



## MANAJEMEN RISIKO UNTUK KEBERLANJUTAN INFRASTRUKTUR PUBLIK MELALUI BIM DAN TEKNOLOGI INDUSTRI 4.0

### RISK MANAGEMENT FOR SUSTAINABLE PUBLIC INFRASTRUCTURE USING BIM AND INDUSTRY 4.0

Bagus Sagita Gilang Perdana<sup>1</sup>, Tri Joko Wahyu Adi<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS), Kampus ITS Sukolilo, Jl. Raya ITS, Sukolilo, Surabaya 60111, Indonesia

Email: [bagus.sagita@hutamakarya.com](mailto:bagus.sagita@hutamakarya.com)

Received: 20 Januari 2026 Revised: 13 Februari 2026 Accepted: 25 Februari 2026 Published: 26 Februari 2026

#### ABSTRAK

*Transformasi digital melalui penerapan Building Information Modeling (BIM) dan teknologi Industri 4.0 semakin dipandang sebagai strategi penting untuk meningkatkan pengelolaan risiko dan kinerja keberlanjutan proyek konstruksi. Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh pemanfaatan BIM dan adopsi teknologi Industri 4.0 terhadap kinerja keberlanjutan proyek dengan pengurangan risiko konstruksi sebagai variabel mediasi. Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif melalui survei terhadap 120 profesional yang terlibat dalam proyek infrastruktur publik yang dilaksanakan oleh kontraktor BUMN di Indonesia. Data dianalisis menggunakan Partial Least Squares–Structural Equation Modeling (PLS-SEM). Hasil menunjukkan bahwa BIM ( $\beta = 0,341$ ;  $p = 0,006$ ) dan teknologi Industri 4.0 ( $\beta = 0,512$ ;  $p < 0,001$ ) berpengaruh positif dan signifikan terhadap pengurangan risiko konstruksi ( $R^2 = 0,730$ ). Pengurangan risiko juga berpengaruh kuat terhadap kinerja keberlanjutan proyek ( $\beta = 0,818$ ;  $p < 0,001$ ;  $R^2 = 0,626$ ). Efek tidak langsung BIM dan teknologi Industri 4.0 terhadap keberlanjutan melalui pengurangan risiko terbukti lebih dominan dibandingkan efek langsungnya. Temuan ini menegaskan bahwa pengurangan risiko merupakan jalur utama yang menghubungkan transformasi digital dengan keberlanjutan proyek infrastruktur publik.*

**Kata kunci:** *Building Information Modeling, Industri 4.0, Infrastruktur Publik, Kinerja Keberlanjutan, Pengurangan Risiko Konstruksi, PLS-SEM.*

#### ABSTRACT

*Digital transformation through the adoption of Building Information Modeling (BIM) and Industry 4.0 technologies is increasingly recognized as a strategic approach to improving risk management and sustainability performance in construction projects. This study aims to examine the effects of BIM utilization and Industry 4.0 technology adoption on project sustainability performance, with construction risk reduction serving as a mediating variable. A quantitative survey was conducted involving 120 professionals engaged in public infrastructure projects delivered by state-owned contractors in Indonesia. The data were analyzed using Partial Least Squares–Structural Equation Modeling (PLS-SEM). The results indicate that BIM ( $\beta = 0.341$ ;  $p = 0.006$ ) and Industry 4.0 technologies ( $\beta = 0.512$ ;  $p < 0.001$ ) have significant positive effects on construction risk reduction, jointly explaining 73.0% of its variance ( $R^2 = 0.730$ ). Furthermore, risk reduction strongly influences project sustainability performance ( $\beta = 0.818$ ;  $p < 0.001$ ;  $R^2 = 0.626$ ). Mediation analysis reveals that the indirect effects of BIM and Industry 4.0 technologies on sustainability through risk reduction are stronger than their direct effects. These findings confirm that risk reduction constitutes a critical pathway linking digital transformation to sustainable public infrastructure development.*

**Keywords:** *Building Information Modeling, Construction Risk Reduction, Industry 4.0, PLS-SEM, Public Infrastructure, Sustainability Performance.*

## **PENDAHULUAN**

Pembangunan infrastruktur publik memegang peranan strategis dalam agenda pertumbuhan nasional Indonesia melalui peningkatan konektivitas wilayah, penurunan biaya logistik, serta penguatan daya saing ekonomi jangka panjang. Oleh karena itu, proyek infrastruktur berskala besar seperti jalan tol, jembatan, dan koridor transportasi diprioritaskan sebagai investasi publik strategis. Namun demikian, proyek-proyek tersebut memiliki tingkat kompleksitas yang tinggi dan dihadapkan pada berbagai ketidakpastian yang bersumber dari aspek teknis, manajerial, finansial, dan lingkungan. Bukti empiris menunjukkan bahwa proyek infrastruktur rentan mengalami kesalahan desain, keterlambatan jadwal, pembengkakan biaya, serta kegagalan koordinasi akibat kompleksitas proyek dan sistem penyelenggaraan yang terfragmentasi (Zou dkk., 2017). Dalam konteks negara berkembang, termasuk Indonesia, lemahnya koordinasi antar pemangku kepentingan semakin memperbesar risiko tersebut (Krisnan dkk., 2024). Praktik manajemen proyek konvensional yang masih bergantung pada dokumentasi terpisah dan saluran komunikasi yang tidak terintegrasi membatasi kemampuan identifikasi risiko secara proaktif dan pengambilan keputusan yang tepat waktu, sehingga menurunkan kinerja proyek dan capaian keberlanjutan.

Sebagai respons terhadap tantangan tersebut, transformasi digital muncul sebagai pendekatan yang menjanjikan untuk meningkatkan integrasi proyek dan pengelolaan risiko di sektor konstruksi. *Building Information Modeling* (BIM) secara luas diakui sebagai teknologi transformatif yang memungkinkan integrasi informasi proyek ke dalam lingkungan digital terpusat. Melalui kemampuan multidimensinya (*3D-7D*), BIM mendukung koordinasi desain, penjadwalan, pengendalian biaya, analisis keberlanjutan, serta manajemen siklus hidup aset. Sejumlah

penelitian menunjukkan bahwa pemanfaatan BIM berkontribusi signifikan terhadap pengurangan risiko konstruksi, terutama melalui pengurangan konflik desain, peningkatan perencanaan keselamatan, dan dukungan simulasi berbasis skenario (Toan dkk., 2022). Dengan demikian, BIM berperan sebagai *enabler* utama dalam mitigasi risiko konstruksi secara proaktif pada proyek infrastruktur kompleks.

Seiring dengan itu, perkembangan menuju *Construction 4.0* semakin mempercepat digitalisasi industri konstruksi melalui penerapan teknologi seperti *Internet of Things* (IoT), kecerdasan buatan, *drone*, komputasi awan, dan *digital twin*. Teknologi ini memungkinkan akuisisi data secara *real-time*, analitik prediktif, serta peningkatan pengendalian operasional proyek (Famdale dan Widyadana, 2023). Ketika diintegrasikan dengan BIM, teknologi Industri 4.0 memperkuat pemantauan berkelanjutan terhadap kemajuan konstruksi, kondisi lingkungan, dan kinerja peralatan, sehingga meningkatkan deteksi dini terhadap potensi keterlambatan, bahaya keselamatan, dan inefisiensi operasional. Studi empiris menunjukkan bahwa adopsi teknologi Industri 4.0 berkontribusi signifikan terhadap peningkatan efektivitas manajemen risiko konstruksi (Sarkar dkk., 2019). Namun demikian, di negara berkembang seperti Indonesia, tingkat adopsi teknologi ini masih belum merata akibat keterbatasan sumber daya manusia, interoperabilitas sistem, dan kesiapan kelembagaan (Klinc dan Turk, 2019).

Meskipun berbagai studi telah mengonfirmasi manfaat BIM dan teknologi Industri 4.0 terhadap kinerja proyek atau keberlanjutan, kajian yang secara simultan menganalisis hubungan terintegrasi dan bermediasi antara pemanfaatan BIM, adopsi Industri 4.0, pengurangan risiko konstruksi, dan kinerja keberlanjutan masih terbatas, khususnya pada proyek infrastruktur publik di negara berkembang. Beberapa penelitian melaporkan dampak positif BIM terhadap

keberlanjutan atau kinerja proyek (Alshameri dan Green, 2020), namun hanya sedikit yang secara eksplisit mengkaji pengurangan risiko konstruksi sebagai mekanisme mediasi yang menjelaskan bagaimana transformasi digital menghasilkan keluaran proyek yang berkelanjutan. Keterbatasan ini menghambat pemahaman yang komprehensif mengenai jalur kausal antara teknologi digital dan kinerja keberlanjutan proyek infrastruktur.

Pemanfaatan BIM dan adopsi teknologi Industri 4.0 dipandang sebagai konstruk laten multidimensi yang merepresentasikan tingkat integrasi digital dalam proyek konstruksi, sementara pengurangan risiko konstruksi merefleksikan kemampuan mitigasi keterlambatan jadwal, pembengkakan biaya, bahaya keselamatan, dan kegagalan koordinasi. Kinerja keberlanjutan dipahami dari perspektif siklus hidup dan *triple bottom line*, yang mencakup efisiensi sumber daya, pengurangan limbah, kinerja keselamatan, serta ketahanan operasional jangka panjang (Too-chukwu, 2025; Wang dkk., 2020). Mengingat sifat laten dan hubungan yang saling terkait antar konstruk tersebut, penelitian ini menggunakan *Partial Least Squares-Structural Equation Modeling* (PLS-SEM) sebagai pendekatan analitis untuk mengevaluasi hubungan struktural dan peran mediasi pengurangan risiko konstruksi secara simultan (Zhang dkk., 2023).

Berdasarkan celah penelitian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pemanfaatan BIM dan adopsi teknologi Industri 4.0 terhadap pengurangan risiko konstruksi serta implikasinya terhadap kinerja keberlanjutan proyek infrastruktur publik di Indonesia. Fokus penelitian diarahkan pada proyek infrastruktur berskala besar, khususnya pembangunan jalan tol yang dilaksanakan oleh kontraktor BUMN, sehingga merepresentasikan praktik industri dominan dalam konteks nasional.

## METODE

Penelitian ini menggunakan desain penelitian kuantitatif bersifat eksplanatori untuk menganalisis pengaruh pemanfaatan *Building Information Modeling* (BIM) dan adopsi teknologi Industri 4.0 terhadap pengurangan risiko konstruksi serta kinerja keberlanjutan pada proyek infrastruktur publik di Indonesia. Analisis dilakukan menggunakan data primer yang dikumpulkan melalui survei pada fase pelaksanaan aktif proyek jalan tol berskala besar yang dikelola oleh Badan Usaha Milik Negara (BUMN) konstruksi. Konteks ini dipilih untuk merepresentasikan praktik konstruksi digital aktual dalam lingkungan proyek infrastruktur yang kompleks dan berisiko tinggi.

### 1. Populasi dan Sampel

Populasi penelitian mencakup para profesional konstruksi yang terlibat secara langsung dalam proyek infrastruktur publik berbasis BIM, termasuk manajer proyek, manajer BIM, insinyur, konsultan, dan pemilik proyek. Teknik *purposive sampling* diterapkan untuk memastikan bahwa responden memiliki pengalaman dan pemahaman yang memadai terkait penerapan BIM dan teknologi Industri 4.0. Jumlah sampel minimum ditentukan berdasarkan pedoman analisis faktor konfirmatori dan pemodelan persamaan struktural, yang merekomendasikan 5–10 responden untuk setiap indikator pengukuran (Hair dkk., 2021). Dengan jumlah 15 indikator pengukuran, kebutuhan sampel berada pada kisaran 75 hingga 150 responden. Berdasarkan kriteria tersebut, jumlah sampel akhir dinilai memadai untuk analisis PLS-SEM.

### 2. Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan menggunakan kuesioner terstruktur yang dirancang untuk mengukur empat konstruk utama, yaitu pemanfaatan BIM, teknologi Industri 4.0, pengurangan risiko konstruksi, dan kinerja keberlanjutan. Seluruh *item*

## Manajemen Risiko Untuk (Perdana/ hal. 196-205)

diukur menggunakan skala *likert*. Uji coba (*pilot test*) dilakukan sebelum pengumpulan data utama untuk menilai reliabilitas instrumen dan konsistensi internal (Sugiyono, 2017).

### 3. Teknik Analisis Data

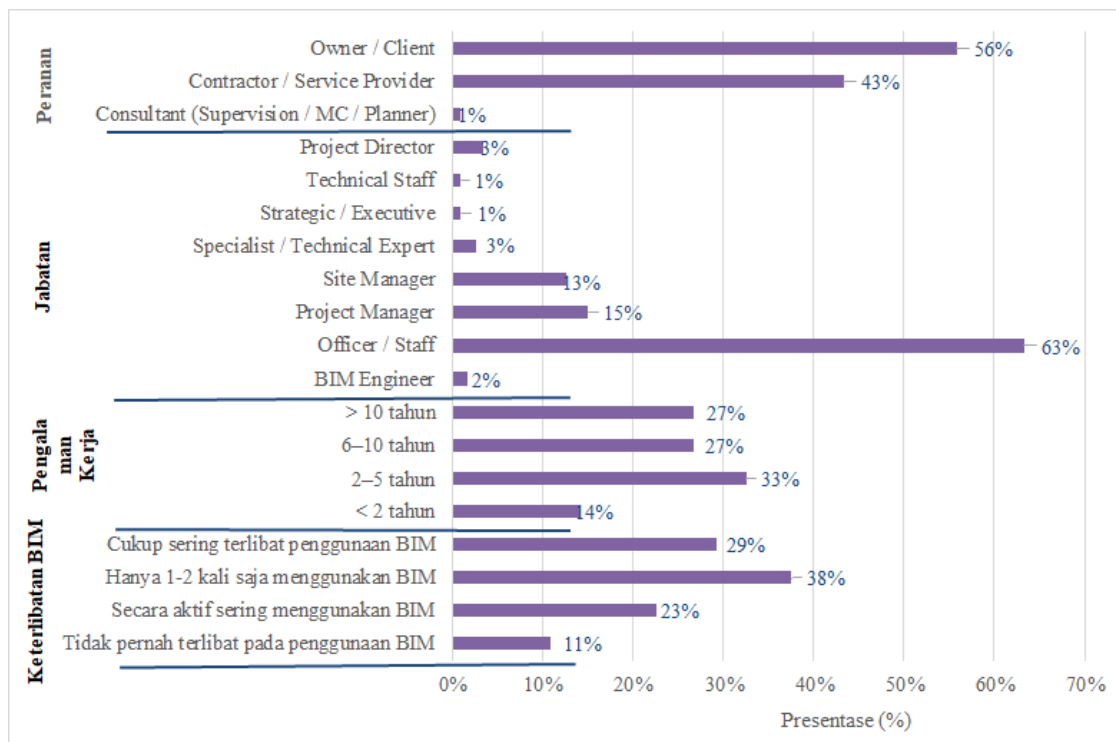
Analisis data dilakukan menggunakan metode *Partial Least Squares-Structural Equation Modeling* (PLS-SEM) dengan bantuan perangkat lunak SmartPLS. Prosedur analisis mengikuti pendekatan dua tahap. Tahap pertama adalah evaluasi model pengukuran, yang mencakup pengujian validitas konvergen (*Average Variance Extracted/AVE*  $\geq 0,50$ ), serta reliabilitas konsistensi internal (*Composite Reliability* dan *Cronbach's Alpha*  $\geq 0,70$ ). Tahap kedua

adalah evaluasi model struktural melalui analisis koefisien jalur, koefisien determinasi ( $R^2$ ), relevansi prediktif ( $Q^2$ ), dan ukuran efek ( $f^2$ ). Teknik *bootstrapping* dengan 5.000 subsampel digunakan untuk menguji signifikansi pengaruh langsung maupun pengaruh mediasi, sesuai dengan prosedur PLS-SEM yang direkomendasikan (Hair dkk., 2021).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### 1. Profil Responden

Profil demografis responden secara keseluruhan, yang mencakup afiliasi organisasi, jabatan, dan pengalaman profesional, disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Informasi Demografis Responden

Sebagian besar responden menempati posisi operasional, seperti staf teknis dan petugas lapangan, diikuti oleh manajer proyek dan manajer lapangan, dengan proporsi yang lebih kecil pada jabatan manajerial senior. Komposisi ini menunjukkan bahwa data penelitian terutama merepresentasikan pandangan

profesional yang terlibat langsung dalam pelaksanaan proyek sehari-hari dan pemanfaatan teknologi digital, sekaligus tetap mencerminkan pertimbangan strategis terkait tata kelola risiko dan tujuan keberlanjutan. Dari sisi pengalaman kerja, responden relatif tersebar merata pada berbagai tahapan karier, sehingga analisis

mampu mengintegrasikan perspektif profesional muda yang adaptif terhadap teknologi digital maupun praktisi senior dengan pengalaman luas dalam praktik konstruksi konvensional dan digital.

**2. Evaluasi Model Pengukuran**

Evaluasi model pengukuran dilakukan untuk memastikan validitas dan reliabilitas

konstruk laten sebelum dilakukan pengujian model struktural. Validitas konvergen telah terpenuhi, ditunjukkan oleh seluruh indikator yang memiliki nilai outer loading yang kuat dan melebihi ambang batas yang direkomendasikan sebesar 0,70. Selain itu, nilai AVE untuk setiap konstruk lebih besar dari 0,50, sebagaimana dirangkum pada Tabel 1.

Tabel 1. Validitas Konvergen

Item	Correlation coefficients	p-value	Reliability	AVE	Item	Correlation coefficients	p-value	Reliability	AVE
BIM_1	0,83	0,000	0,923	0,686	RISK_8	0,70	0,000	-	-
BIM_2	0,84	0,000			SUS_1	0,87	0,000	0,94	0,77
BIM_3	0,81	0,000			SUS_1	0,87	0,000	0,94	0,77
BIM_4	0,84	0,000			SUS_2	0,86	0,000	-	-
BIM_6	0,90	0,000			SUS_3	0,89	0,000	-	-
BIM_7	0,80	0,000			SUS_4	0,89	0,000	-	-
BIM_8	0,77	0,000			SUS_5	0,84	0,000	-	-
RISK_1	0,85	0,000			SUS_6	0,91	0,000	-	-
RISK_2	0,87	0,000	0,926	0,664	TEK_1	0,75	0,000	0,915	0,627
RISK_3	0,81	0,000			TEK_2	0,82	0,000	-	-
RISK_4	0,81	0,000			TEK_3	0,80	0,000	-	-
RISK_5	0,83	0,000			TEK_4	0,80	0,000	-	-
RISK_6	0,91	0,000			TEK_5	0,78	0,000	-	-
RISK_7	0,72	0,000							

Hasil ini menunjukkan bahwa proporsi varians indikator yang dapat dijelaskan oleh masing-masing konstruk laten tergolong tinggi, sehingga mencerminkan representasi konstruk yang memadai. Validitas diskriminan diuji menggunakan kriteria *Fornell-Larcker*. Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai akar kuadrat AVE

untuk setiap konstruk lebih besar dibandingkan dengan nilai korelasinya terhadap konstruk lain, sehingga mengonfirmasi bahwa pemanfaatan BIM, adopsi teknologi Industri 4.0, pengurangan risiko konstruksi, dan kinerja keberlanjutan merepresentasikan konsep yang berbeda secara empiris, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Validitas Diskriminan (Kriteria *Fornell-Larcker*)

	BIM	Risiko Proyek	Sustainability	Technology 4.0
BIM	0,828	-	-	-
Risiko Proyek	0,796	0,815	-	-
Sustainability	0,809	0,791	0,877	-
Technology 4.0	0,778	0,815	0,779	0,792

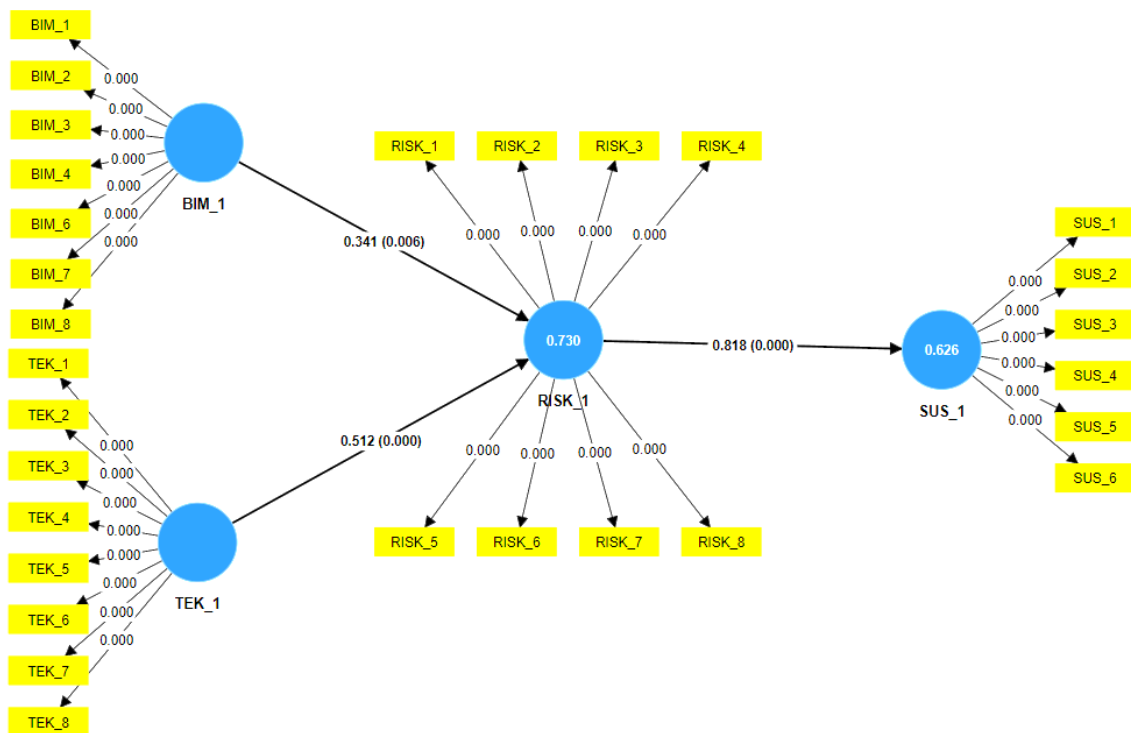
Temuan ini mengindikasikan bahwa setiap konstruk memiliki tingkat perbedaan konseptual yang baik serta tidak menunjukkan permasalahan multikolinearitas.

Selain itu, konsistensi internal model pengukuran dinilai memadai, yang ditunjukkan oleh nilai *Composite Reliability* dan *Cronbach's Alpha* yang melebihi ambang batas yang direkomendasikan. Secara keseluruhan, hasil ini menegaskan bahwa model pengukuran telah memenuhi persyaratan validitas dan reliabilitas yang

ditetapkan, sehingga menyediakan dasar yang kuat untuk analisis lanjutan pada model struktural dan pengujian efek mediasi.

### 3. Hasil Model Struktural dan Analisis Mediasi

Hasil evaluasi model struktural menunjukkan bahwa pemanfaatan BIM dan adopsi teknologi Industri 4.0 sama-sama memiliki pengaruh langsung yang positif dan signifikan secara statistik terhadap pengurangan risiko konstruksi, sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Hasil Koefisien Jalur Model Struktural

Hasil koefisien jalur model struktural pada Gambar 2 akan dirangkum pada Tabel 3 sebagai berikut.

Tabel 3. Koefisien Jalur Model Struktural

Hubungan Antar Variabel	Original Sample	Standard Deviation	T statistics	P values
Pemanfaatan BIM → Pengurangan Risiko Konstruksi	0,341	0,124	2,743	0,006
Pengurangan Risiko Konstruksi → Kinerja Keberlanjutan	0,818	0,058	14,012	0,000

Hubungan Antar Variabel	Original Sample	Standard Deviation	T statistics	P values
Adopsi Teknologi Industri 4.0 → Pengurangan Risiko Konstruksi	0,512	0,123	4,173	0,000
Pemanfaatan BIM → Pengurangan Risiko Konstruksi → Kinerja Keberlanjutan	0,279	0,106	2,643	0,008
Adopsi Teknologi Industri 4.0 → Pengurangan Risiko Konstruksi → Kinerja Keberlanjutan	0,419	0,105	3,971	0,000

Secara khusus, teknologi Industri 4.0 menunjukkan ukuran pengaruh yang lebih besar dibandingkan BIM, yang menegaskan peran krusial pemantauan *real-time*, integrasi data, dan mekanisme pengendalian prediktif dalam manajemen risiko konstruksi modern. Selanjutnya, pengurangan risiko konstruksi terbukti memiliki pengaruh yang kuat dan signifikan terhadap kinerja keberlanjutan, yang mengonfirmasi perannya sebagai mekanisme utama dalam menerjemahkan adopsi teknologi digital menjadi capaian proyek yang berkelanjutan.

Meskipun hubungan langsung antara pemanfaatan BIM, teknologi Industri 4.0, dan kinerja keberlanjutan bersifat positif, besarnya pengaruh tersebut relatif lebih kecil dibandingkan jalur tidak langsung yang bekerja melalui pengurangan risiko konstruksi. Pola ini menegaskan pentingnya mitigasi risiko sebagai mekanisme transmisi utama yang menghubungkan transformasi digital dengan kinerja keberlanjutan.

#### 4. Pembahasan

Penelitian ini mengonfirmasi logika *risk-driven digital delivery*, di mana transformasi digital berkontribusi terhadap kinerja keberlanjutan terutama melalui penguatan tata kelola risiko secara proaktif pada proyek infrastruktur publik yang kompleks. Dalam kerangka ini, *Building Information Modeling (BIM)* dan teknologi *Construction 4.0* dipahami sebagai kapabilitas yang saling melengkapi namun beroperasi pada fase risiko yang berbeda. *BIM* berperan dominan pada tahap hulu

proyek melalui integrasi informasi lintas disiplin, visualisasi *3D*, dan *clash detection*, yang memungkinkan konflik desain diidentifikasi dan diselesaikan sebelum konstruksi dimulai. Integrasi *4D* dan *5D* selanjutnya meningkatkan keandalan jadwal dan biaya, sementara fungsi *6D* membuka peluang pengambilan keputusan berbasis siklus hidup terkait energi dan karbon (Alnaser dkk., 2024; Mayouf dkk., 2024).

Sebaliknya, teknologi *Industry 4.0* beroperasi terutama pada tahap hilir proyek dengan memungkinkan pemantauan *real-time*, koordinasi cepat, dan pengendalian prediktif di lapangan. Pergeseran ini mendorong transformasi manajemen risiko dari pendekatan reaktif menuju sistem *early warning* dan pencegahan (Van Der Heijden, 2023). Integrasi teknologi seperti sensor *IoT*, drone, dan platform *cloud* memperkuat kemampuan deteksi dini terhadap risiko keselamatan, keterlambatan, dan gangguan operasional, yang secara langsung menurunkan ketidakpastian selama fase pelaksanaan (Famdale dan Widyadana, 2023).

Temuan empiris menunjukkan bahwa kontribusi *Industry 4.0* terhadap pengurangan risiko konstruksi lebih kuat dibandingkan *BIM*, yang mengindikasikan bahwa pada proyek infrastruktur berskala besar, risiko dominan muncul pada tahap pelaksanaan dan memerlukan mekanisme pemantauan serta respons yang adaptif. Hasil ini sejalan dengan konsep *intelligent construction site*, di mana aliran data berkelanjutan dan analitik prediktif

memungkinkan pengendalian risiko secara dinamis (Van Der Heijden, 2023). Namun demikian, tingkat adopsi teknologi lanjutan seperti *artificial intelligence* dan *machine learning* masih relatif terbatas, yang mengindikasikan bahwa industri konstruksi Indonesia berada pada tahap transisi menuju kematangan digital yang lebih tinggi. Dalam konteks ini, teknologi berbasis sensor dan pemantauan visual memberikan manfaat mitigasi risiko yang lebih langsung dibandingkan solusi analitik tingkat lanjut (Hossain dan Nadeem, 2019).

Pengaruh pengurangan risiko konstruksi yang sangat kuat terhadap kinerja keberlanjutan menegaskan bahwa keberlanjutan proyek infrastruktur publik lebih efektif dicapai melalui pengendalian risiko yang sistematis dibandingkan inisiatif lingkungan yang berdiri sendiri. Secara operasional, pengurangan konflik desain dan pekerjaan ulang menekan konsumsi material dan limbah (Ahmed dkk., 2021), peningkatan keandalan jadwal mengurangi durasi penggunaan peralatan dan konsumsi bahan bakar, serta peningkatan keselamatan kerja memperkuat keberlanjutan sosial dan ekonomi proyek melalui produktivitas dan stabilitas operasional yang lebih baik (Harahap dkk., 2022).

Analisis mediasi memperkuat temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa pengaruh *BIM* dan teknologi *Industry 4.0* terhadap kinerja keberlanjutan terutama ditransmisikan melalui pengurangan risiko konstruksi. Dengan demikian, teknologi digital tidak secara otomatis menghasilkan keluaran berkelanjutan, melainkan bekerja melalui mekanisme manajemen risiko yang efektif. Temuan ini mendukung argumen bahwa integrasi *BIM* dan *Construction 4.0* perlu diposisikan sebagai bagian dari sistem tata kelola risiko proyek, bukan sekadar sebagai alat teknis terpisah (Ahmad dkk., 2024; Ishak dkk., 2023).

Dari perspektif manajerial, hasil penelitian menekankan pentingnya integrasi

formal *BIM* dan teknologi *Industry 4.0* ke dalam sistem manajemen risiko dan keselamatan kerja proyek infrastruktur publik. Pemanfaatan *BIM 4D–6D*, sensor *IoT*, dan pemantauan berbasis *cloud* perlu dihubungkan langsung dengan *risk register* dan mekanisme pengambilan keputusan berbasis data. Selain itu, peningkatan kompetensi manajer proyek dan tim *K3* menjadi krusial agar transformasi digital dapat berfungsi sebagai instrumen strategis dalam pencapaian keberlanjutan, bukan sekadar peningkatan efisiensi operasional (Wally dkk., 2022).

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Fokus pada proyek infrastruktur publik yang didominasi BUMN, penggunaan data survei berbasis persepsi, serta desain *cross-sectional* membatasi generalisasi dan penelusuran dinamika kausal jangka panjang. Selain itu, penggabungan teknologi *Industry 4.0* ke dalam satu konstruk membatasi analisis dampak spesifik masing-masing teknologi. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan desain *longitudinal* atau metode campuran, memisahkan dimensi teknologi digital, serta memperluas konteks penelitian ke sektor swasta dan lintas negara untuk memperkaya pemahaman hubungan antara transformasi digital, pengurangan risiko, dan keberlanjutan.

## SIMPULAN

Penelitian ini menganalisis peran pemanfaatan *Building Information Modeling* (*BIM*) dan adopsi teknologi *Industry 4.0* dalam meningkatkan kinerja keberlanjutan proyek infrastruktur publik di Indonesia melalui pengurangan risiko konstruksi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa *BIM* dan teknologi *Industry 4.0* secara signifikan meningkatkan pengurangan risiko konstruksi, dengan teknologi *Industry 4.0* memiliki pengaruh yang lebih dominan. Selanjutnya, pengurangan risiko konstruksi terbukti berpengaruh kuat terhadap kinerja keberlanjutan, sehingga menegaskan bahwa

keberlanjutan proyek infrastruktur terutama dicapai melalui pengendalian risiko yang efektif. Analisis mediasi menunjukkan bahwa pengurangan risiko berperan sebagai mekanisme utama yang menjembatani transformasi digital dan capaian keberlanjutan. Temuan ini memberikan dukungan empiris terhadap jalur konstruksi digital berbasis risiko sebagai pendekatan strategis dalam mewujudkan penyelenggaraan infrastruktur publik yang berkelanjutan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, D. M., Gáspár, L., Bencze, Z., dan Maya, R. A. (2024). The Role of BIM in Managing Risks in Sustainability of Bridge Project: A Systematic Review with Meta-analysis. *Sustainability*, 16(3), 1242.
- Ahmed, R., Nassar, A., dan Afifi, M. (2021). Risk Management Methodology for Green Building Construction Projects using Fuzzy-based Multi-criteria Decision-making. *Design and Construction of Smart Cities*, 140–150.
- Alnaser, A. A., Al-Gahtani, K. S., dan Alsanabani, N. M. (2024). Building Information Modeling Impact on Cost Overrun Risk Factors and Interrelationships. *Applied Sciences*, 14(22), 10711.
- Alshameri, F., dan Green, N. G. (2020). Analyzing the Strength Between Mission and Vision Statements and Industry via Machine Learning. *Journal of Applied Business Research*, 36(3), 121–128.
- Famdale, C. H., dan Widyadana, I. G. A. (2023). Aplikasi dan Tantangan Pengembangan pada Industri Konstruksi di Indonesia. *Dimensi Utama Teknik Sipil*, 10(2), 156–173.
- Hair, J. F., Hult, G. T. M., Ringle, C. M., Sarstedt, M., Danks, N. P., dan Ray, S. (2021). Evaluation of Formative Measurement Models. *Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM)*, 91-113.
- Harahap, I. M., Firdasasi, dan Purwandito, M. (2022). Analisis Risiko Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) Melalui Metode Hirarc dan Metode JSA pada Proyek Lanjutan Pembangunan Rumah Sakit Regional Langsa. *Menara: Jurnal Teknik Sipil*, 17(2), 43–50.
- Hossain, M. A. dan Nadeem, A. (2019). Towards Digitizing the Construction Industry: State of the Art of Construction 4.0. *Proceedings of International Structural Engineering and Construction*, 6(1), 1-6.
- Ishak, N., Azizan, M. A., Ibrahim, F. A., Rahim, N. S. A., Zawawi, E. M. A., Anuar, N. H. K., dan Shohime, N. S. (2023). Building Information Modelling (BIM) Application as Risk Mitigation Strategies in Building Refurbishment Project Life Cycle. *IOP Conference Series: Earth Environmental Science*, 1216(1), 12030.
- Klinc, R., dan Turk, Ž. (2019). Construction 4.0 – Digital Transformation of One of the Oldest Industries. *Economic and Business Review*, 21(3), 393-410.
- Krisnan, N., Raidyarto, A., Irianto, I., Fauzi, M., E. Lapian, F., dan Indrawati, C. (2024). Analisis Manajemen Resiko pada Pembangunan Gedung “X” *Jurnal Cyclops*, 2(1), 51–56.
- Mayouf, M., Jones, J., Elghaish, F., Emam, H., Ekanayake, E. M. A. C., dan Ashayeri, I. (2024). Revolutionising the 4D BIM Process to Support Scheduling Requirements in Modular Construction. *Sustainability*, 16(2), 476.
- Sarkar, R., Narang, K., Sharma, P., Pal, I., dan Dikshit, A. (2019). Risk Identification, Assessment, and Disaster Risk Reduction of A Building Information Modeling Implemented

## Manajemen Risiko Untuk (Perdana/ hal. 196-205)

- Project. *An Interdisciplinary Approach for Disaster Resilience and Sustainability*, 289–309.
- Sugiyono. (2017). *Metode Penelitian Kombinasi (Mix Methods)*. Bandung: CV. Alfabeta.
- Toan, N. Q., Tam, N. Van, Diep, T. N., dan Anh, P. X. (2022). Adoption of Building Information Modeling in the Construction Project Life Cycle: Benefits for Stakeholders. *Architecture and Engineering*, 7(1), 56–71.
- Toochukwu, A. C. (2025). Integrating Building Information Modelling (BIM) for Effective Construction Planning, Execution, and Lifecycle Management. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 6(1), 4347–4364.
- Van Der Heijden, J. (2023). Construction 4.0 in A Narrow and Broad Sense: A Systematic and Comprehensive Literature Review. *Building and Environment*, 244, 110788.
- Wally, S. N., Jamlaay, O., dan Marantika, M. (2022). Analisis Manajemen Risiko pada Proyek Pembangunan Gedung Laboratorium Terpadu dan Perpustakaan MAN 1 Maluku Tengah. *Menara: Jurnal Teknik Sipil*, 17(2), 61–69.
- Wang, M., Wang, C. C., Sepasgozar, S., dan Zlatanova, S. (2020). A Systematic Review of Digital Technology Adoption in Off-site Construction: Current Status and Future Direction towards Industry 4.0. *Buildings*, 10(11), 204.
- Zhang, M., Fan, L., Liu, Y., Zhang, S., dan Zeng, D. (2023). The Relationship Between BIM Application and Project Sustainability Performance: Mediation Role of Green Innovation and Moderating Role of Institutional Pressures. *Buildings*, 13(12), 3126.
- Zou, Y., Kiviniemi, A., dan Jones, S. W. (2017). A Review of Risk Management through BIM and BIM-related Technologies. *Safety Science*, 97, 88–98.