

Analisis Faktor Risiko Investasi Proyek Jalan Tol KPBU Berbasis Sistem Informasi: Literature Review

Dwi Wahyu Prasetyo¹, Lina², Endah Murtiana Sari^{*3}

¹Civil Engineering Doctoral Program, Faculty of Engineering, Universitas Tarumanagara, Jakarta Barat 11440, Indonesia

²Faculty of Information Technology, Universitas Tarumanagara, Jakarta Barat 11440, Indonesia

³Industrial Engineering, Universitas Sains Indonesia, Bekasi, Indonesia

Email: dwi.328242008@stu.untar.ac.id¹, lina@fti.untar.ac.id²,

endah.murtiana@sains.ac.id^{*3}

****Corresponding Author***

Article Info	ABSTRACT
Article history: <i>Received: May 2026</i> <i>Revised: June 2026</i> <i>Accepted: July 2026</i> Keywords: KPBU jalan tol analisis risiko investasi Systematic Literature Review PRISMA Decision Support System	Investasi proyek jalan tol melalui skema Kerja Sama Pemerintah dan Badan Usaha (KPBU) menghadapi tingkat ketidakpastian yang tinggi akibat kompleksitas karakteristik proyek, besarnya nilai investasi, panjangnya periode konsesi, serta keterlibatan berbagai pemangku kepentingan. Risiko investasi tidak hanya berasal dari aspek konstruksi, tetapi juga dipengaruhi oleh faktor finansial, permintaan lalu lintas (<i>traffic risk</i>), regulasi, dan dinamika kebijakan yang dapat memengaruhi kelayakan investasi. Pendekatan analisis risiko yang masih bersifat konvensional belum mampu menyediakan informasi yang terintegrasi, objektif, dan adaptif sebagai dasar pengambilan keputusan investasi. Penelitian ini bertujuan mengembangkan model konseptual analisis risiko investasi proyek jalan tol KPBU berbasis sistem informasi sebagai landasan pengembangan <i>Decision Support System</i> (DSS). Metode penelitian menggunakan <i>Systematic Literature Review</i> (SLR) dengan pedoman PRISMA 2020 untuk mengidentifikasi dan mensintesis variabel serta indikator risiko investasi dari publikasi bereputasi yang terindeks <i>Scopus</i> dan <i>Web of Science</i> pada periode 2015–2025. Hasil sintesis literatur mengidentifikasi empat kelompok risiko utama, yaitu risiko konstruksi, risiko finansial, risiko permintaan (<i>traffic risk</i>), dan risiko regulasi. Keempat variabel tersebut dirumuskan sebagai variabel independen yang memengaruhi keputusan investasi, dengan sistem informasi analisis risiko diposisikan sebagai variabel mediasi yang mengintegrasikan proses identifikasi, penilaian, dan visualisasi risiko.



1. INTRODUCTION

Pembangunan infrastruktur transportasi merupakan salah satu pilar utama dalam meningkatkan daya saing ekonomi, memperkuat konektivitas antarwilayah, serta mendorong pertumbuhan ekonomi yang berkelanjutan. Jalan tol sebagai bagian dari jaringan transportasi nasional

berperan penting dalam mengurangi biaya logistik, meningkatkan efisiensi distribusi barang dan jasa, serta mendukung pengembangan kawasan industri dan pusat pertumbuhan ekonomi. Namun, kebutuhan investasi infrastruktur yang terus meningkat tidak sebanding dengan kapasitas fiskal pemerintah, sehingga skema Kerja Sama Pemerintah dan Badan Usaha (KPBU) atau *Public-Private Partnership* (PPP) menjadi alternatif pembiayaan yang banyak diterapkan di berbagai negara [1].

Skema KPBU memungkinkan pemerintah dan badan usaha berbagi tanggung jawab, sumber daya, dan risiko dalam penyediaan infrastruktur publik. Meskipun demikian, keberhasilan implementasi proyek KPBU sangat bergantung pada efektivitas pengelolaan risiko investasi sejak tahap perencanaan hingga berakhirnya masa konsesi. Berbeda dengan proyek konstruksi konvensional, investasi proyek jalan tol memiliki karakteristik risiko yang lebih kompleks karena membutuhkan investasi awal yang besar, periode konsesi jangka panjang, ketergantungan terhadap proyeksi permintaan lalu lintas, serta dipengaruhi oleh kondisi ekonomi, kebijakan pemerintah, dan perubahan regulasi. Risiko-risiko tersebut dapat memengaruhi kelayakan finansial proyek maupun minat investor untuk berpartisipasi dalam pembiayaan infrastruktur.

Dalam proyek jalan tol KPBU, risiko investasi umumnya dikelompokkan ke dalam beberapa kategori utama, yaitu risiko konstruksi (*construction risk*), risiko finansial (*financial risk*), risiko permintaan lalu lintas (*traffic demand risk*), dan risiko regulasi (*regulatory risk*). Risiko konstruksi berkaitan dengan keterlambatan pelaksanaan, pembengkakan biaya, kegagalan mutu, maupun produktivitas kontraktor. Risiko finansial meliputi fluktuasi suku bunga, inflasi, nilai tukar, struktur pembiayaan, dan kemampuan proyek menghasilkan arus kas yang memadai. Risiko permintaan (*traffic risk*) merupakan salah satu risiko paling kritis karena berkaitan langsung dengan ketepatan proyeksi volume lalu lintas yang menentukan pendapatan selama masa konsesi. Sementara itu, risiko regulasi mencakup perubahan kebijakan, perizinan, tarif tol, perpajakan, maupun ketentuan hukum yang dapat memengaruhi keberlangsungan investasi [2], [3], [4], [5].

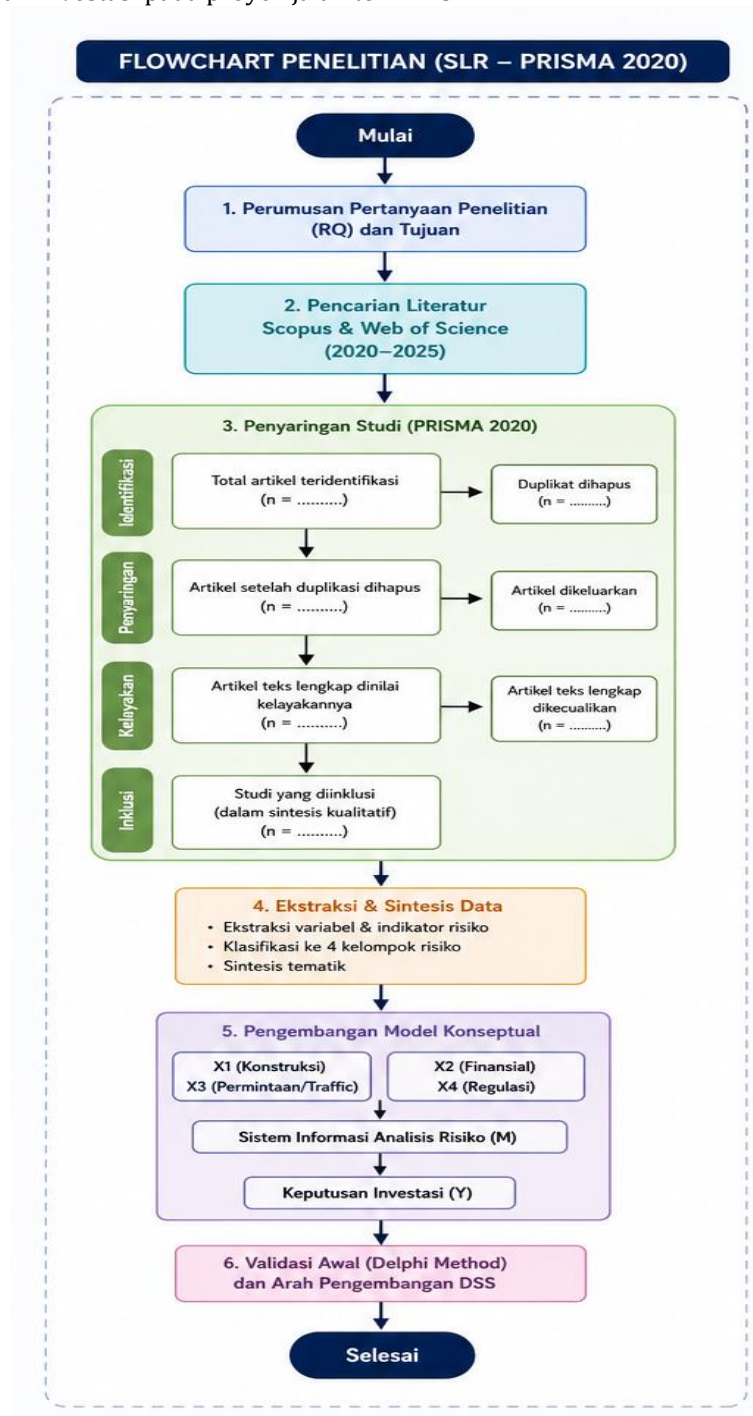
Berbagai penelitian menunjukkan bahwa kegagalan proyek jalan tol KPBU lebih banyak dipengaruhi oleh ketidakmampuan dalam mengidentifikasi, mengalokasikan, dan memitigasi risiko secara tepat dibandingkan oleh aspek teknis konstruksi semata. Kesalahan dalam memprediksi volume lalu lintas telah menjadi penyebab utama berbagai kasus renegotiasi kontrak, restrukturisasi pembiayaan, hingga kegagalan investasi pada proyek jalan tol di berbagai negara. Oleh karena itu, analisis risiko investasi yang komprehensif menjadi faktor kunci dalam meningkatkan bankability proyek serta mengurangi potensi kegagalan investasi [1], [6], [7].

Perkembangan teknologi digital telah mendorong transformasi pengelolaan risiko menuju pendekatan berbasis sistem informasi dan *Decision Support System* (DSS). Sistem informasi memungkinkan integrasi data risiko dari berbagai sumber, pelaksanaan analisis risiko secara lebih objektif, penyajian visualisasi risiko melalui dashboard, serta penyusunan rekomendasi mitigasi yang dapat digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan investasi. Pendekatan ini dinilai lebih efektif dibandingkan metode konvensional yang masih mengandalkan penilaian subjektif dan dokumen manual karena mampu meningkatkan transparansi, akurasi, serta kecepatan proses evaluasi risiko [8], [9], [10], [11].

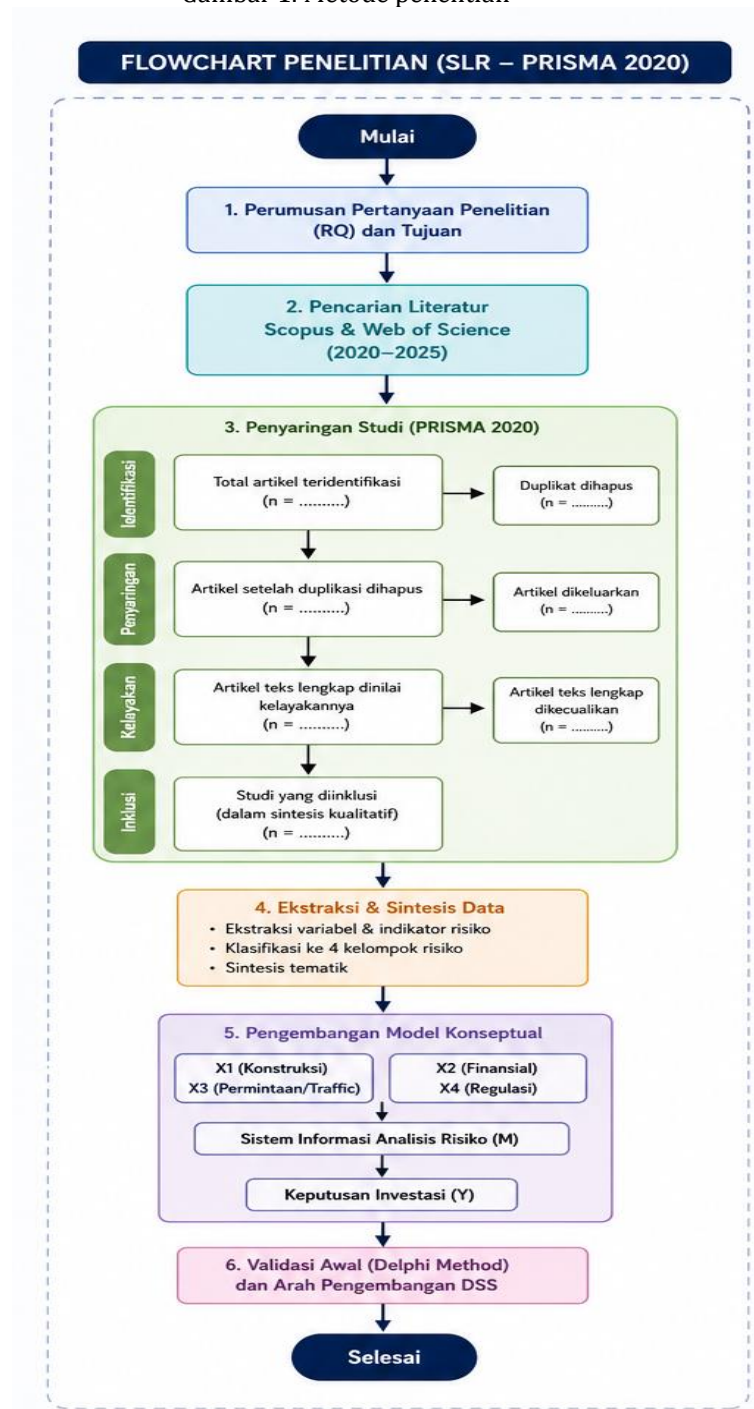
Hasil telaah literatur menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian sebelumnya masih berfokus pada identifikasi risiko individual, analisis kelayakan finansial, alokasi risiko, atau strategi mitigasi secara parsial. Penelitian mengenai integrasi risiko konstruksi, risiko finansial, risiko permintaan (*traffic risk*), dan risiko regulasi ke dalam suatu model analisis risiko berbasis sistem informasi untuk mendukung keputusan investasi proyek jalan tol KPBU masih sangat terbatas. Selain itu, belum banyak penelitian yang menyusun indikator risiko melalui pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) sebagai dasar pengembangan model konseptual yang selanjutnya divalidasi menggunakan metode Delphi bersama para pakar [12], [13], [14], [15], [16].

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan melakukan *Systematic Literature Review* (SLR) dengan pedoman PRISMA 2020 terhadap artikel yang terindeks Scopus dan Web of Science pada periode 2020–2025 untuk mengidentifikasi, mengelompokkan, dan mensintesis variabel serta indikator risiko investasi proyek jalan tol KPBU. Variabel independen terdiri atas risiko konstruksi, risiko finansial, risiko permintaan (*traffic risk*), dan risiko regulasi, sedangkan sistem informasi analisis risiko diposisikan sebagai variabel mediasi yang mendukung keputusan investasi sebagai variabel dependen. Hasil penelitian diharapkan menghasilkan model konseptual yang menjadi dasar penyusunan instrumen penelitian, validasi melalui metode Delphi, serta pengembangan sistem

informasi analisis risiko investasi sebagai *Decision Support System* yang mampu meningkatkan kualitas pengambilan keputusan investasi pada proyek jalan tol KPBU.



Gambar 1. Metode penelitian



Gambar 1. Metode penelitian

2. METHOD

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) dengan mengacu pada pedoman *Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) 2020[17]. Pendekatan ini dipilih karena mampu menghasilkan sintesis literatur yang sistematis, transparan, dan dapat direplikasi dalam mengidentifikasi variabel serta indikator risiko investasi pada proyek jalan tol dengan skema Kerja Sama Pemerintah dan Badan Usaha (KPBU). Hasil sintesis literatur selanjutnya digunakan sebagai dasar penyusunan model konseptual analisis risiko investasi berbasis sistem

informasi yang akan divalidasi melalui metode *Delphi* pada tahap penelitian berikutnya. Tahap awal penelitian adalah merumuskan pertanyaan penelitian (*Research Question*) berdasarkan kesenjangan penelitian yang ditemukan pada studi terdahulu. Rumusan pertanyaan penelitian difokuskan pada:

1. Apa saja variabel dan indikator risiko investasi yang paling dominan pada proyek jalan tol KPBU?
2. Bagaimana hubungan antarvariabel risiko investasi dalam mendukung keputusan investasi?
3. Bagaimana sistem informasi dapat diintegrasikan sebagai media analisis risiko untuk mendukung pengambilan keputusan investasi?

Pertanyaan tersebut menjadi dasar dalam menentukan strategi pencarian literatur, kriteria seleksi artikel, serta proses sintesis hasil penelitian.

Pencarian literatur dilakukan pada dua basis data internasional bereputasi, yaitu *Scopus* dan *Web of Science (WoS)*, karena keduanya menyediakan publikasi ilmiah yang telah melalui proses *peer review* dengan kualitas akademik yang tinggi. Artikel yang dianalisis dibatasi pada periode 2020–2025 agar menghasilkan kajian yang mutakhir mengenai risiko investasi proyek KPBU. Kata kunci pencarian disusun menggunakan kombinasi operator Boolean sebagai berikut:

("toll road" OR highway) AND ("Public Private Partnership" OR PPP OR KPBU) AND ("investment risk" OR "risk assessment" OR "risk management") AND ("decision support system" OR "information system"). Alur penelitian yang digunakan dalam studi ini disajikan pada Gambar 1.

Proses seleksi artikel mengikuti tahapan PRISMA 2020 yang terdiri atas tiga tahap, yaitu:

- Tahap Identifikasi, seluruh artikel yang diperoleh dari *Scopus* dan *Web of Science* dikumpulkan dan dilakukan penghapusan artikel duplikat.
- Tahap Penyaringan (*Screening*), artikel diseleksi berdasarkan judul dan abstrak untuk mengetahui kesesuaian dengan tujuan penelitian.
- Tahap Kelayakan (*Eligibility*), artikel yang lolos tahap penyaringan dibaca secara menyeluruh (*full text review*) untuk memastikan kesesuaian dengan kriteria inklusi.

Berdasarkan hasil sintesis literatur, disusun model konseptual yang menggambarkan hubungan antarvariabel penelitian. Variabel independen terdiri atas:

- Risiko konstruksi (X1)
- Risiko finansial (X2)
- Risiko permintaan lalu lintas (X3)
- Risiko regulasi (X4)

Keempat variabel tersebut diasumsikan memengaruhi keputusan investasi (Y) dan sistem informasi analisis risiko (M) ditempatkan sebagai variabel mediasi yang berfungsi mengintegrasikan proses identifikasi, penilaian, visualisasi, dan pelaporan risiko sehingga mampu meningkatkan kualitas keputusan investasi pada proyek jalan tol KPBU.

3. RESULT AND ANALYSIS

Pencarian literatur dilakukan menggunakan basis data *Scopus* dan *Web of Science (WoS)* dengan rentang publikasi tahun 2015–2025. Proses pencarian menggunakan kombinasi kata kunci yang berkaitan dengan *toll road*, *public-private partnership (PPP/KPBU)*, *investment risk*, *risk assessment*, *risk management*, *information system*, dan *decision support system*. Seluruh artikel yang diperoleh kemudian diseleksi mengikuti pedoman PRISMA 2020 melalui tahapan identifikasi, penyaringan (*screening*), kelayakan (*eligibility*), dan inklusi.

Artikel dipilih berdasarkan kriteria inklusi, yaitu: (1) artikel jurnal internasional yang telah melalui proses *peer-review*; (2) dipublikasikan pada periode 2015–2025; (3) ditulis dalam bahasa Inggris; (4) membahas risiko investasi pada proyek jalan tol dengan skema *Public-Private Partnership* (PPP/KPBU); (5) mengidentifikasi, menganalisis, atau mengevaluasi indikator risiko investasi, metode penilaian risiko, maupun sistem pendukung keputusan investasi; serta (6) tersedia dalam bentuk *full-text*. Sebaliknya, kriteria eksklusi meliputi: (1) prosiding, buku, bab buku, tesis, disertasi, editorial, dan artikel tinjauan non-sistematis; (2) artikel duplikat; (3) penelitian yang tidak berkaitan dengan proyek jalan tol atau PPP/KPBU; (4) artikel yang hanya membahas aspek teknis konstruksi tanpa analisis risiko investasi; serta (5) artikel yang tidak menyediakan informasi metodologi atau hasil penelitian secara memadai.

Proses seleksi menghasilkan 286 artikel pada tahap identifikasi, terdiri atas 198 artikel dari Scopus dan 88 artikel dari *Web of Science*. Setelah menghapus 42 artikel duplikat, diperoleh 244 artikel untuk tahap penyaringan berdasarkan judul dan abstrak. Tahap ini mengeluarkan 163 artikel karena tidak sesuai dengan topik penelitian, sehingga tersisa 81 artikel untuk ditinjau secara penuh (*full-text review*). Berdasarkan evaluasi terhadap kriteria inklusi dan eksklusi, 36 artikel dieliminasi karena tidak membahas indikator risiko investasi, tidak berfokus pada proyek jalan tol dengan skema KPBU, atau tidak menyajikan metode analisis yang memadai. Dengan demikian, sebanyak 45 artikel memenuhi seluruh kriteria dan digunakan sebagai dasar sintesis literatur.

Temuan ini menunjukkan bahwa penelitian mengenai risiko investasi proyek KPBU mengalami peningkatan yang signifikan dalam lima tahun terakhir. Namun demikian, sebagian besar penelitian masih berfokus pada analisis risiko secara parsial, seperti risiko finansial, risiko konstruksi, atau risiko permintaan secara terpisah. Penelitian yang mengintegrasikan berbagai kelompok risiko investasi dengan sistem informasi atau Decision Support System (DSS) sebagai pendukung pengambilan keputusan investasi masih relatif terbatas.

Hasil sintesis literatur selanjutnya menunjukkan bahwa indikator risiko investasi pada proyek jalan tol KPBU dapat dikelompokkan menjadi empat variabel utama, yaitu risiko konstruksi, risiko finansial, risiko permintaan (*traffic demand risk*), dan risiko regulasi. Keempat kelompok risiko tersebut merupakan faktor dominan yang memengaruhi kelayakan investasi, tingkat pengembalian (*return on investment*), serta keberhasilan implementasi proyek KPBU, sehingga perlu diintegrasikan ke dalam suatu *Decision Support System* yang mampu mendukung proses evaluasi dan pengambilan keputusan investasi secara lebih komprehensif.

Analisis terhadap 45 artikel yang terdapat dalam Tabel 1 menunjukkan bahwa publikasi didominasi oleh penelitian dari Tiongkok, Inggris, Australia, Amerika Serikat, India, Malaysia, dan Indonesia. Sebagian besar penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif dengan metode *Analytical Hierarchy Process* (AHP), *Fuzzy AHP*, *Analytic Network Process* (ANP), *Structural Equation Modeling* (SEM), *Bayesian Network*, *Monte Carlo Simulation*, dan *Machine Learning* untuk menganalisis risiko investasi proyek infrastruktur. Berdasarkan objek penelitian, sekitar 62% artikel membahas proyek jalan tol dan jalan raya, 18% proyek kereta api, 11% pelabuhan, dan 9% sektor infrastruktur lainnya. Hal ini menunjukkan bahwa proyek jalan tol masih menjadi objek penelitian utama karena memiliki tingkat investasi dan kompleksitas risiko yang tinggi. Hasil sintesis literatur menunjukkan bahwa indikator risiko investasi dapat dikelompokkan menjadi empat variabel utama, yaitu risiko konstruksi, risiko finansial, risiko permintaan (*traffic demand risk*), dan risiko regulasi.

Tabel 1. Tabulasi 45 artikel

No	Penulis	Negara	Objek	Fokus risiko
1	Chung et al. (2015), Modelling Risk Perceptions of Stakeholders in Public-Private Partnership Toll Roads	Australia	Jalan tol PPP	Konstruksi, finansial, permintaan, kontrak
2	Carbonara et al. (2015), Risk Management in Motorway PPP Projects: Empirical-Based Guidelines	Erropa	Jalan tol/motorway	Permintaan, pendapatan, finansial, regulasi
3	Roumboutsos and Pantelias (2015), Allocating Revenue Risk in Transport Infrastructure PPP Schemes	Erropa	Infrastruktur transportasi	Permintaan dan pendapatan
4	Osei-Kyei and Chan (2015), Review of Studies on the Critical Success Factors for PPP Infrastructure Projects	Internasio nal	Infrastruktur PPP	Alokasi risiko, dukungan pemerintah, finansial
5	Xu et al. (2015), Evolution and Assessment of Economic Regulatory Policies for Expressway Infrastructure in China	Tiongkok	Jalan bebas hambatan	Regulasi, tarif, kebijakan pemerintah

6	Zhang et al. (2016), PPP Research in International and Chinese Construction Journals: A Comparative Review	Tiongkok/ internasional	Infrastruktur PPP	Risiko umum, kontrak, kelembagaan
7	Dong et al. (2016), Comparative Study of China and USA Public-Private Partnerships in Public Transportation	Tiongkok-AS	Transportasi publik	Regulasi, pembiayaan, tata kelola
8	Huang et al. (2016), A Simulation Study of the Impact of PPP Strategy on Transport Infrastructure Performance	Tiongkok	Jaringan jalan bebas hambatan	Kinerja, permintaan, investasi
10	Babatunde et al. (2017), Analysis of Traffic Revenue Risk Factors in BOT Road Projects in Developing Countries	Nigeria	Jalan BOT	Permintaan lalu lintas dan pendapatan
11	Ashuri et al. (2017), Sharing the Big Risk: Assessment Framework for Revenue Risk Sharing Mechanisms in Transportation PPP Projects	Amerika Serikat	Jalan tol/transportasi	Permintaan, pendapatan, jaminan pemerintah
12	Alasad and Motawa (2017), Role of Financial Risks in BOT Mega Transportation Projects	Timur Tengah/ internasional	Proyek transportasi besar	Suku bunga, nilai tukar, pendapatan
13	Roukouni et al. (2018), Financing Urban Transportation Infrastructure in a Multi-Actor Environment	Eropa	Transportasi perkotaan	Finansial, kelembagaan, penerimaan publik
14	Yu et al. (2018), Critical Risk Factors in Transnational Public-Private Partnership Projects: A Systematic Review	Internasional	Infrastruktur lintas negara	Politik, regulasi, nilai tukar, finansial
15	Cui et al. (2018), Review of Studies on the Public-Private Partnerships for Infrastructure Projects	Internasional	Infrastruktur PPP	Risiko, pembiayaan, kontrak, kinerja
16	Bao et al. (2018), Review of PPP Research from the Perspective of the Project Life Cycle	Tiongkok/ internasional	Infrastruktur PPP	Risiko siklus hidup proyek
17	Shrestha et al. (2018), Risk Allocation in U.S. Public-Private Partnership Highway Projects	Amerika Serikat	Jalan raya PPP	Konstruksi, operasi, finansial, regulasi
18	Carbonara et al. (2018), System Dynamics Model to Determine Concession Period in PPP Infrastructure Projects	Internasional	Infrastruktur transportasi	Permintaan, tarif, pendapatan, masa konsesi
19	Ahmadabadi and Heravi (2019), The Effect of Critical Success Factors on Project Success in PPP Projects: A Case Study of Highway Projects in Iran	Iran	Jalan raya PPP	Manajemen risiko, finansial, kelembagaan
20	Raicu et al. (2019), Including Negative Externalities during Transport Infrastructure Construction in Financing Decisions	Eropa	Infrastruktur transportasi	Finansial, sosial, konstruksi
21	Bolaños et al. (2019), Bankruptcy Policy and Surface Transportation Public-Private Partnerships	Amerika Serikat	Jalan/transportasi darat	Permintaan, utang, finansial
22	Wang et al. (2020), Exploring the Risk Factors of Infrastructure PPP Projects for Sustainable Delivery: A Social Network Perspective	Tiongkok	Infrastruktur PPP	Politik, finansial, konstruksi, operasi
23	Rouboutsos et al. (2020), Indicators for Sustainable Demand Risk Allocation in Transport PPP Projects	Eropa	Infrastruktur transportasi	Permintaan dan alokasi risiko
24	Zhang et al. (2020), Profit Allocation and Subsidy Mechanism for PPP Toll Road Projects	Tiongkok	Jalan tol PPP	Permintaan, pendapatan, subsidi pemerintah
25	Osei-Kyei et al. (2020), Implications of PPP Success and Failure in Toll Roads: Lessons from Emerging Markets	Negara berkembang	Jalan tol	Finansial, regulasi, permintaan, tata kelola
26	Ameyaw et al. (2020), Developing a Fuzzy Value-for-Money Analysis Model for PPP Infrastructure Projects	Negara berkembang	Infrastruktur PPP	Alokasi risiko dan kemampuan mitigasi
27	Santos et al. (2021), Evaluating the Performance of Highway Concessions through Public-Private Partnerships	Brasil	Konsesi jalan tol	Finansial, operasional, sosial, lingkungan
28	Jokar et al. (2021), Assessing and Prioritizing Risks in PPP Projects Using Fuzzy Multi-Criteria Decision-Making	Iran	Infrastruktur PPP	Politik, finansial, konstruksi, permintaan
29	Feng et al. (2021), A Fuzzy Analytic Hierarchy Process for Risk Evaluation of Urban Rail Transit PPP Projects	Tiongkok	Kereta perkotaan	Kereta perkotaan

30	Liu et al. (2021), Risk Assessment of Urban Rail Transit PPP Projects Based on Structural Equation Modeling	Tiongkok	Kereta perkotaan	Konstruksi, finansial, operasi, regulasi
31	Castillo et al. (2021), Bankrupt PPPs: Is It Really So Bad? Case Study of Spanish Toll Roads	Spanyol	Jalan tol	Permintaan, utang, kebangkrutan
32	Akcay et al. (2021), An Analytic Network Process-Based Risk Assessment Model for PPP Hydropower Investments	Turki	Pembangkit listrik tenaga air	Finansial, konstruksi, regulasi
33	Rasheed et al. (2022), Risk Identification, Assessment, and Allocation in PPP Projects: A Systematic Review	Internasio	Infrastruktur PPP	Identifikasi, penilaian, dan alokasi risiko
34	Jiang et al. (2022), Operational Risk Management of PPP Infrastructure Projects: A System Dynamics Approach	Tiongkok	Infrastruktur PPP	Operasi, permintaan, kerja sama pemerintah-swasta
35	Mazher et al. (2022), Identifying Measures of Effective Risk Management for PPP Infrastructure Projects	Pakistan	Infrastruktur PPP	Identifikasi, alokasi, komunikasi, monitoring
36	Solak and Kabadayi (2022), Toll Roads in Turkey: Private versus Public Provision	Turki	Jalan tol	Pendapatan, konstruksi, finansial, politik
37	Alghamdi et al. (2022), A Socio-Economic System Dynamics Approach for PPP Infrastructure Development	Arab Saudi	Infrastruktur PPP	Ekonomi, pembiayaan, dukungan pemerintah
38	Putri et al. (2023), Critical Risk Analysis of Toll Road PPP Project Construction Phase	Indonesia	Jalan Tol Trans-Sumatra	Konstruksi, lahan, pembiayaan, regulasi
39	Lu et al. (2023), Effects of Asymmetric Investment Cost Information on BOT Highway Contracts	Tiongkok	Jalan raya BOT	Biaya investasi, asimetri informasi, regulasi
40	Chen et al. (2023), Risk Evaluation of PPP Infrastructure Projects Using Evidence Reasoning and Fuzzy Cognitive Maps	Tiongkok	Infrastruktur lingkungan PPP	Investasi, konstruksi, operasi, eksternal
41	Gifford et al. (2024), What Triggers Public-Private Partnership Renegotiations? Evidence from U.S. Highway PPPs	Amerika Serikat	Jalan raya PPP	Permintaan, finansial, kontrak, regulasi
42	Castelblanco et al. (2024), Financial System Dynamics Model for Assessing PPP Infrastructure Projects	Kolombia	Infrastruktur transportasi	Pendapatan, utang, tarif, subsidi
43	Weng et al. (2024), Construction of a Risk Assessment Indicator System for Transportation Infrastructure PPP Investment Projects	Tiongkok	Infrastruktur transportasi	Finansial, konstruksi, pasar, regulasi
44	Samoilov et al. (2024), Cross-Country Comparison of Risk Factors in Public-Private Partnerships	Kolombia, Kazakhstan, Ghana	Infrastruktur PPP	Politik, ekonomi, hukum, finansial
45	Li et al. (2025), A Dynamic Risk Accumulation Modeling Approach for Highway PPP Investment Projects	Tiongkok	Jalan raya PPP	Investasi, konstruksi, permintaan, regulasi

Tabulasi 45 artikel pada Tabel 1 selanjutnya ditarik kesimpulan pada Tabel 2 untuk menghasilkan variabel independen dan sub variabelnya.

Tabel 2. Tabulasi variabel independen

Risiko konstruksi	Risiko Finansial	Risiko Permintaan Traffic Risk	Risiko Regulasi
- keterlambatan konstruksi[18], [19], [20] - pembengkakan biaya (<i>cost overrun</i>) [21], [22], [23] - produktivitas kontraktor [24], [25], [26] - kualitas pekerjaan [27], [28] - keterlambatan pembebasan lahan [29] - ketersediaan material [30][31] - risiko keselamatan kerja [32]	- inflasi [33], [34] - fluktuasi suku bunga[33], [34], [35] - nilai tukar [33] - kemampuan memperoleh pembiayaan[33], [34] - struktur modal[34], [36] - arus kas proyek [34], [35] - Return on Investment (ROI) [34] - Internal Rate of Return (IRR)[34], [35]	- volume lalu lintas harian; [37], [38] - pertumbuhan kendaraan[38] - ketepatan proyeksi lalu lintas [37] - perubahan pola perjalanan [37], [39] - perkembangan wilayah[37], [38] - tarif tol [37], [40]	- perubahan peraturan[41], [42], [43] - perubahan tarif[41], [42] - proses perizinan [42], [43] - kebijakan perpajakan[41] - kepastian hukum[41], [42], [44] - stabilitas politik[45] [41], [42]

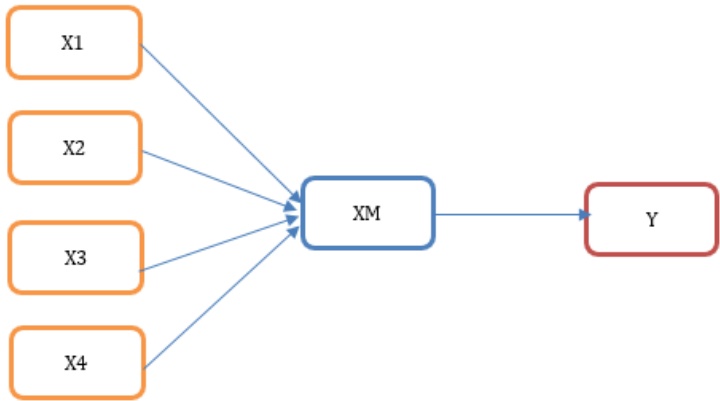
Keempat variabel risiko, yaitu risiko konstruksi, risiko finansial, risiko permintaan (*traffic demand risk*), dan risiko regulasi, diasumsikan memengaruhi keputusan investasi secara langsung maupun tidak langsung melalui Sistem Informasi Analisis Risiko (M) sebagai variabel mediasi. Secara teoritis, keberadaan sistem informasi memungkinkan proses identifikasi, pengumpulan, integrasi, analisis, visualisasi, dan pelaporan risiko dilakukan secara sistematis sehingga kualitas informasi yang diterima investor menjadi lebih baik.

Informasi risiko yang lebih lengkap, akurat, dan tepat waktu akan mengurangi asimetri informasi, meningkatkan transparansi, serta menurunkan ketidakpastian dalam proses evaluasi investasi. Hubungan kausal tersebut didukung oleh *Decision Support Theory*, yang menyatakan bahwa kualitas keputusan sangat dipengaruhi oleh kualitas informasi yang dihasilkan sistem pendukung keputusan. Dalam konteks proyek infrastruktur, sistem informasi analisis risiko berperan sebagai *decision support mechanism* yang mengintegrasikan berbagai sumber data risiko sehingga investor dapat mengevaluasi probabilitas, dampak, serta strategi mitigasi risiko secara lebih objektif[8].

Secara empiris, berbagai penelitian menunjukkan bahwa penggunaan sistem informasi dan *Decision Support System* mampu meningkatkan kualitas pengambilan keputusan investasi pada proyek infrastruktur. Datta et al. (2024) juga melaporkan bahwa integrasi *Artificial Intelligence* dan *Machine Learning* dalam sistem informasi proyek meningkatkan kemampuan prediksi, mendukung evaluasi berbagai alternatif keputusan, serta mempercepat proses pengambilan keputusan sepanjang siklus hidup proyek konstruksi[46]. Selain itu, Coffie et al. (2024) menunjukkan bahwa integrasi algoritma *Extreme Gradient Boosting (XGBoost)* dengan metode SHAP (*Shapley Additive Explanations*) mampu menghasilkan informasi yang lebih transparan mengenai faktor-faktor penyebab *cost overrun*[47].

Informasi tersebut meningkatkan interpretabilitas model sehingga memudahkan pengambil keputusan dalam menentukan strategi investasi dan mitigasi risiko. Temuan serupa dilaporkan oleh Chen et al. (2025) yang mengintegrasikan *Machine Learning*, analisis ketidakpastian, dan SHAP untuk menghasilkan prediksi biaya yang lebih reliabel dan dapat dijelaskan (*explainable*), sehingga meningkatkan kepercayaan pengguna terhadap hasil analisis.[40]

Dari paparan Tabel 2. diatas dapat digambarkan hubungan antara variabel independen (X1-X4), variabel mediasi (sistem informasi analisis risiko) dan variabel dependen (Y) keputusan investasi proyek KPBU dapat dilihat melalui gambar 2.



Gambar 2. Hubungan antar variabel

4. DISCUSSION

Hasil *Systematic Literature Review* (SLR) menunjukkan bahwa risiko investasi pada proyek jalan tol dengan skema Kerja Sama Pemerintah dan Badan Usaha (KPBU) merupakan fenomena multidimensional yang dipengaruhi oleh faktor teknis, finansial, permintaan, dan regulasi. Sintesis terhadap 45 artikel yang terindeks *Scopus* dan *Web of Science* menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian sebelumnya masih menganalisis risiko secara parsial sehingga belum menghasilkan suatu model yang mengintegrasikan seluruh kelompok risiko dalam satu kerangka analisis yang

komprehensif. Temuan ini sejalan dengan hasil Rybnicek et al. (2020) yang menyatakan bahwa penelitian mengenai risiko pada proyek PPP masih didominasi oleh identifikasi faktor risiko dan strategi mitigasi secara terpisah, sedangkan penelitian yang mengintegrasikan seluruh dimensi risiko dalam sistem pendukung keputusan masih sangat terbatas[41].

Risiko konstruksi

Hasil sintesis menunjukkan bahwa risiko konstruksi merupakan kelompok risiko yang paling banyak dibahas dalam literatur. Keterlambatan konstruksi (*construction delay*) menjadi indikator yang paling dominan karena secara langsung memengaruhi jadwal operasional jalan tol, biaya investasi, serta arus kas selama masa konsesi. Gunduz dan Yahya (2018) juga menemukan bahwa keterlambatan konstruksi merupakan determinan utama keberhasilan proyek infrastruktur[48].

Selain keterlambatan, pembengkakan biaya (*cost overrun*) menjadi risiko yang paling sering muncul pada proyek infrastruktur berskala besar. Temuan tersebut diperkuat oleh Love et al. (2015) (Love & Martínez Pería, 2015) yang menunjukkan bahwa perubahan desain, inflasi, serta rendahnya pengendalian proyek merupakan penyebab utama pembengkakan biaya pada proyek transportasi.

Produktivitas kontraktor juga menjadi indikator penting karena menentukan efisiensi penggunaan tenaga kerja, material, dan peralatan. Kazaz et al. (2016) menambahkan bahwa rendahnya produktivitas biasanya dipengaruhi oleh keterampilan pekerja, kondisi lapangan, serta efektivitas manajemen konstruksi[26].

Hasil sintesis menunjukkan bahwa kualitas pekerjaan, ketersediaan material, keterlambatan pembebasan lahan, dan keselamatan kerja merupakan indikator yang saling berkaitan. Love et al. (2016) menyatakan bahwa rendahnya kualitas pekerjaan akan meningkatkan *rework* yang berdampak pada kenaikan biaya proyek[27]. Shahhosseini et al. (2021) menunjukkan bahwa gangguan rantai pasok material menjadi salah satu penyebab utama keterlambatan proyek konstruksi modern[30], sedangkan Sousa et al. (2020) membuktikan bahwa penerapan sistem keselamatan kerja yang baik mampu meningkatkan produktivitas sekaligus mengurangi potensi keterlambatan proyek[32].

Kelompok risiko kedua yang paling banyak ditemukan adalah risiko finansial. Hasil sintesis menunjukkan bahwa inflasi, fluktuasi suku bunga, nilai tukar, kemampuan memperoleh pembiayaan, struktur modal, arus kas proyek, ROI, dan IRR merupakan indikator utama yang menentukan kelayakan investasi proyek jalan tol. Endo et al. (2021) menjelaskan bahwa keberhasilan mencapai *financial close* menjadi faktor kritis dalam implementasi proyek jalan tol KPBU karena menentukan keberlangsungan investasi sejak tahap awal proyek[33]. Fauzan et al. (2023) juga menunjukkan bahwa struktur pembiayaan, pengendalian arus kas, serta tingkat pengembalian investasi (ROI dan IRR) merupakan indikator yang paling dipertimbangkan oleh investor dalam mengevaluasi kelayakan investasi jalan tol[34].

Zhang et al. (2020)[36] membuktikan bahwa struktur modal yang optimal mampu meningkatkan ketahanan proyek terhadap ketidakpastian pendapatan. García et al. (2024) menunjukkan bahwa kemampuan proyek menghasilkan arus kas yang stabil merupakan faktor utama dalam menjaga keberlanjutan pembayaran utang dan profitabilitas proyek selama masa konsesi[35]. Temuan penelitian menunjukkan bahwa risiko permintaan merupakan karakteristik khusus yang membedakan investasi jalan tol dari proyek konstruksi lainnya. Berbeda dengan proyek gedung, keberhasilan investasi jalan tol sangat bergantung pada ketepatan proyeksi volume lalu lintas yang akan menentukan besarnya pendapatan selama masa konsesi.

Li et al. (2018)[37] menjelaskan bahwa volume lalu lintas harian dan ketepatan proyeksi lalu lintas merupakan indikator utama dalam analisis risiko investasi jalan tol berbasis PPP. Kesalahan dalam memprediksi permintaan akan menyebabkan ketidaksesuaian antara pendapatan aktual dan proyeksi finansial sehingga meningkatkan risiko gagal bayar maupun renegotiasi kontrak.

Alasad dan Motawa (2016)[38] menunjukkan bahwa pertumbuhan kendaraan, perkembangan wilayah, dan dinamika ekonomi regional merupakan faktor yang secara signifikan memengaruhi permintaan lalu lintas. Selain itu, perubahan pola perjalanan akibat berkembangnya jaringan transportasi maupun perubahan preferensi pengguna juga menjadi faktor yang perlu dipertimbangkan dalam evaluasi investasi[39]. Tarif tol turut memengaruhi tingkat penggunaan jalan tol karena berkaitan dengan *willingness to pay* pengguna jalan serta daya saing terhadap jalan alternatif.

Hasil sintesis menunjukkan bahwa risiko regulasi merupakan faktor eksternal yang memiliki pengaruh signifikan terhadap keputusan investasi. Perubahan kebijakan pemerintah, perubahan tarif, proses perizinan, kebijakan perpajakan, kepastian hukum, dan stabilitas politik menjadi indikator yang paling sering muncul dalam literatur. Rybnicek et al. (2020)[41] menjelaskan bahwa perubahan

regulasi merupakan salah satu penyebab utama meningkatnya ketidakpastian investasi pada proyek PPP karena dapat mengubah struktur pembiayaan maupun proyeksi keuntungan investor. Polat et al. (2022) juga menemukan bahwa keterlambatan proses perizinan dan perubahan kebijakan pemerintah merupakan faktor yang paling sering menyebabkan keterlambatan implementasi proyek infrastruktur[42]. Tan (2020)[44] menegaskan bahwa kepastian hukum merupakan faktor fundamental dalam meningkatkan kepercayaan investor, khususnya pada proyek dengan masa konsesi yang panjang seperti jalan tol. Stabilitas politik juga berperan penting dalam menjaga konsistensi kebijakan pemerintah sehingga risiko investasi dapat ditekan [51].

Temuan yang paling penting dari penelitian ini adalah bahwa sebagian besar penelitian terdahulu masih menggunakan pendekatan konvensional dalam analisis risiko, seperti matriks risiko, AHP, ANP, Fuzzy AHP, maupun simulasi Monte Carlo. Pendekatan tersebut umumnya berhenti pada tahap identifikasi atau pemeringkatan risiko dan belum mampu mengintegrasikan seluruh informasi risiko ke dalam sistem yang mendukung pengambilan keputusan investasi secara dinamis.

Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan Sistem Informasi Analisis Risiko sebagai variabel mediasi yang menghubungkan risiko konstruksi, risiko finansial, risiko permintaan, dan risiko regulasi terhadap keputusan investasi. Sistem informasi tersebut dirancang untuk mengintegrasikan data risiko dari berbagai sumber, melakukan penilaian tingkat risiko secara otomatis, menyajikan visualisasi risiko melalui *dashboard*, serta menghasilkan rekomendasi mitigasi sebagai dasar Decision Support System (DSS). Pendekatan ini memperluas penelitian Marzouk dan Abdel Aty (2021) mengenai DSS dalam manajemen konstruksi dengan mengadaptasinya secara khusus pada analisis risiko investasi proyek jalan tol KPBU[8].

Dengan demikian, novelty penelitian ini tidak hanya terletak pada identifikasi indikator risiko berdasarkan *Systematic Literature Review* (PRISMA 2020), tetapi juga pada pengembangan model konseptual yang mengintegrasikan empat kelompok risiko utama dengan sistem informasi sebagai variabel mediasi menuju keputusan investasi. Model ini diharapkan menjadi dasar ilmiah bagi tahap penelitian berikutnya, yaitu validasi indikator melalui Delphi, pengujian hubungan antarvariabel menggunakan SEM-PLS, serta implementasi model dalam bentuk *Decision Support System* (DSS) berbasis web untuk mendukung pengambilan keputusan investasi proyek jalan tol KPBU secara lebih objektif, transparan, dan berbasis data.

5. CONCLUSION

Penelitian ini menggunakan pendekatan *Systematic Literature Review* (SLR) dengan pedoman PRISMA 2020 untuk mengidentifikasi dan mensintesis variabel serta indikator risiko investasi pada proyek jalan tol dengan skema Kerja Sama Pemerintah dan Badan Usaha (KPBU). Berdasarkan sintesis terhadap 45 artikel yang terindeks *Scopus* dan *Web of Science* periode 2015–2025, diperoleh empat kelompok risiko utama yang secara konsisten memengaruhi keputusan investasi, yaitu risiko konstruksi, risiko finansial, risiko permintaan (*traffic demand risk*), dan risiko regulasi.

Risiko konstruksi mencakup indikator keterlambatan konstruksi, pembengkakan biaya, produktivitas kontraktor, kualitas pekerjaan, keterlambatan pembebasan lahan, ketersediaan material, dan keselamatan kerja. Risiko finansial meliputi inflasi, fluktuasi suku bunga, nilai tukar, kemampuan memperoleh pembiayaan, struktur modal, arus kas proyek, *Return on Investment* (ROI), dan *Internal Rate of Return* (IRR). Sementara itu, risiko permintaan terdiri atas volume lalu lintas harian, pertumbuhan kendaraan, ketepatan proyeksi lalu lintas, perubahan pola perjalanan, perkembangan wilayah, dan tarif tol. Adapun risiko regulasi meliputi perubahan peraturan, perubahan tarif, proses perizinan, kebijakan perpajakan, kepastian hukum, dan stabilitas politik. Keempat kelompok risiko tersebut menunjukkan bahwa investasi proyek jalan tol KPBU dipengaruhi oleh faktor internal maupun eksternal yang saling berinteraksi sepanjang siklus hidup proyek.

Hasil kajian juga menunjukkan bahwa sebagian besar penelitian terdahulu masih berfokus pada identifikasi atau pemeringkatan risiko secara parsial dan belum mengintegrasikan berbagai kelompok risiko ke dalam suatu kerangka analisis yang komprehensif. Selain itu, pemanfaatan sistem informasi sebagai media integrasi analisis risiko untuk mendukung keputusan investasi masih relatif terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini mengusulkan Sistem Informasi Analisis Risiko sebagai variabel mediasi

yang menghubungkan risiko konstruksi, risiko finansial, risiko permintaan, dan risiko regulasi terhadap keputusan investasi. Pendekatan ini diharapkan mampu meningkatkan kualitas proses identifikasi, evaluasi, visualisasi, dan mitigasi risiko sehingga pengambilan keputusan investasi menjadi lebih objektif, transparan, adaptif, dan berbasis data.

Kontribusi utama penelitian ini adalah menghasilkan model konseptual analisis risiko investasi proyek jalan tol KPBU berbasis sistem informasi yang disusun berdasarkan sintesis literatur ilmiah bereputasi. Model tersebut menjadi dasar ilmiah untuk penyusunan instrumen penelitian, validasi indikator menggunakan metode Delphi, pengujian hubungan antarvariabel melalui *Structural Equation Modeling–Partial Least Squares (SEM-PLS)*, serta pengembangan *Decision Support System (DSS)* berbasis web. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi teoritis dalam pengembangan manajemen risiko investasi infrastruktur serta kontribusi praktis bagi pemerintah, Badan Usaha Jalan Tol (BUJT), investor, lembaga pembiayaan, dan pengambil kebijakan dalam meningkatkan kualitas keputusan investasi pada proyek jalan tol KPBU.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk melakukan validasi empiris terhadap model konseptual yang dihasilkan melalui *Delphi*, *SEM-PLS*, dan implementasi *Decision Support System (DSS)* pada proyek jalan tol KPBU di Indonesia. Selain itu, penelitian mendatang dapat mengintegrasikan teknologi *Artificial Intelligence (AI)* dan *Machine Learning* untuk mengembangkan model prediksi risiko investasi secara *real-time*, sehingga sistem yang dikembangkan tidak hanya berfungsi sebagai alat evaluasi, tetapi juga sebagai sistem prediktif yang mampu mendukung pengambilan keputusan investasi secara lebih akurat dan adaptif terhadap perubahan kondisi ekonomi, regulasi, dan permintaan lalu lintas.

ACKNOWLEDGEMENTS

Terimakasih kepada Universitas Tarumanagara atas dukungan yang diberikan sehingga penelitian ini dapat berjalan dengan lancar dan menghasilkan riset yang baik dan bermanfaat pada keilmuan di Indonesia khususnya bagi pengembangan risiko untuk proyek KPBU jalan tol dalam proyek konstruksi.

REFERENCES

- [1] World Bank, "Infrastructure for development," *Washington, DC: World Bank Group.*, 2024.
- [2] M. Hellowell and V. Vecchi, "Assessing the cost of capital for PPP contracts," in *Public-Private Partnerships in Health: Improving Infrastructure and Technology*, Springer International Publishing, 2018, pp. 85–109. doi: 10.1007/978-3-319-69563-1_5.
- [3] Y. D. Suwandairi, A. Suratkon, M. Amin, O. T. Tsarwan, and H. J. Wahyu, "Risk analysis of PPP financing for toll road project," in *BIO Web of Conferences*, EDP Sciences, Feb. 2025. doi: 10.1051/bioconf/202515902009.
- [4] L. Shi, W. Li, and Y. He, "An Incentive Analysis of Availability Payment Mechanism in PPP Projects," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 106046–106058, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2999932.
- [5] P. X. W. Zou, S. Wang, and D. Fang, "A life-cycle risk management framework for PPP infrastructure projects," *Journal of Financial Management of Property and Construction*, vol. 13, no. 2, pp. 123–142, Aug. 2008, doi: 10.1108/13664380810898131.
- [6] World Bank, "The World Bank Annual Report 2022: Helping Countries Adapt to a Changing World," Washington, DC, 2022. Accessed: Sep. 08, 2025. [Online]. Available: <https://openknowledge.worldbank.org/handle/10986/38050>
- [7] Michael Hallsworth, "Policy-Making in the Real World," *Political Insight*, vol. 1, no. 1, pp. 10–13, 2011.
- [8] N. Elshaboury and M. Marzouk, "Optimizing construction and demolition waste transportation for sustainable construction projects," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 28, no. 9, pp. 2411–2425, Nov. 2021, doi: 10.1108/ECAM-08-2020-0636.
- [9] M. P. Abednego and S. O. Ogunlana, "Good project governance for proper risk allocation in public-private partnerships in Indonesia," *International Journal of Project Management*, vol. 24, no. 7, pp. 622–634, Oct. 2006, doi: 10.1016/j.ijproman.2006.07.010.
- [10] M. Nahdi, N. Widayati, M. A. Wibowo, E. M. Sari, R. Z. Tamin, and A. Thohirin, "Examining Solicited Projects of Public–Private Partnerships (PPP) in the Initiative of Indonesian Government," *Buildings*, vol. 14, no. 6, Jun. 2024, doi: 10.3390/buildings14061870.
- [11] M. Nahdi, N. Widayati, M. A. Wibowo, E. M. Sari, R. Z. Tamin, and N. Najid, "Schematic risk management in solicited and unsolicited project," *Journal of Infrastructure, Policy and Development*, vol. 8, no. 9, p. 5472, Sep. 2024, doi: 10.24294/jipd.v8i9.5472.

- [12] T. J. Gordon and I. History, "THE DELPHI METHOD," 1994. doi: <https://doi.org/10.1177/0002716292522001003>.
- [13] S. Humphrey-Murto, T. J. Wood, C. Gonsalves, K. Mascioli, and L. Varpio, "The Delphi Method," 2020, *Lippincott Williams and Wilkins*. doi: [10.1097/ACM.0000000000002887](https://doi.org/10.1097/ACM.0000000000002887).
- [14] S. Thangaratinam and C. W. Redman, "The Delphi technique," *The Obstetrician & Gynaecologist*, vol. 7, no. 2, pp. 120–125, Apr. 2005, doi: [10.1576/toag.7.2.120.27071](https://doi.org/10.1576/toag.7.2.120.27071).
- [15] bo Xia and A. P. c. Chan, "Measuring complexity for building projects: A Delphi study," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 19, no. 1, pp. 7–24, Jan. 2012, doi: [10.1108/09699981211192544](https://doi.org/10.1108/09699981211192544).
- [16] K. A. Alomari, J. A. Gambatese, and N. Tymvios, "Risk Perception Comparison among Construction Safety Professionals: Delphi Perspective," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 144, no. 12, Dec. 2018, doi: [10.1061/\(asce\)co.1943-7862.0001565](https://doi.org/10.1061/(asce)co.1943-7862.0001565).
- [17] M. J. , M. J. E. , B. P. M. , B. I. , H. T. C. , M. C. D. , S. L. , T. J. M. , A. E. A. , B. S. E. , C. R. , G. J. , G. J. M. , H. A. , L. M. M. , L. T. Page, "The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews," *BMJ*, 372, n71, pp. 1–72, 2021.
- [18] S. Sutikno, A. Purna Irawan, E. Murtiana Sari, and O. Fuk Jin, "A Risk-Based Model for Infrastructure Quality Evaluation in Decentralized Road Projects: Evidence from Indonesia," 2026, doi: [10.3390/buildings16132549](https://doi.org/10.3390/buildings16132549).
- [19] E. M. Sari *et al.*, "A Risk Matrix Assessment for the Determination of Future Project Delivery Systems in Road Infrastructure Projects in Indonesia," *Engineering, Technology and Applied Science Research*, vol. 16, no. 2, pp. 33492–33501, 2026, doi: [10.48084/etasr.16143](https://doi.org/10.48084/etasr.16143).
- [20] S. F. M. Alazawy, M. A. Ahmed, S. H. Raheem, H. Imran, L. F. A. Bernardo, and H. A. S. Pinto, "Explainable Machine Learning to Predict the Construction Cost of Power Plant Based on Random Forest and Shapley Method," *CivilEng*, vol. 6, no. 2, Jun. 2025, doi: [10.3390/civileng6020021](https://doi.org/10.3390/civileng6020021).
- [21] E. M. Sari *et al.*, "Challenge and Awareness for Implemented Integrated Project Delivery (IPD) in Indonesian Projects," *Buildings*, vol. 13, no. 1, 2023, doi: [10.3390/buildings13010262](https://doi.org/10.3390/buildings13010262).
- [22] A. Bigwanto, N. Widayati, M. A. Wibowo, and E. M. Sari, "Lean Construction: A Sustainability Operation for Government Projects," *Sustainability*, vol. 16, no. 8, p. 3386, Apr. 2024, doi: [10.3390/su16083386](https://doi.org/10.3390/su16083386).
- [23] A. Bigwanto, N. Widayati, M. A. Wibowo, and E. M. Sari, "Key Performance Indicators (KPI) to Measure Effectiveness of Lean Construction in Indonesian Project," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 16, no. 15, Aug. 2024, doi: [10.3390/su16156461](https://doi.org/10.3390/su16156461).
- [24] B. G. , S. M. , & S. N. N. Hwang, "Construction safety and compliance management," *J. Constr. Eng. Manag.*, 2022.
- [25] B. gang Hwang, M. Shan, and N. N. B. Supa'at, "Green commercial building projects in Singapore: Critical risk factors and mitigation measures," *Sustain. Cities Soc.*, vol. 30, pp. 237–247, Apr. 2017, doi: [10.1016/j.scs.2017.01.020](https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.01.020).
- [26] S. U. and T. A. A. Kazaz, "Factors Affecting Labor Productivity: Perspectives of Craft Workers," *Procedia Eng.*, vol. 164, pp. 28–34, 2016.
- [27] J. S. X. W. Z. I. and W. T. P. E. D. Love, "Overruns in Transportation Infrastructure Projects," *Transp. Rev.*, vol. 35, no. 4, pp. 471–495, 2015.
- [28] PMI, "A Guide to the Project Management Body of Knowledge (PMBOK® Guide)–Seventh Edition and The Standard for Project Management," in *Project Management Institute*, Project Management Institute, 2021.
- [29] A. Aswanto and A. Wibowo, "Eksplorasi Interdependensi Faktor - Faktor Risiko pada Proyek KPBU Jalan Tol menggunakan Interpretive Structural Modeling," *Jurnal Teknik Sipil*, vol. 29, no. 3, Dec. 2022, doi: [10.5614/jts.2022.29.3.11](https://doi.org/10.5614/jts.2022.29.3.11).
- [30] M. R. H. and T. Z. V. Shahhosseini, "Applications of Machine Learning in Construction Cost Estimation: A Systematic Review," *Engineering, Construction and Architectural Management*, vol. 28, no. 10, pp. 2873–2902, 2021.
- [31] H. Kim and C. Kim, "Deep-learning-based classification of point clouds for bridge inspection," *Remote Sens. (Basel)*, vol. 12, no. 22, pp. 1–13, Nov. 2020, doi: [10.3390/rs12223757](https://doi.org/10.3390/rs12223757).
- [32] N. M. A. and L. A. D. V. Sousa, "Risk-Based Management of Occupational Safety in Construction," *Saf. Sci.*, vol. 129, 2020.
- [33] A. G. and J. E. K. Endo, "Coming to Financial Close in Public–Private Partnerships: Identifying Critical Factors in the Case of Toll Road Projects in Indonesia," *Public Works Management & Policy*, vol. 26, no. 2, pp. 115–143, 2021.
- [34] H. K. and C. U. M. Fauzan, "Implementing Toll Road Infrastructure Financing in Indonesia: Critical Success Factors from the Perspective of Toll Road Companies," *Economies*, vol. 11, no. 4, 2023.

- [35] A. García, "Spread Valuation and Risk on Transport Infrastructure Loans," *Economics of Transportation*, vol. 38, 2024.
- [36] X. Zhang, "Monte-Carlo Optimization Model for Dynamic Capital Structure Adjustment in Public–Private Partnerships under Revenue Uncertainty," *Transp. Res. Part A Policy Pract.*, vol. 142, pp. 115–128, 2020.
- [37] J. Li et al, "Traffic Allocation Mode of PPP Highway Project: A Risk Management Approach," *Advances in Civil Engineering*, 2018.
- [38] R. Alasad and I. Motawa, "Dynamic Demand Risk Assessment for Toll Road Projects," *Construction Management and Economics*, vol. 34, no. 3, pp. 172–188, 2016.
- [39] C. Wang et al, "Expressway Usage Pattern Analysis Based on Tollgate Data: A Case Study of Shandong Province, China," *J. Adv. Transp.*, 2023.
- [40] F. Xiao, X. Chen, S. Yang, and J. Cheng, "Bi-objective pavement maintenance and rehabilitation optimization decision-making model incorporating the construction length of preventive maintenance projects," *Structure and Infrastructure Engineering*, vol. 21, no. 1, pp. 24–38, 2025.
- [41] J. P. and L. B. R. Rybníček, "Risks in Public–Private Partnerships: A Systematic Literature Review of Risk Factors, Their Impact and Risk Mitigation Strategies," *Public Performance & Management Review*, vol. 45, no. 2, pp. 1174–1208, 2020.
- [42] A. D. and T. A. G. Polat, "Political and Legal Risks in PPP Mega Transportation Projects.," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Municipal Engineer*, vol. 175, no. 2, pp. 95–106, 2022.
- [43] C. , & N. V. L. Parker, "Compliance: 14 Questions. Regulation & Governance.," 2017.
- [44] Y. L. Tan, "Global PPPs and the Choice of Law Challenge.," *The Chinese Journal of Comparative Law*, vol. 8, pp. 79–115, 2020, doi: DOI:10.1093/cjcl/cxaa011.
- [45] R. Wang, V. Asghari, C. M. Cheung, S.-C. Hsu, and C.-J. Lee, "Assessing effects of economic factors on construction cost estimation using deep neural networks," *Autom. Constr.*, vol. 134, p. 104080, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.104080>.
- [46] S. D. Datta, "Artificial Intelligence and Machine Learning Applications in the Project Lifecycle of the Construction Industry: A Comprehensive Review," *Artificial Intelligence and Machine Learning Applications in the Project Lifecycle of the Construction Industry: A Comprehensive Review*, vol. 10, 2024.
- [47] G. Coffie and S. Cudjoe, "International Journal of Construction Management ISSN: (Print) (Using extreme gradient boosting (XGBoost) machine learning to predict construction cost overruns Using extreme gradient boosting (XGBoost) machine learning to predict construction cost overruns," Jul. 2023. doi: 10.1080/15623599.2023.2289754.
- [48] M. Gunduz and H. A. Elsherbeny, "Operational Framework for Managing Construction-Contract Administration Practitioners' Perspective through Modified Delphi Method," *J. Constr. Eng. Manag.*, vol. 146, no. 3, Mar. 2020, doi: 10.1061/(asce)co.1943-7862.0001768.
- [49] I. Love and M. S. Martínez pería, "How bank competition affects firms' access to finance," *World Bank Economic Review*, vol. 29, no. 3, pp. 413–448, 2015, doi: 10.1093/wber/lhu003.
- [50] C. C. Cantarelli, B. Van Wee, E. J. E. Molin, and B. Flyvbjerg, "Different cost performance: Different determinants?. The case of cost overruns in Dutch transport infrastructure projects.," *Transp. Policy (Oxf.)*, vol. 22, pp. 88–95, Jul. 2012, doi: 10.1016/j.tranpol.2012.04.002.
- [51] Y. Wang, Y. Yang, C. Fu, Z. Fan, and X. Zhou, "Environmental regulation, environmental responsibility, and green technology innovation: Empirical research from China," *PLoS One*, vol. 16, no. 9 September, Sep. 2021, doi: 10.1371/journal.pone.0257670.