

Pengembangan Prototipe Model Kesiapan Transformasi Digital Kontraktor Skala Menengah Berbasis TOE dan PLS-SEM

Silvia Faradila^{*1}, Wreda Agung Kuncoro², Rachmat Setyawan³, Haikal Nur Rachmanrachim
Archaqie⁴

Email: silvia@stekom.ac.id; wreda@stekom.ac.id; rachmatsetyawan@stekom.ac.id;
haikalnur@stekom.ac.id

Orcid: <https://orcid.org/0009-0007-1524-7179> ⁽²⁾; <https://orcid.org/0009-0008-9211-5775> ⁽³⁾
^{1,2,3,4}Universitas Sains dan Teknologi Komputer, Semarang, Indonesia

*Corresponding Author

Article Information	Abstract
Keywords: methodological prototype; digital transformation readiness; medium-sized contractors; TOE framework; PLS-SEM	<i>This methodological prototype develops a Technology–Organization–Environment (TOE) model and a Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) workflow for assessing digital transformation readiness in medium-sized construction contractors. The model contains four latent constructs and 20 reflective indicators measured on a five-point Likert scale. A synthetic dataset of 210 observations is used solely to demonstrate data preparation, measurement-model assessment, structural-model estimation, bootstrapping, effect-size analysis, and predictive assessment. The synthetic observations were generated to reproduce theoretically plausible relationships; therefore, the resulting loadings, reliability coefficients, path coefficients, significance values, R^2, Q^2 predict, and effect sizes are simulation outputs and must not be interpreted as empirical evidence about real contractors. The prototype contributes an auditable analytical protocol and a field-validation design, including operational population criteria, key-informant sampling, a priori power analysis, company-level response control, content validation, and pilot testing. Empirical conclusions and managerial recommendations are deliberately deferred until the instrument is validated and the model is re-estimated with actual survey data.</i>

	Abstrak
Kata Kunci: prototipe metodologis; kesiapan transformasi digital; kontraktor skala menengah; TOE Framework; PLS-SEM	Studi metodologis ini mengembangkan prototipe model Technology–Organization–Environment (TOE) dan alur analisis Partial Least Squares Structural Equation Modeling (PLS-SEM) untuk menilai kesiapan transformasi digital kontraktor skala menengah. Model terdiri atas empat konstruk laten dan 20 indikator reflektif dengan skala Likert lima tingkat. Dataset sintesis sebanyak 210 observasi digunakan hanya untuk mendemonstrasikan persiapan data, evaluasi model pengukuran, estimasi model struktural, bootstrapping, analisis effect size, dan predictive assessment. Observasi sintesis dibentuk untuk menghasilkan pola hubungan yang secara teoretis masuk akal; karena itu, outer loading, reliabilitas, koefisien jalur, nilai signifikansi, R^2 , Q^2 predict, dan f^2 yang dihasilkan merupakan keluaran simulasi dan tidak dapat ditafsirkan sebagai bukti empiris mengenai kontraktor nyata. Kontribusi prototipe ini adalah menyediakan protokol analisis yang dapat diaudit serta rancangan validasi lapangan yang mencakup definisi populasi, key-informant sampling, power analysis a priori, pengendalian respons pada tingkat perusahaan, validasi isi, dan pilot test. Kesimpulan empiris dan rekomendasi manajerial ditunda sampai instrumen tervalidasi dan model dihitung ulang menggunakan data survei aktual.



I. PENDAHULUAN

Transformasi digital mengubah cara perusahaan konstruksi merencanakan, melaksanakan, memantau, dan mengevaluasi proyek. BIM, Internet of Things, komputasi awan, kecerdasan buatan, analitik data, dan Digital Twin memperluas kemampuan integrasi informasi, tetapi transformasi digital tidak identik dengan pengadaan teknologi. Literatur menempatkannya sebagai perubahan strategis dan organisasional yang memengaruhi proses, struktur, kompetensi, tata kelola, dan penciptaan nilai (Matt et al., 2015; Vial, 2019; Verhoef et al., 2021). Pada industri konstruksi, kajian terbaru juga menunjukkan kesenjangan antara ketersediaan teknologi dan kemampuan implementasi, interoperabilitas, standarisasi, serta kesiapan organisasi (Naji et al., 2024; Statsenko et al., 2023; van der Heijden, 2023; Nozari et al., 2026).

Persoalan kesiapan menjadi penting bagi kontraktor skala menengah karena perusahaan pada kelompok ini menghadapi kompleksitas proyek yang meningkat tetapi tidak selalu memiliki sumber daya digital setara kontraktor besar. Studi mengenai kesiapan digital UKM menekankan pentingnya budaya, kompetensi, dan kondisi organisasi (Silva et al., 2022; Machado et al., 2021), sedangkan penelitian pada construction SMEs menyoroti kepemimpinan, kemampuan manajerial, dan organizational readiness sebagai bagian penting dari transformasi (Wang et al., 2026). Karena itu, diperlukan instrumen yang dapat mengorganisasi faktor teknologi, organisasi, dan lingkungan secara konsisten sebelum pengujian empiris dilakukan.

Kesiapan transformasi digital menggambarkan kemampuan perusahaan untuk memulai, mengelola, dan mempertahankan perubahan berbasis teknologi pada tingkat organisasi. Suatu perusahaan belum dapat dinyatakan siap hanya karena telah menggunakan aplikasi penjadwalan, perangkat lunak estimasi biaya, atau media penyimpanan berbasis awan. Teknologi yang diterapkan tanpa dukungan manajemen, kompetensi pengguna, prosedur kerja, dan integrasi data berisiko hanya menggantikan media kerja tanpa menghasilkan perbaikan proses yang bermakna. Fragmentasi sistem juga dapat menimbulkan penginputan data berulang, ketidaksesuaian informasi antardivisi, rendahnya pemanfaatan aplikasi, serta ketergantungan pada proses manual. Dalam konteks tersebut, kesiapan digital perlu diposisikan sebagai konstruk multidimensional yang mencerminkan kemampuan teknologi, organisasi, dan lingkungan bisnis perusahaan.

Salah satu kerangka yang relevan untuk menjelaskan kesiapan adopsi teknologi pada tingkat perusahaan adalah *Technology–Organization–Environment* atau TOE Framework. Kerangka ini diperkenalkan oleh Tornatzky dan Fleischer (1990) untuk menjelaskan bahwa keputusan serta proses inovasi teknologi dipengaruhi oleh konteks teknologi, karakteristik organisasi, dan kondisi lingkungan eksternal. Konteks teknologi mencakup ketersediaan infrastruktur, kompatibilitas sistem, manfaat yang dirasakan, kompleksitas, keamanan, serta kemampuan integrasi teknologi

dengan proses yang telah berjalan. Konteks organisasi meliputi dukungan manajemen puncak, sumber daya keuangan, kompetensi tenaga kerja, budaya perubahan, struktur pengambilan keputusan, dan kemampuan pembelajaran. Sementara itu, konteks lingkungan dapat mencakup tekanan persaingan, tuntutan pengguna jasa, dukungan penyedia teknologi, hubungan dengan mitra proyek, dan kebijakan pemerintah. Ketiga konteks tersebut memberikan perspektif yang lebih komprehensif dibandingkan pendekatan yang hanya menilai penerimaan teknologi pada tingkat individu.

Penerapan TOE pada konteks konstruksi mempunyai dukungan empiris dalam studi adopsi BIM dan teknologi digital. Ahuja et al. (2016) serta Chen et al. (2019) menunjukkan bahwa karakteristik teknologi, dukungan manajemen, kesiapan organisasi, dan faktor lingkungan dapat memengaruhi adopsi BIM; studi TOE pada BIM-AR juga memperlihatkan relevansi infrastruktur, kapasitas perusahaan, dan tekanan kompetitif. Namun, hasil antartstudi tidak selalu seragam sehingga konstruk TOE tidak boleh diasumsikan memiliki kekuatan pengaruh tertentu sebelum data lapangan tersedia.

Kajian terdahulu masih banyak berfokus pada teknologi tertentu atau pada hambatan digitalisasi. Nguyen et al. (2024), misalnya, mengidentifikasi hambatan biaya, keamanan, standardisasi, dan resistensi dalam digitalisasi konstruksi, sedangkan Naji et al. (2024) menunjukkan bahwa transformasi digital melibatkan banyak teknologi dan tahapan siklus hidup proyek. Penelitian Wang et al. (2026) menekankan *organizational readiness* pada construction SMEs, tetapi menggunakan pendekatan kualitatif dan Delphi. Kesenjangan yang relevan bagi studi ini adalah kebutuhan akan instrumen TOE yang terstruktur dan protokol PLS-SEM yang siap divalidasi secara empiris pada kontraktor skala menengah.

PLS-SEM digunakan dalam prototipe karena mampu mengevaluasi model pengukuran dan model struktural secara simultan serta sesuai untuk orientasi penjelasan dan prediksi. Kriteria evaluasi mengikuti Hair et al. (2022) dan Hair et al. (2019), validitas diskriminan dilengkapi dengan HTMT (Henseler et al., 2015), Fornell–Larcker digunakan sebagai pemeriksaan komplementer (Fornell & Larcker, 1981), dan predictive assessment mengacu pada PLSpredict (Shmueli et al., 2019). Pada studi empiris, potensi common-method bias juga harus diperiksa, antara lain melalui full-collinearity assessment (Kock, 2015).

Berdasarkan kesenjangan tersebut, tujuan artikel ini bukan menyimpulkan determinan empiris kesiapan digital kontraktor, melainkan mengembangkan dan mendemonstrasikan prototipe model TOE–PLS-SEM yang siap digunakan pada studi lapangan. Kontribusi artikel terletak pada: (1) perumusan konstruk dan indikator yang dapat ditelusurkan ke literatur; (2) spesifikasi prosedur evaluasi outer model, inner model, bootstrapping, effect size, dan predictive assessment; serta (3)

rancangan validasi lapangan yang mengatur populasi, key informant, power analysis, potensi clustering, validasi isi, dan pilot test. Seluruh keluaran numerik dari data sintetis diposisikan sebagai demonstrasi prosedural, bukan temuan tentang kondisi kontraktor nyata.

II. PENELITIAN TERKAIT

A. Transformasi Digital dalam Industri Konstruksi

Transformasi digital merupakan perubahan organisasi yang dipicu dan dimungkinkan oleh teknologi digital, tetapi dampaknya meluas ke strategi, proses, struktur, kompetensi, dan penciptaan nilai (Matt et al., 2015; Vial, 2019; Verhoef et al., 2021). Dalam konstruksi, transformasi mencakup integrasi BIM, IoT, cloud, analitik, AI, dan Digital Twin di sepanjang siklus hidup proyek. Kajian Naji et al. (2024), Statsenko et al. (2023), dan van der Heijden (2023) menunjukkan bahwa adopsi teknologi berkembang cepat, tetapi implementasi masih dipengaruhi interoperabilitas, keterampilan, biaya, tata kelola, serta kesiapan organisasi dan ekosistem.

Dengan demikian, kesiapan transformasi digital perlu dipahami sebagai kondisi organisasi untuk mengadopsi, mengintegrasikan, dan mempertahankan perubahan digital, bukan sekadar jumlah aplikasi yang digunakan. Silva et al. (2022) dan Machado et al. (2021) menekankan organizational readiness sebagai fondasi tahap awal transformasi, sementara Wang et al. (2026) menunjukkan bahwa pada construction SMEs, kemampuan manajerial dan kesiapan organisasi berkaitan erat dengan keberlanjutan proses transformasi.

B. Technology–Organization–Environment Framework

TOE Framework diperkenalkan oleh Tornatzky dan Fleischer (1990) dan menempatkan adopsi inovasi pada tiga konteks: Technology, Organization, dan Environment. Kerangka ini relevan untuk unit analisis organisasi karena memungkinkan faktor teknis, kapasitas internal, dan tekanan atau dukungan eksternal dianalisis dalam satu struktur konseptual. Penerapannya pada BIM dan teknologi konstruksi telah didemonstrasikan oleh Ahuja et al. (2016), Chen et al. (2019), dan studi-studi TOE konstruksi berikutnya.

Dalam prototipe ini, Technology mencakup kesiapan infrastruktur, kompatibilitas, integrasi, keamanan informasi, dan manfaat teknologi. Pemilihan domain tersebut konsisten dengan logika TOE dan studi adopsi BIM yang menempatkan relative advantage, compatibility, complexity, infrastructure, dan integration sebagai aspek penting (Tornatzky & Fleischer, 1990; Ahuja et al., 2016; Chen et al., 2019).

Organization mencakup dukungan manajemen, kompetensi SDM, budaya inovasi, pendanaan, dan strategi digital, sedangkan Environment mencakup tekanan persaingan, dukungan pemerintah, tuntutan klien, vendor, dan kolaborasi industri. Domain organisasi merujuk pada

literatur readiness (Silva et al., 2022; Machado et al., 2021; Wang et al., 2026), sedangkan domain lingkungan mengikuti TOE serta studi konstruksi yang menunjukkan peran tekanan kompetitif, partner readiness, regulasi, dan dukungan eksternal (Ahuja et al., 2016; Chen et al., 2019; Nguyen et al., 2024).

C. Partial Least Squares Structural Equation Modeling dalam Penelitian Transformasi Digital

PLS-SEM digunakan untuk mengestimasi hubungan antar konstruk laten sekaligus mengevaluasi kualitas indikator. Pedoman pelaporan dan evaluasi mengikuti Hair et al. (2019, 2022). Outer loading, internal consistency, AVE, dan discriminant validity digunakan untuk mengevaluasi measurement model; HTMT mengikuti Henseler et al. (2015), sedangkan kriteria Fornell–Larcker mengacu pada Fornell dan Larcker (1981).

Structural model dievaluasi melalui VIF, path coefficient, R^2 , f^2 , bootstrapping, confidence interval, dan predictive assessment. PLSpredict dan $Q^2_{predict}$ digunakan sebagai evaluasi kemampuan prediktif di luar sampel sesuai Shmueli et al. (2019). Untuk studi survei aktual, penilaian common-method bias perlu ditambahkan (Kock, 2015), dan kecukupan sampel harus direncanakan dengan power analysis a priori, bukan aturan jumlah observasi prototipe (Cohen, 1988; Faul et al., 2007).

D. Penelitian Terdahulu

Literatur menunjukkan bahwa faktor kesiapan digital konstruksi bersifat multidimensional. Naji et al. (2024) dan Nozari et al. (2026) merangkum transformasi digital konstruksi sebagai kombinasi teknologi, proses, manusia, data, dan tata kelola; Nguyen et al. (2024) menekankan hambatan biaya, keamanan, resistensi, dan standardisasi. Dalam adopsi BIM, Ahuja et al. (2016) dan Chen et al. (2019) memperlihatkan relevansi TOE, sedangkan Silva et al. (2022), Machado et al. (2021), dan Wang et al. (2026) menekankan organizational readiness. Sintesis ini mendukung pengembangan instrumen TOE, tetapi tidak menetapkan sejak awal bahwa salah satu konstruk harus menjadi determinan paling kuat. Rivera et al. (2021), Su et al. (2023), Li et al. (2023), dan Elghdhan et al. (2023) juga memperluas pembahasan Construction 4.0, digital twin, big-data integration, dan penerapan TOE pada perusahaan konstruksi.

Sintesis penelitian terdahulu menunjukkan dua kebutuhan. Pertama, instrumen perlu memisahkan secara jelas aspek Technology, Organization, Environment, dan Digital Transformation Readiness agar konstruk tidak tumpang tindih. Kedua, pengujian empiris harus dilakukan pada perusahaan nyata karena pola hubungan antar konstruk dapat berbeda menurut konteks, ukuran perusahaan, jenis proyek, dan ekosistem digital. Oleh sebab itu, data sintesis

dalam artikel ini hanya digunakan sebagai test bench untuk memeriksa alur analisis, bukan sebagai pengganti data lapangan.

Tabel 1. Ringkasan penelitian terdahulu

Peneliti	Fokus penelitian	Metode	Temuan utama	Keterbatasan atau kesenjangan
Tornatzky dan Fleischer (1990)	Pengembangan TOE Framework	Konseptual	Adopsi inovasi dipengaruhi konteks teknologi, organisasi, dan lingkungan	Belum spesifik pada industri konstruksi
Silva et al. (2022)	Kesiapan transformasi digital pada UKM	Pengembangan model kesiapan	Kesiapan digital melibatkan kemampuan dan budaya organisasi	Tidak berfokus pada kontraktor
Hair et al. (2022)	Pengembangan dan evaluasi PLS-SEM	Metodologis	Menjelaskan evaluasi outer model dan inner model	Bukan studi empiris konstruksi
Naji et al. (2024)	Transformasi digital industri konstruksi	Systematic literature review	Teknologi digital diterapkan pada berbagai tahapan proyek	Tidak menguji hubungan struktural antarfaktor
Chen et al. (2019)	Adopsi BIM pada industri konstruksi	Survei dan PLS	Faktor teknologi, organisasi, dan lingkungan diuji dalam kerangka TOE	Berfokus pada adopsi BIM, bukan kesiapan transformasi digital menyeluruh
Nguyen et al. (2024)	Hambatan digitalisasi konstruksi	Analisis empiris	Biaya, keamanan, resistensi, dan standarisasi menjadi hambatan penting	Berfokus pada hambatan dan konteks negara tertentu
Wang et al. (2026)	Transformasi dan kesiapan organisasi perusahaan konstruksi	Pendekatan kualitatif dan validasi pakar	Kepemimpinan, budaya, teknologi, dan kapabilitas manajerial berperan penting	Belum menguji TOE menggunakan PLS-SEM

E. Research Gap dan Kebaruan Penelitian

Research gap artikel ini bersifat metodologis: tersedia banyak konsep dan faktor digitalisasi konstruksi, tetapi diperlukan protokol yang menghubungkan pengembangan instrumen TOE, desain sampling pada tingkat perusahaan, pengendalian unit observasi, power analysis, serta evaluasi PLS-SEM secara transparan. Gap empiris mengenai pola pengaruh pada kontraktor skala menengah tetap terbuka dan hanya dapat dijawab setelah survei aktual dilakukan.

Kebaruan prototipe terletak pada penyusunan alur end-to-end yang secara eksplisit memisahkan tahap pengembangan model dari tahap validasi empiris. Dengan pemisahan tersebut, keluaran simulasi digunakan untuk menguji keterlaksanaan prosedur analitis, sedangkan klaim substantif mengenai kontraktor ditunda sampai tersedia data lapangan yang memenuhi kriteria populasi, sampling, validasi instrumen, dan independensi observasi.

III. METODOLOGI PENELITIAN

A. Desain Penelitian

Penelitian ini merupakan studi metodologis/prototipe. Model konseptual disusun berdasarkan TOE Framework dengan Technology, Organization, dan Environment sebagai konstruk eksogen serta Digital Transformation Readiness (DTR) sebagai konstruk endogen. PLS-SEM digunakan untuk mendemonstrasikan rangkaian evaluasi measurement model dan structural model. Unit analisis yang dituju pada fase empiris adalah perusahaan kontraktor, sedangkan unit observasi adalah key informant yang memahami keputusan organisasi dan penerapan teknologi. Pada versi prototipe ini belum ada responden atau perusahaan aktual yang dianalisis.

Dataset sintetis sebanyak 210 observasi digunakan sebagai test bench untuk memastikan bahwa format data, pengkodean indikator, estimasi PLS-SEM, bootstrapping, effect-size analysis, dan predictive assessment dapat dijalankan secara konsisten. Struktur korelasi sengaja dibentuk agar mencerminkan pola teoritis yang masuk akal. Karena mekanisme pembentukan data memengaruhi hasil, seluruh statistik yang dihasilkan diperlakukan sebagai output simulasi dan tidak digunakan untuk menerima hipotesis secara substantif, melakukan generalisasi, atau memberikan rekomendasi bagi kontraktor nyata.

B. Populasi dan Sampel

Populasi sasaran untuk validasi empiris didefinisikan sebagai Badan Usaha Jasa Konstruksi (BUJK) berkualifikasi menengah di Indonesia. Kualifikasi usaha jasa konstruksi pada regulasi Indonesia dibedakan menjadi kecil, menengah, dan besar berdasarkan kemampuan usaha, termasuk penjualan tahunan, kemampuan keuangan, tenaga kerja konstruksi, dan kemampuan penyediaan peralatan. Kerangka sampel pada studi lapangan direncanakan bersumber dari registri BUJK/SBU pada Sistem Informasi Jasa Konstruksi (SIJK/LPJK) dan, bila diperlukan, daftar asosiasi badan usaha yang dapat diverifikasi. Kriteria inklusi adalah perusahaan dengan SBU aktif berkualifikasi menengah dan memiliki pengalaman menggunakan atau merencanakan teknologi digital dalam proses bisnis/proyek. Key informant dipilih secara purposive dari direktur/pemilik, project manager, operational/IT manager, site manager/engineer, estimator, atau personel lain yang memiliki pengetahuan organisasi yang memadai.

Ukuran sampel empiris tidak diturunkan dari angka 210 pada dataset prototipe. Penentuan minimum dilakukan a priori melalui power analysis. Sebagai acuan awal untuk model dengan tiga prediktor, $\alpha=0,05$, power=0,80, dan anticipated medium effect $f^2=0,15$, perhitungan G*Power untuk multiple regression memberikan kebutuhan sekitar 77 observasi; target lapangan sebaiknya dinaikkan untuk mengantisipasi non-response, data tidak valid, heterogenitas, dan kebutuhan

stabilitas estimasi (Cohen, 1988; Faul et al., 2007; Hair et al., 2019). Studi empiris harus melaporkan jumlah perusahaan dalam sampling frame, jumlah perusahaan yang dihubungi, respons masuk, respons valid, dan response rate. Preferensi desain adalah satu key informant per perusahaan. Jika lebih dari satu responden berasal dari perusahaan yang sama, identitas perusahaan harus dikodekan dan ketergantungan observasi diperiksa; respons dapat diagregasi hanya jika agreement memadai, atau dianalisis dengan pendekatan yang mempertimbangkan clustering/multilevel dependence.

C. Konstruk dan Variabel Penelitian

Penelitian menggunakan empat konstruk laten, yaitu Technology, Organization, Environment, dan Digital Transformation Readiness. Konstruk Technology menggambarkan kesiapan infrastruktur digital, kompatibilitas sistem, kemampuan integrasi, keamanan informasi, dan manfaat teknologi bagi proses bisnis. Konstruk Organization merepresentasikan dukungan manajemen puncak, kompetensi sumber daya manusia, budaya inovasi, kesiapan pendanaan, dan strategi transformasi digital. Konstruk Environment mencakup tekanan persaingan, dukungan pemerintah, tuntutan pengguna jasa, dukungan penyedia teknologi, dan kolaborasi industri. Digital Transformation Readiness digunakan untuk mengukur kesiapan proses bisnis, sumber daya manusia, tata kelola data, implementasi teknologi, dan pengembangan digital berkelanjutan.

D. Penyusunan Instrumen

Instrumen prototipe menggunakan skala Likert lima tingkat (1 = sangat tidak setuju; 5 = sangat setuju). Indikator pada Tabel 2 diturunkan dari TOE dan literatur digital readiness/construction digitalization, bukan dari hasil data sintetis. Technology mengacu terutama pada Tornatzky dan Fleischer (1990), Ahuja et al. (2016), Chen et al. (2019), dan Naji et al. (2024); Organization pada Silva et al. (2022), Machado et al. (2021), dan Wang et al. (2026); Environment pada TOE serta studi adopsi konstruksi (Ahuja et al., 2016; Chen et al., 2019; Nguyen et al., 2024); sedangkan DTR dirumuskan dari literatur organizational readiness dan digital transformation (Vial, 2019; Silva et al., 2022; Machado et al., 2021).

Instrumen pada artikel ini masih berstatus draft untuk validasi lapangan dan belum diklaim sebagai instrumen empiris tervalidasi. Sebelum survei utama, prosedur yang diwajibkan adalah: (1) content validation oleh 3–5 pakar manajemen konstruksi, sistem informasi, dan transformasi digital; (2) revisi butir berdasarkan relevansi, kejelasan, dan keterwakilan konstruk; (3) pilot test pada sekitar 30 responden yang memenuhi profil target tetapi tidak dimasukkan ke sampel utama; serta (4) dokumentasi perubahan instrumen. Hanya setelah tahapan tersebut selesai, reliabilitas, validitas, dan model struktural boleh diinterpretasikan secara empiris.

Tabel 2. Operasionalisasi konstruk penelitian

Konstruk	Kode	Indikator	Basis konseptual utama
Technology	TEC1	Kesiapan infrastruktur teknologi	Tornatzky & Fleischer (1990); Ahuja et al. (2016); Chen et al. (2019); Naji et al. (2024)
	TEC2	Kompatibilitas sistem digital	Tornatzky & Fleischer (1990); Ahuja et al. (2016); Chen et al. (2019); Naji et al. (2024)
	TEC3	Kemampuan integrasi teknologi	Tornatzky & Fleischer (1990); Ahuja et al. (2016); Chen et al. (2019); Naji et al. (2024)
	TEC4	Keamanan informasi	Tornatzky & Fleischer (1990); Ahuja et al. (2016); Chen et al. (2019); Naji et al. (2024)
	TEC5	Manfaat teknologi bagi proses bisnis	Tornatzky & Fleischer (1990); Ahuja et al. (2016); Chen et al. (2019); Naji et al. (2024)
Organization	ORG1	Dukungan manajemen puncak	Silva et al. (2022); Machado et al. (2021); Wang et al. (2026); Chen et al. (2019)
	ORG2	Kompetensi sumber daya manusia	Silva et al. (2022); Machado et al. (2021); Wang et al. (2026); Chen et al. (2019)
	ORG3	Budaya inovasi	Silva et al. (2022); Machado et al. (2021); Wang et al. (2026); Chen et al. (2019)
	ORG4	Kesiapan pendanaan	Silva et al. (2022); Machado et al. (2021); Wang et al. (2026); Chen et al. (2019)
	ORG5	Strategi transformasi digital	Silva et al. (2022); Machado et al. (2021); Wang et al. (2026); Chen et al. (2019)
Environment	ENV1	Tekanan persaingan	Tornatzky & Fleischer (1990); Ahuja et al. (2016); Chen et al. (2019); Nguyen et al. (2024)
	ENV2	Dukungan pemerintah	Tornatzky & Fleischer (1990); Ahuja et al. (2016); Chen et al. (2019); Nguyen et al. (2024)
	ENV3	Tuntutan pengguna jasa	Tornatzky & Fleischer (1990); Ahuja et al. (2016); Chen et al. (2019); Nguyen et al. (2024)
	ENV4	Dukungan penyedia teknologi	Tornatzky & Fleischer (1990); Ahuja et al. (2016); Chen et al. (2019); Nguyen et al. (2024)
	ENV5	Kolaborasi industri	Tornatzky & Fleischer (1990); Ahuja et al. (2016); Chen et al. (2019); Nguyen et al. (2024)
Digital Transformation Readiness	DTR1	Kesiapan proses bisnis	Vial (2019); Verhoef et al. (2021); Silva et al. (2022); Machado et al. (2021)
	DTR2	Kesiapan sumber daya manusia	Vial (2019); Verhoef et al. (2021); Silva et al. (2022); Machado et al. (2021)
	DTR3	Kesiapan tata kelola data	Vial (2019); Verhoef et al. (2021); Silva et al. (2022); Machado et al. (2021)
	DTR4	Kesiapan implementasi teknologi	Vial (2019); Verhoef et al. (2021); Silva et al. (2022); Machado et al. (2021)
	DTR5	Kesiapan pengembangan berkelanjutan	Vial (2019); Verhoef et al. (2021); Silva et al. (2022); Machado et al. (2021)

E. Model Konseptual dan Hipotesis

Model penelitian menempatkan Technology, Organization, dan Environment sebagai konstruk eksogen yang memengaruhi Digital Transformation Readiness. Hubungan tersebut disusun berdasarkan TOE Framework yang menjelaskan bahwa kesiapan inovasi pada tingkat organisasi

dipengaruhi oleh kondisi teknologi, kapasitas internal, dan lingkungan eksternal. Technology diperkirakan meningkatkan kesiapan melalui ketersediaan sistem, integrasi, keamanan, dan manfaat operasional. Organization diperkirakan memengaruhi kesiapan melalui dukungan pimpinan, kompetensi, budaya, pendanaan, dan strategi. Environment diperkirakan membentuk kesiapan melalui tekanan persaingan, regulasi, tuntutan klien, vendor, dan jejaring industri.

Hipotesis penelitian dirumuskan sebagai berikut:

H1: Technology berpengaruh positif terhadap Digital Transformation Readiness.

H2: Organization berpengaruh positif terhadap Digital Transformation Readiness.

H3: Environment berpengaruh positif terhadap Digital Transformation Readiness.

Model struktural penelitian dinyatakan dalam persamaan (1) berikut ini:

$$DTR = \beta_1 TEC + \beta_2 ORG + \beta_3 ENV + \zeta \quad (1)$$

dengan, DTR = Digital Transformation Readiness, TEC = Technology, ORG = Organization, ENV = Environment, β_1 , β_2 , β_3 = koefisien jalur, dan ζ = galat model struktural.

F. Persiapan dan Pemeriksaan Data

Pada fase empiris, data harus diperiksa untuk missing values, respons tidak lengkap, straight-lining, duplikasi, durasi pengisian yang tidak wajar, dan kesesuaian kriteria responden. ID perusahaan harus disimpan untuk mengidentifikasi kemungkinan lebih dari satu key informant pada perusahaan yang sama. Statistik deskriptif digunakan setelah pembersihan data dan hanya boleh ditafsirkan sebagai karakteristik sampel aktual. Pada prototipe, observasi sintesis dibentuk tanpa missing values pada rentang 1–5 dan korelasi antarindikator diatur agar menyerupai model TOE. Langkah ini sengaja dilakukan untuk demonstrasi perangkat analisis. Konsekuensinya, reliabilitas, validitas, bootstrapping, koefisien jalur, dan statistik lainnya sebagian merupakan hasil desain simulasi. Nilai tersebut tidak digunakan sebagai bukti bahwa pola yang sama terdapat pada kontraktor skala menengah.

G. Analisis Data Menggunakan PLS-SEM

Analisis prototipe mengikuti urutan PLS-SEM: evaluasi model pengukuran, pemeriksaan kolinearitas, estimasi model struktural, bootstrapping, effect size, dan predictive assessment. Pedoman pelaporan merujuk Hair et al. (2019, 2022). Pada replikasi empiris, seluruh estimasi wajib dihitung ulang dari data lapangan; tidak ada nilai output sintesis yang boleh dipertahankan sebagai hasil substantif.

H. Evaluasi Model Pengukuran

Model pengukuran reflektif diperiksa melalui outer loading, internal consistency, convergent validity, dan discriminant validity. Outer loading sekitar $\geq 0,70$ digunakan sebagai pedoman umum; Composite Reliability umumnya diharapkan $0,70-0,95$ dan $AVE \geq 0,50$ (Hair et al., 2022). Kriteria tersebut merupakan panduan evaluasi, bukan target yang digunakan untuk membentuk data empiris. Hubungan indikator reflektif dengan konstruk dapat dinyatakan sebagai persamaan (2).

$$x_i = \lambda_i \xi + \delta_i \quad (2)$$

dengan, x_i = indikator ke- i , λ_i = outer loading indikator, ξ = konstruk laten, dan δ_i = galat pengukuran indikator. Reliabilitas internal dievaluasi menggunakan Cronbach's Alpha dan Composite Reliability. Cronbach's Alpha mengukur konsistensi antarindikator dengan asumsi bahwa seluruh indikator mempunyai kontribusi yang relatif sama. Nilai Cronbach's Alpha sekurang-kurangnya $0,70$ menunjukkan tingkat konsistensi internal yang dapat diterima. Namun, ukuran ini perlu dilengkapi dengan Composite Reliability karena outer loading indikator dalam PLS-SEM dapat berbeda. Nilai Composite Reliability antara $0,70$ dan $0,95$ dianggap menunjukkan reliabilitas yang memadai. Cronbach's Alpha dihitung menggunakan persamaan (3) berikut:

$$\alpha = \frac{k}{k-1} \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^k \sigma_i^2}{\sigma_T^2} \right) \quad (3)$$

dengan, α = Cronbach's Alpha, k = jumlah indikator, σ_i^2 = varians indikator ke- i , σ_T^2 = varians total skor konstruk. Composite Reliability dihitung sebagai persamaan (4) berikut:

$$CR = \frac{(\sum_{i=1}^k \lambda_i)^2}{(\sum_{i=1}^k \lambda_i)^2 + \sum_{i=1}^k (1 - \lambda_i^2)} \quad (4)$$

dengan, CR = Composite Reliability, λ_i = outer loading indikator ke- i , dan k = jumlah indikator dalam konstruk

Validitas konvergen dievaluasi menggunakan AVE, sedangkan validitas diskriminan diperiksa melalui HTMT dan, sebagai pemeriksaan komplementer, kriteria Fornell–Larcker. AVE $\geq 0,50$ menunjukkan konstruk menjelaskan setidaknya separuh varians indikatornya. HTMT mengacu pada Henseler et al. (2015), sedangkan Fornell–Larcker mengacu pada Fornell dan Larcker (1981).

Nilai AVE dihitung menggunakan persamaan (5) berikut.

$$AVE = \frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i^2}{k} \quad (5)$$

dengan, AVE = Average Variance Extracted, λ_i = outer loading indikator ke-I, k = jumlah indikator dalam konstruk. Validitas diskriminan dievaluasi menggunakan kriteria Fornell–Larcker dan Heterotrait–Monotrait Ratio. Berdasarkan kriteria Fornell–Larcker, akar kuadrat AVE suatu konstruk harus lebih tinggi daripada korelasinya dengan konstruk lain. Kriteria tersebut menunjukkan bahwa konstruk lebih banyak menjelaskan indikatornya sendiri dibandingkan konstruk lain. HTMT digunakan sebagai pengujian tambahan untuk menilai tingkat kesamaan empiris antarkonstruk. Nilai HTMT di bawah 0,85 digunakan sebagai batas konservatif dalam penelitian ini.

Nilai HTMT secara konseptual dihitung menggunakan persamaan (6) berikut.

$$HTMT_{ab} = \frac{\text{mean}(|r_{ij}|, i \in a, j \in b)}{\sqrt{\text{mean}(|r_{ij}|, i, j \in a) \text{mean}(|r_{ij}|, i, j \in b)}} \quad (6)$$

dengan, $HTMT_{ab}$ = rasio HTMT antara konstruk a dan b, r_{ij} = korelasi antara dua indikator, dan, a, b = konstruk yang dibandingkan.

I. Evaluasi Model Struktural

Structural model diperiksa melalui VIF, koefisien jalur, R^2 , adjusted R^2 , f^2 , confidence interval, dan predictive assessment. Interpretasi tidak hanya mempertimbangkan p-value, tetapi juga arah dan besarnya estimasi, uncertainty, effect size, serta relevansi prediktif (Hair et al., 2019, 2022). VIF dihitung menggunakan persamaan (7) berikut.

$$VIF_j = \frac{1}{1 - R_j^2} \quad (7)$$

dengan, VIF_j = Variance Inflation Factor konstruk ke-j, R_j^2 = koefisien determinasi ketika konstruk ke-j diregresikan terhadap konstruk eksogen lainnya. Kemampuan penjelasan model dievaluasi menggunakan koefisien determinasi. Nilai R^2 menunjukkan proporsi variasi konstruk endogen yang dapat dijelaskan oleh konstruk eksogen. Nilai yang lebih tinggi menunjukkan kemampuan penjelasan yang lebih besar, tetapi interpretasinya tetap harus mempertimbangkan konteks penelitian. Adjusted R^2 juga dilaporkan untuk memperhitungkan jumlah konstruk prediktor yang digunakan. Model tidak dinilai hanya berdasarkan besarnya R^2 , tetapi juga berdasarkan signifikansi jalur dan relevansi prediktif. Koefisien determinasi dihitung menggunakan persamaan (8) sebagai berikut ini:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (8)$$

dengan, y_i = nilai aktual konstruk endogen, $\hat{y}_i$ = nilai prediksi konstruk endogen, $\bar{y}$ = nilai rata-rata konstruk endogen, dan n = jumlah observasi.

Ukuran efek f^2 digunakan untuk menilai perubahan kemampuan penjelasan model apabila satu konstruk eksogen dikeluarkan. Nilai f^2 sekitar 0,02 dikategorikan sebagai efek kecil, 0,15 sebagai efek sedang, dan 0,35 sebagai efek besar. Analisis ini membantu membedakan signifikansi statistik dari kontribusi praktis suatu konstruk. Konstruk dapat memiliki hubungan signifikan tetapi menghasilkan ukuran efek yang relatif kecil. Oleh karena itu, interpretasi koefisien jalur perlu disertai nilai f^2 . Ukuran efek dihitung menggunakan persamaan (9) berikut.

$$f^2 = \frac{R_{\text{included}}^2 - R_{\text{excluded}}^2}{1 - R_{\text{included}}^2} \quad (9)$$

Ukuran efek f^2 membandingkan perubahan R^2 ketika suatu prediktor dikeluarkan. $Q^2_{\text{predict/PLS}_{\text{predict}}}$ digunakan untuk menilai kemampuan prediktif di luar sampel sesuai Shmueli et al. (2019). Pada dataset sintetis, kedua ukuran hanya menunjukkan bahwa pipeline analitis berjalan; validitas prediktif terhadap kontraktor nyata harus diuji kembali menggunakan data empiris. Q^2_{predict} dihitung menggunakan persamaan (10) berikut ini:

$$Q^2_{\text{predict}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_{i,\text{out}})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_{\text{train}})^2} \quad (10)$$

dengan y_i = nilai aktual, $\hat{y}_{i,\text{out}}$ = nilai prediksi di luar sampel, dan $\bar{y}_{\text{train}}$ = rata-rata nilai pada data pelatihan.

J. Pengujian Hipotesis dan Bootstrapping

Bootstrapping 5.000 subsampel digunakan dalam demonstrasi untuk menghasilkan standard error, t-statistic, p-value, dan confidence interval. Pada studi empiris, keputusan hipotesis didasarkan pada hasil bootstrapping data aktual dan dilaporkan bersama effect size dan interval kepercayaan. Pada prototipe ini, istilah 'signifikan secara statistik' hanya merujuk pada perilaku dataset simulasi dan tidak diperlakukan sebagai bukti fenomena lapangan.

Nilai t-statistic dihitung menggunakan persamaan (11) berikut ini.

$$t = \frac{\beta}{SE_{\text{bootstrap}}} \quad (11)$$

dengan, t = t-statistic, β = koefisien jalur, $SE_{\text{bootstrap}}$ = standard error hasil bootstrapping.

Interpretasi empiris tidak boleh berhenti pada p-value. Koefisien jalur, interval kepercayaan, f^2 , R^2 , predictive performance, potensi common-method bias, representativitas sampel, dan ketergantungan observasi pada tingkat perusahaan harus dipertimbangkan secara bersama-sama (Hair et al., 2019; Kock, 2015).

K. Tahapan Penelitian

Tahapan prototipe terdiri atas sintesis literatur, perumusan konstruk dan indikator, spesifikasi model, pembentukan test bench sintetis, serta demonstrasi seluruh prosedur PLS-SEM. Tahap validasi empiris berikutnya harus dimulai dengan content validation dan pilot test, penyusunan sampling frame BUJK berkualifikasi menengah, power analysis a priori, rekrutmen key informant, pencatatan company ID, pembersihan data, dan estimasi ulang model menggunakan data survei aktual. Dengan desain dua-tahap tersebut, prototipe berfungsi sebagai analytical pretest. Hasil simulasi hanya digunakan untuk memeriksa kelengkapan prosedur, sedangkan penjelasan mengenai faktor yang memengaruhi kesiapan transformasi digital baru dapat diberikan setelah validasi lapangan selesai.

IV. HASIL DEMONSTRASI ANALITIS DAN DISKUSI METODOLOGIS

A. Karakteristik Dataset Sintetis

Demonstrasi analitis pada bagian ini menggunakan 210 observasi sintetis dan 20 indikator. Seluruh angka dan data yang disajikan merupakan keluaran dari dataset simulasi yang dirancang khusus untuk mendemonstrasikan metode, sehingga bukan merupakan bukti empiris mengenai kontraktor aktual. Variabel jabatan, pengalaman kerja, usia perusahaan, jumlah tenaga kerja, serta tingkat penggunaan teknologi pada Tabel 4 merupakan atribut simulasi yang sengaja dibuat untuk menguji format analisis; atribut-atribut tersebut tidak berasal dari responden aktual dan tidak menggambarkan distribusi kontraktor di Indonesia.

Tabel 4. Distribusi observasi sintetis untuk demonstrasi analitis (bukan responden aktual)

Karakteristik	Kategori	Frekuensi	Persentase (%)
Jabatan	Direktur/pemilik	36	17,1
	Manajer proyek	58	27,6
	Manajer lapangan/engineer	54	25,7
	Manajer operasional/TI	34	16,2
	Estimator/pengadaan/administrasi	28	13,3
Pengalaman kerja	<5 tahun	31	14,8
	5–10 tahun	68	32,4
	11–15 tahun	61	29,0
	>15 tahun	50	23,8
Usia perusahaan	<5 tahun	24	11,4
	5–10 tahun	57	27,1
	11–20 tahun	80	38,1
	>20 tahun	49	23,3
Jumlah tenaga kerja	50–99 orang	49	23,3
	100–199 orang	83	39,5
	200–299 orang	51	24,3
	≥300 orang	27	12,9
Tingkat penggunaan teknologi digital	Dasar	41	19,5
	Menengah	101	48,1
	Lanjut	68	32,4

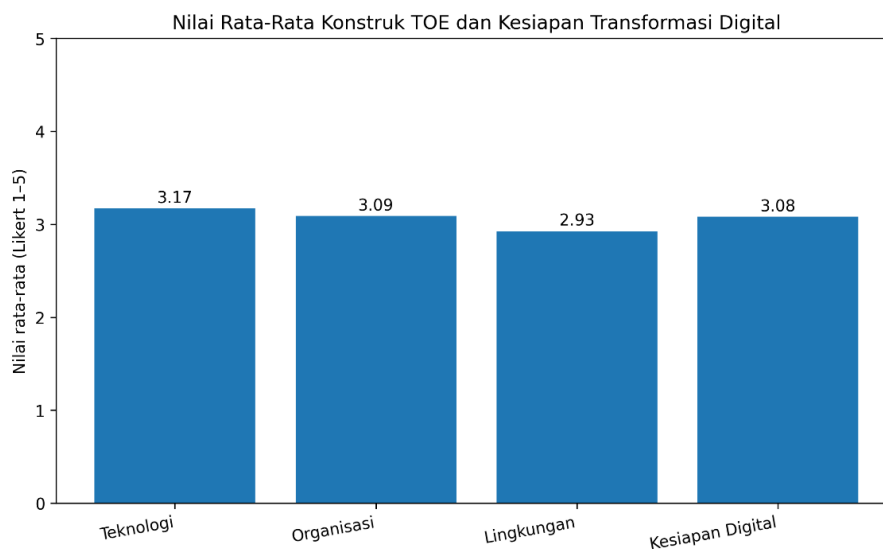
B. Statistik Deskriptif Dataset Sintetis

Rata-rata konstruk sintetis berada pada rentang 2,927–3,171. Angka tersebut merupakan karakteristik dataset simulasi dan tidak boleh digunakan untuk menyatakan bahwa Technology lebih siap, Environment lebih lemah, atau tingkat kesiapan kontraktor berada pada kategori tertentu. Fungsi statistik deskriptif di sini hanya untuk memeriksa rentang, variasi, dan konsistensi data sebelum estimasi.

Tabel 5. Statistik deskriptif konstruk pada dataset sintetis

Konstruk	Kode	Minimum	Maksimum	Rata-rata	Simpangan baku
Technology	TEC	1,00	5,00	3,171	1,056
Organization	ORG	1,00	5,00	3,089	1,027
Environment	ENV	1,00	5,00	2,927	0,967
Digital Transformation Readiness	DTR	1,00	5,00	3,080	1,069

Gambar 1 memvisualisasikan mean dari data sintetis. Perbedaan antarkonstruk pada gambar merupakan bagian dari skenario simulasi, bukan temuan mengenai kondisi industri. Pada replikasi empiris, grafik wajib dibuat ulang dari data survei aktual.



Gambar 1. Nilai rata-rata konstruk pada dataset sintetis (demonstrasi)

C. Evaluasi Model Pengukuran pada Dataset Sintetis

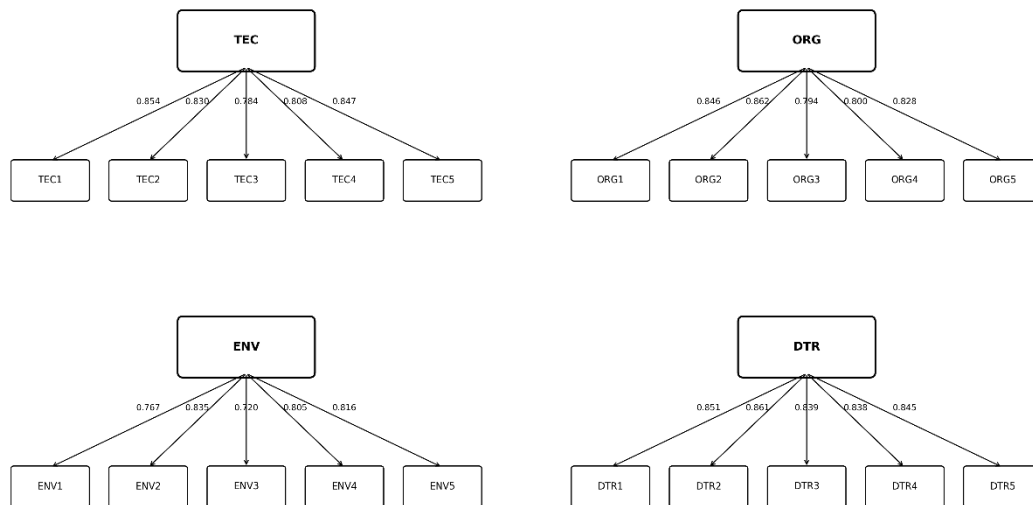
Evaluasi measurement model menghasilkan outer loading 0,720–0,862. Karena korelasi data dibentuk untuk test bench, terpenuhinya kriteria loading hanya menunjukkan bahwa konfigurasi model dan prosedur estimasi berjalan sesuai spesifikasi. Hasil ini tidak membuktikan validitas instrumen pada populasi kontraktor.

Tabel 6. Outer loading pada dataset sintetis

Konstruk	Indikator	Outer loading	Keputusan
Technology	TEC1	0,854	Dipertahankan

	TEC2	0,830	Dipertahankan
	TEC3	0,784	Dipertahankan
	TEC4	0,808	Dipertahankan
	TEC5	0,847	Dipertahankan
Organization	ORG1	0,846	Dipertahankan
	ORG2	0,862	Dipertahankan
	ORG3	0,794	Dipertahankan
	ORG4	0,800	Dipertahankan
	ORG5	0,828	Dipertahankan
Environment	ENV1	0,767	Dipertahankan
	ENV2	0,835	Dipertahankan
	ENV3	0,720	Dipertahankan
	ENV4	0,805	Dipertahankan
	ENV5	0,816	Dipertahankan
Digital Transformation Readiness	DTR1	0,851	Dipertahankan
	DTR2	0,861	Dipertahankan
	DTR3	0,839	Dipertahankan
	DTR4	0,838	Dipertahankan
	DTR5	0,845	Dipertahankan

Seluruh indikator dipertahankan dalam demonstrasi karena loading berada di atas pedoman 0,70. Keputusan indikator pada studi lapangan harus dibuat ulang berdasarkan data aktual, validasi isi, reliabilitas, convergent validity, discriminant validity, dan pertimbangan teoritis; hasil sintetis tidak boleh digunakan sebagai dasar mempertahankan butir.



Gambar 2. Measurement model pada dataset sintetis

Cronbach's Alpha, Composite Reliability, dan AVE pada dataset sintetis memenuhi pedoman umum PLS-SEM. Nilai-nilai tersebut berfungsi sebagai verification check terhadap implementasi pipeline, bukan bukti bahwa instrumen telah reliabel dan valid pada responden nyata.

Tabel 7. Reliabilitas dan validitas konvergen pada dataset sintetis

Konstruk	Cronbach's Alpha	Composite Reliability	AVE	Kesimpulan
----------	------------------	-----------------------	-----	------------

Technology	0,882	0,914	0,681	Reliabel dan valid
Organization	0,883	0,915	0,683	Reliabel dan valid
Environment	0,849	0,892	0,624	Reliabel dan valid
Digital Transformation Readiness	0,901	0,927	0,717	Reliabel dan valid

Kriteria Fornell–Larcker pada data simulasi juga terpenuhi. Interpretasi dibatasi pada kemampuan dataset sintesis menghasilkan pemisahan konstruk yang sesuai dengan desain simulasi. Hasil ini tidak menggantikan pengujian discriminant validity pada data lapangan. HTMT berada di bawah batas yang digunakan dalam prototipe. Seperti ukuran measurement model lainnya, nilai ini merupakan konsekuensi dari struktur data simulasi dan hanya mengonfirmasi bahwa prosedur perhitungan HTMT berhasil dijalankan.

Tabel 8. Fornell–Larcker pada dataset sintesis

Konstruk	TEC	ORG	ENV	DTR
TEC	0,825			
ORG	0,386	0,826		
ENV	0,267	0,354	0,790	
DTR	0,541	0,613	0,436	0,847

Keterangan: nilai pada diagonal bercetak tebal merupakan akar kuadrat AVE.

Tidak dibuat inferensi bahwa kedekatan Organization dengan DTR mencerminkan kondisi aktual. Korelasi dan HTMT dalam prototipe digunakan untuk memeriksa apakah konstruk dapat diproses secara terpisah oleh pipeline PLS-SEM.

Tabel 9. HTMT pada dataset sintesis

Pasangan konstruk	HTMT	Kesimpulan
TEC–ORG	0,436	Memenuhi
TEC–ENV	0,308	Memenuhi
TEC–DTR	0,606	Memenuhi
ORG–ENV	0,409	Memenuhi
ORG–DTR	0,685	Memenuhi
ENV–DTR	0,498	Memenuhi

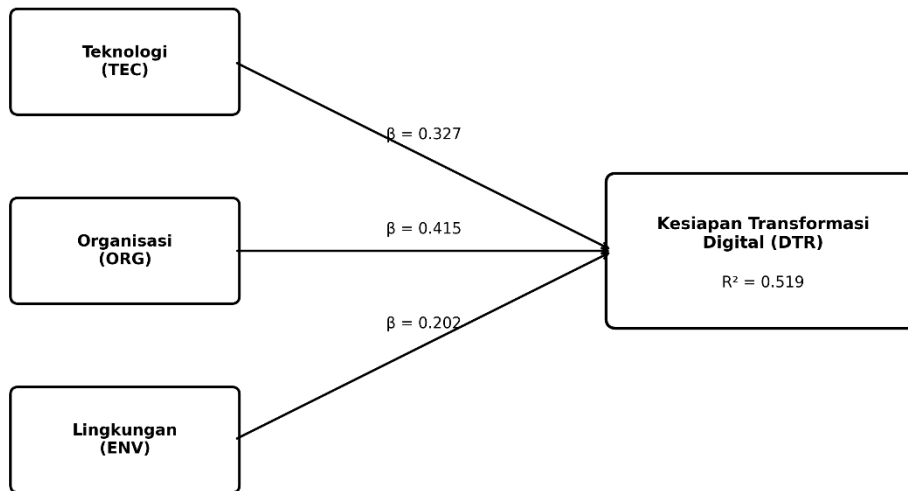
D. Evaluasi Model Struktural pada Dataset Sintesis

VIF, R^2 , adjusted R^2 , dan Q^2_{predict} pada Tabel 10 adalah keluaran simulasi. $R^2=0,519$ tidak diartikan bahwa TOE menjelaskan 51,9% kesiapan kontraktor nyata; $Q^2_{\text{predict}}=0,498$ juga tidak membuktikan kemampuan prediksi terhadap perusahaan di luar dataset simulasi. Keduanya hanya menunjukkan bahwa seluruh tahap structural-model assessment dapat dihitung dari struktur prototipe.

Tabel 10. Inner-model diagnostics pada dataset sintesis

Parameter	Konstruk atau hubungan	Nilai	Interpretasi
VIF	TEC → DTR	1,203	Tidak terdapat kolinearitas kritis
VIF	ORG → DTR	1,277	Tidak terdapat kolinearitas kritis
VIF	ENV → DTR	1,170	Tidak terdapat kolinearitas kritis

R ²	DTR	0,519	Daya jelas moderat
Adjusted R ²	DTR	0,512	Daya jelas moderat
Q ² predict	DTR	0,498	Relevansi prediktif positif



Gambar 3. Structural model pada dataset sintesis

Bootstrapping 5.000 subsampel pada data sintesis menghasilkan koefisien dan p-value pada Tabel 11. Nilai $\text{Technology} \rightarrow \text{DTR} = 0,327$, $\text{Organization} \rightarrow \text{DTR} = 0,415$, dan $\text{Environment} \rightarrow \text{DTR} = 0,202$ tidak diperlakukan sebagai estimasi populasi. Karena hubungan antarkonstruksi telah dipengaruhi oleh proses pembentukan data, keputusan hipotesis dari simulasi tidak mempunyai status sebagai evidence empiris.

Persamaan struktural yang dihasilkan hanya mendeskripsikan skenario simulasi. Koefisien tidak digunakan untuk menyusun urutan prioritas, menyatakan determinan dominan, atau menggeneralisasi hubungan TOE pada kontraktor skala menengah.

$$DTR = 0,327 TEC + 0,415 ORG + 0,202 ENV + \zeta$$

Dengan demikian, label 'didukung' pada hipotesis dalam versi sebelumnya tidak dipertahankan sebagai kesimpulan substantif. Pada artikel prototipe, H1–H3 diposisikan sebagai hipotesis yang akan diuji pada fase empiris.

Tabel 11. Bootstrapping pada dataset sintesis (demonstrasi; bukan uji hipotesis empiris)

Hipotesis	Jalur	Koefisien jalur	Standard error	t-statistic	p-value	Interval kepercayaan 95%	Keputusan
H1	TEC → DTR	0,327	0,054	6,022	<0,001	0,219–0,434	Didukung
H2	ORG → DTR	0,415	0,056	7,405	<0,001	0,304–0,526	Didukung
H3	ENV → DTR	0,202	0,054	3,777	<0,001	0,097–0,310	Didukung

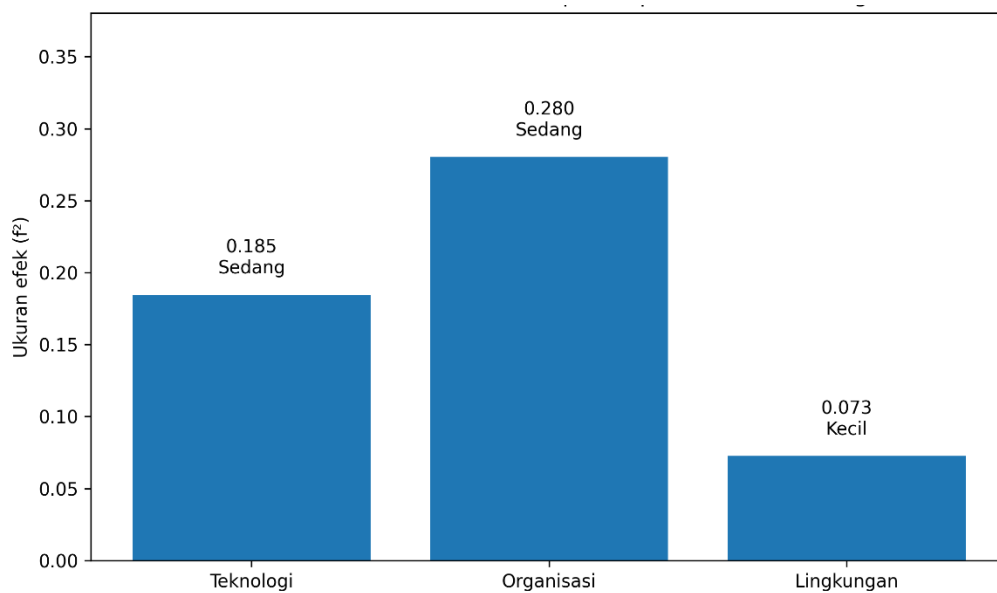
E. Effect Size pada Dataset Sintesis

Nilai f^2 pada dataset sintetis digunakan untuk mendemonstrasikan cara mengevaluasi kontribusi relatif prediktor. Kategori kecil, sedang, atau besar hanya berlaku pada skenario simulasi dan tidak menjadi dasar rekomendasi manajerial.

Tabel 12. Effect size pada dataset sintetis

Konstruk eksogen	Konstruk endogen	f^2	Kategori efek	Peringkat
Organization	DTR	0,280	Sedang	1
Technology	DTR	0,185	Sedang	2
Environment	DTR	0,073	Kecil	3

Perbedaan f^2 antar konstruk menunjukkan bahwa pipeline dapat membedakan perubahan R^2 ketika prediktor dikeluarkan. Namun, urutan tersebut tidak boleh diterjemahkan menjadi prioritas intervensi bagi kontraktor sebelum model divalidasi dengan data aktual.



Gambar 4. Perbandingan effect size pada dataset sintetis

F. Diskusi Metodologis

Apa yang Dapat dan Tidak Dapat Disimpulkan dari Prototype

Prototype berhasil menunjukkan bahwa model empat konstruk dan 20 indikator dapat diimplementasikan dalam alur PLS-SEM yang mencakup outer loading, internal consistency, AVE, HTMT, VIF, R^2 , f^2 , bootstrapping, dan predictive assessment. Ini merupakan kontribusi prosedural: format data, spesifikasi model, dan rangkaian analisis dapat direplikasi pada data lapangan. Sebaliknya, prototype tidak memberikan bukti tentang tingkat kesiapan kontraktor, kekuatan aktual hubungan Technology, Organization, dan Environment terhadap DTR, atau signifikansi statistik pada populasi. Henseler et al. (2015), Hair et al. (2019, 2022), dan Shmueli et al. (2019) menyediakan kriteria evaluasi analitis, tetapi validitas inferensi tetap bergantung pada kualitas instrumen, sampling, dan data empiris.

Pemisahan antara analytical verification dan empirical validation penting untuk mencegah circular evidence. Jika korelasi indikator dirancang agar menghasilkan pola tertentu, maka reliabilitas, validitas, dan jalur struktural yang muncul tidak dapat digunakan untuk membuktikan teori yang sama yang digunakan saat membentuk data.

Kesesuaian Model dengan Literatur

Struktur TOE yang digunakan tetap memiliki landasan konseptual. Tornatzky dan Fleischer (1990) menyediakan kerangka dasar; Ahuja et al. (2016) dan Chen et al. (2019) menunjukkan penerapan TOE pada adopsi BIM; Silva et al. (2022), Machado et al. (2021), dan Wang et al. (2026) menekankan organizational readiness; sedangkan Naji et al. (2024), Nguyen et al. (2024), Statsenko et al. (2023), van der Heijden (2023), dan Nozari et al. (2026) memperlihatkan bahwa transformasi digital konstruksi melibatkan faktor teknis dan nonteknis. Literatur tersebut mendukung model konseptual, tetapi tidak menentukan hasil empiris sebelumnya.

Karena itu, hipotesis tetap bersifat directional expectations untuk diuji. Apakah Organization, Technology, atau Environment memiliki pengaruh lebih besar harus ditentukan dari data aktual, confidence interval, effect size, dan predictive performance, bukan dari dataset yang pola korelasinya telah diatur. Pendekatan ini juga menghindari interpretasi berlebihan terhadap output simulasi dan menjaga konsistensi antara objective, data, analysis, results, dan conclusion sebagaimana disyaratkan untuk studi metodologis.

Hasil penelitian juga konsisten dengan berbagai kendala digitalisasi yang ditemukan pada sektor konstruksi. Van Tam et al. (2024) mengidentifikasi biaya perangkat keras dan perangkat lunak, keterbatasan data pasar untuk integrasi teknologi, kekhawatiran keamanan, serta ketiadaan praktik dan pedoman yang terstandar sebagai hambatan penting digitalisasi konstruksi. Hambatan tersebut berkaitan langsung dengan indikator kesiapan infrastruktur, integrasi, dan keamanan yang digunakan dalam konstruk Technology. Kontraktor yang tidak memiliki arsitektur teknologi yang jelas berisiko menerapkan aplikasi secara terpisah tanpa menghasilkan aliran informasi yang konsisten. Dengan demikian, investasi teknologi perlu diawali pemetaan kebutuhan proses dan kemampuan integrasi sistem.

Rancangan Validasi Lapangan

Validasi empiris harus menggunakan BUJK berkualifikasi menengah yang terverifikasi dalam sampling frame. Peneliti perlu mendokumentasikan wilayah/cakupan survei, jumlah perusahaan pada frame, jumlah perusahaan yang dihubungi, kanal rekrutmen, jumlah respons masuk, respons yang dikeluarkan, respons valid, dan response rate. Satu key informant per perusahaan menjadi desain utama agar unit observasi sejalan dengan unit analisis. Jika terdapat lebih dari satu

informan dari perusahaan yang sama, company ID wajib dipertahankan; agreement antarresponden perlu diperiksa sebelum agregasi, atau dependency harus ditangani menggunakan pendekatan cluster-aware/multilevel yang sesuai.

Jumlah sampel ditentukan melalui power analysis a priori. Nilai minimum dari G*Power hanya menjadi batas statistik awal; target rekrutmen harus mempertimbangkan non-response dan stabilitas estimasi PLS-SEM. Setelah data aktual tersedia, seluruh outer loading, reliability, AVE, HTMT, VIF, R^2 , $Q^2_{predict}$, path coefficients, confidence intervals, p-values, dan f^2 dihitung ulang. Untuk meningkatkan kualitas pengukuran, instrumen harus menyelesaikan content validation dan pilot test sebelum survei utama. Selain itu, common-method bias perlu diperiksa karena konstruk eksogen dan endogen diukur melalui kuesioner yang sama (Kock, 2015). Hanya setelah seluruh prosedur tersebut selesai, penelitian dapat beralih dari methodological prototype menjadi empirical study dan membahas implikasi manajerial berdasarkan bukti lapangan.

Keterbatasan dan Batas Inferensi

Keterbatasan utama adalah tidak adanya data empiris. Dataset sintetis dirancang dari asumsi teoritis sehingga tidak dapat mengestimasi parameter populasi, prevalensi, distribusi responden, atau hubungan kausal pada kontraktor aktual. Keterbatasan kedua adalah instrumen belum menyelesaikan content validation dan pilot test. Karena itu, pemenuhan reliabilitas dan validitas pada data simulasi tidak boleh digunakan untuk menyatakan bahwa alat ukur telah tervalidasi secara empiris. Keterbatasan ketiga adalah belum adanya informasi response rate, non-response bias, dan clustering karena belum ada proses rekrutmen perusahaan aktual. Ketiga aspek tersebut menjadi persyaratan wajib pada fase lapangan.

Arah Penelitian Empiris

Tahap berikutnya adalah mengumpulkan data survei aktual sesuai sampling frame BUJK berkualifikasi menengah. Analisis akan mempertahankan model TOE yang sama agar hasil empiris dapat dibandingkan dengan analytical prototype tanpa membawa nilai numerik sintetis. Studi empiris juga dapat menambahkan variabel kontrol seperti usia perusahaan, ukuran tenaga kerja, jenis proyek, dan tingkat penggunaan teknologi, tetapi variabel tersebut harus berasal dari responden/perusahaan nyata.

Kontribusi Teoretis yang Dibatasi

Kontribusi teoretis versi ini terbatas pada penyusunan model konseptual yang menghubungkan TOE dengan Digital Transformation Readiness. Artikel tidak mengklaim mendukung, menolak, atau memperluas teori berdasarkan hubungan numerik simulasi.

Nilai teoretis yang lebih kuat baru dapat dinilai setelah model diuji pada data aktual dan hasilnya dibandingkan dengan Ahuja et al. (2016), Chen et al. (2019), Silva et al. (2022), Machado et al. (2021), dan Wang et al. (2026).

Implikasi Praktis

Versi prototipe tidak memberikan urutan prioritas investasi atau roadmap spesifik kepada kontraktor. Rekomendasi seperti memprioritaskan Organization, Technology, atau Environment akan menjadi premature karena berasal dari data sintetis.

Manfaat praktis saat ini adalah menyediakan template assessment dan prosedur analisis yang dapat digunakan pada survei lapangan setelah instrumen tervalidasi.

Rekomendasi manajerial baru boleh dirumuskan berdasarkan koefisien, effect size, interval kepercayaan, predictive performance, dan distribusi karakteristik perusahaan yang benar-benar diamati.

Konsistensi dengan Penelitian Terdahulu

Literatur terdahulu digunakan untuk menyusun konstruk dan hipotesis, bukan untuk memvalidasi output sintetis. Adanya pola numerik yang tampak sejalan dengan penelitian sebelumnya tidak dianggap sebagai replikasi karena data tidak berasal dari fenomena yang diamati.

Dengan framing ini, perbandingan dengan literatur difokuskan pada kesesuaian struktur konseptual dan prosedur, sementara perbandingan effect magnitude ditunda sampai hasil survei aktual tersedia.

Keterbatasan Penelitian

Artikel ini adalah methodological prototype dan tidak mempunyai validitas eksternal terhadap kontraktor aktual. Tidak terdapat populasi terobservasi, response rate, atau distribusi perusahaan empiris pada dataset sintetis.

V. KESIMPULAN DAN RENCANA VALIDASI EMPIRIS

Artikel ini mengembangkan prototipe TOE-PLS-SEM untuk kesiapan transformasi digital kontraktor skala menengah. Dataset sintetis 210 observasi berhasil digunakan untuk mendemonstrasikan alur analisis measurement model, structural model, bootstrapping, effect size, dan predictive assessment. Namun, keberhasilan prosedural tersebut tidak merupakan bukti empiris. Tidak ada kesimpulan bahwa Organization merupakan determinan terkuat, Environment memiliki efek kecil, atau model menjelaskan 51,9% kesiapan kontraktor nyata. Nilai-nilai tersebut hanya menggambarkan skenario simulasi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] D. Arya, H. Maeda, S. K. Ghosh, D. Toshniwal, A. Mraz, T. Kashiya, and Y. Sekimoto, "Deep Learning-Based Road Damage Detection and Classification for Multiple Countries," *Automation in Construction*, vol. 132, p. 103935, Dec. 2021. doi: 10.1016/j.autcon.2021.103935.
- [2] H. Chen and X. Chen, "Real-Time Road Damage Detection Based on an Improved YOLOv8 Network," *Sensors*, vol. 23, no. 18, p. 7890, Sep. 2023. doi: 10.3390/s23187890.
- [3] Y. Liu and Z. Xu, "YOLO-LWNet: A Lightweight Road Damage Object Detection Network for Mobile Terminal Devices," *Sensors*, vol. 23, no. 6, p. 3268, Mar. 2023. doi: 10.3390/s23063268.
- [4] A. Ashraf, A. Sophian, and A. A. Bawono, "Crack Detection, Classification, and Segmentation on Road Pavement Material Using Multi-Scale Feature Aggregation and Transformer-Based Attention Mechanisms," *Constr. Mater.*, vol. 4, no. 4, pp. 655–675, 2024, doi: 10.3390/constrmater4040036.
- [5] Y. Xu, Y. Xia, Q. Zhao, K. Yang, and Q. Li, "A Road Crack Segmentation Method Based on Transformer and Multi-Scale Feature Fusion," *Electronics*, vol. 13, no. 12, p. 2257, 2024, doi: 10.3390/electronics13122257.
- [6] X. Zhao and R. Li, "YOLO-RD: A Road Damage Detection Method for Effective Road Surface Monitoring," *Sensors*, vol. 25, no. 5, p. 1442, Feb. 2025. doi: 10.3390/s25051442.
- [7] S. Park and H. Kim, "A Pavement Crack Detection and Evaluation Framework for UAV Inspection," *Applied Sciences*, vol. 14, no. 3, p. 1157, Jan. 2024. doi: 10.3390/app14031157.
- [8] F. Samadzadegan, F. Dadrass Javan, F. Ashtari Mahini, M. Gholamshahi, and F. Nex, "Automatic Road Pavement Distress Recognition Using Deep Learning Networks from Unmanned Aerial Imagery," *Drones*, vol. 8, no. 6, p. 244, 2024, doi: 10.3390/drones8060244.
- [9] S. Alqaydi, W. Zeiada, A. El Wakil, A. J. Alnaqbi, and A. Azam, "A Comprehensive Review of Smartphone and Other Device-Based Techniques for Road Surface Monitoring," *Eng*, vol. 5, no. 4, pp. 3397–3426, 2024, doi: 10.3390/eng5040177.
- [10] A. A. Sami, S. Sakib, and I. H. Sarker, "Improved YOLOv5-Based Real-Time Road Pavement Damage Detection in Road Infrastructure Management," *Algorithms*, vol. 16, no. 9, p. 452, Sep. 2023. doi: 10.3390/a16090452.
- [11] M. Kardoš, I. Sačkov, J. Tomašík, I. Basista, Ł. Borowski, and M. Ferenčík, "Elevation Accuracy of Forest Road Maps Derived from Aerial Imaging, Airborne Laser Scanning and Mobile Laser Scanning Data," *Forests*, vol. 15, no. 5, p. 840, 2024, doi: 10.3390/f15050840.
- [12] Y. Chen, L. Li, H. Cheng, and C. He, "Pavement Crack Identification in UAV Images Based on Joint Context Information," *Appl. Sci.*, vol. 16, no. 7, p. 3371, 2026, doi:

10.3390/app16073371.

- [13] J. Cha, S. Lee, and H.-K. Kim, "Deep Learning-Based Detection and Assessment of Road Damage Caused by Disaster with Satellite Imagery," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 14, p. 7669, 2025, doi: 10.3390/app15147669.
- [14] P. Wang *et al.*, "Research on Automatic Pavement Crack Recognition Based on the Mask R-CNN Model," *Coatings*, vol. 13, no. 2, p. 430, 2023, doi: 10.3390/coatings13020430.
- [15] A. A. Sami, S. Sakib, K. Deb, and I. H. Sarker, "Improved YOLOv5-Based Real-Time Road Pavement Damage Detection in Road Infrastructure Management," *Algorithms*, vol. 16, no. 9, p. 452, 2023, doi: 10.3390/a16090452.
- [16] Y. Fan, Q. Li, Y. Chen, Z. Yao, Y. Sun, and W. Zhang, "DAH-YOLO: An Accurate and Efficient Model for Crack Detection in Complex Scenarios," *Appl. Sci.*, vol. 16, no. 2, p. 900, 2026, doi: 10.3390/app16020900.
- [17] H. Yang, Y. Song, Y. Liang, E. Tang, and D. Cao, "SDC-YOLOv8: An Improved Algorithm for Road Defect Detection Through Attention-Enhanced Feature Learning and Adaptive Feature Reconstruction," *Sensors*, vol. 26, no. 2, p. 609, 2026, doi: 10.3390/s26020609.
- [18] M. Li and J. Yang, "Automatic Pavement Crack Classification and Quantification Using YOLOv8 with Attention Mechanisms," *Buildings*, vol. 13, no. 8, p. 2011, Aug. 2023. doi: 10.3390/buildings13082011.
- [19] A.-P. Botezatu, A. Burlacu, and C. Orhei, "A Review of Deep Learning Advancements in Road Analysis for Autonomous Driving," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 11, p. 4705, 2024, doi: 10.3390/app14114705.
- [20] Y. Li, C. Yin, Y. Lei, J. Zhang, and Y. Yan, "RDD-YOLO: Road Damage Detection Algorithm Based on Improved You Only Look Once Version 8," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 8, p. 3360, 2024, doi: 10.3390/app14083360.
- [21] H. Yoon, H.-K. Kim, and S. Kim, "PPDD: Egocentric Crack Segmentation in the Port Pavement with Deep Learning-Based Methods," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 10, p. 5446, 2025, doi: 10.3390/app15105446.
- [22] Z. Tian, X. Shao, Y. Bai, Q. Zhang, Z. Wang, and Y. Ji, "A Symmetry-Aware Hierarchical Graph-Mamba Network for Spatio-Temporal Road Damage Detection," *Symmetry (Basel)*, vol. 17, no. 12, p. 2173, 2025, doi: 10.3390/sym17122173.
- [23] Y. Jiang and S. Liu, "Enhanced Feature Aggregation Network for Multi-Class Road Damage Detection," *Sensors*, vol. 23, no. 16, p. 7120, Aug. 2023. doi: 10.3390/s23167120.
- [24] Y. Jiang, H. Yan, Y. Zhang, K. Wu, R. Liu, and C. Lin, "RDD-YOLOv5: Road Defect Detection Algorithm with Self-Attention Based on Unmanned Aerial Vehicle Inspection," *Sensors*, vol. 23, no. 19, p. 8241, 2023, doi: 10.3390/s23198241.
- [25] X. Wang, H. Gao, Z. Jia, and Z. Li, "BL-YOLOv8: An Improved Road Defect Detection

Model Based on YOLOv8," *Sensors*, vol. 23, no. 20, p. 8361, 2023, doi: 10.3390/s23208361.

- [26] P. Xu and Y. Huang, "Real-Time Asphalt Pavement Damage Detection Based on Edge Computing and Optimized YOLO Architecture," *Infrastructures*, vol. 8, no. 4, p. 72, Apr. 2023. doi: 10.3390/infrastructures8040072.
- [27] Y. Ren and Z. Zhao, "YOLO-Based Lightweight Detection Model for Road Surface Damage in Edge Devices," *Sensors*, vol. 23, no. 13, p. 5988, Jul. 2023. doi: 10.3390/s23135988.