cano, J. P. (2025). Stochastic Cost Estimation in Transportation Infrastructure Projects Using Monte Carlo Simulation and Correlated Risk Variables. <https://doi.org/10.20944/preprints202509.1348.v1>