

INTEGRASI BIM-IOT DALAM KONSTRUKSI INDONESIA: ANALISIS STUDI KASUS KOMPARATIF

I Kadek Badradnyana Wirapraja Mahatama*, I Putu Ari Sanjaya

Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Udayana, Jimbaran, Bali, Indonesia

*Email: ikbwmmahatama@unud.ac.id

ABSTRAK

Building Information Modeling (BIM) telah menjadi standar global dalam industri konstruksi dengan manfaat peningkatan efisiensi 30–50% dan pengurangan biaya signifikan, namun Indonesia menghadapi paradoks adopsi di mana kesadaran tinggi (67–72%) tidak sebanding dengan implementasi yang masih rendah (38%), sehingga menciptakan kesenjangan sekitar 30% meskipun regulasi telah diberlakukan sejak 2018. *Systematic literature review* ini bertujuan menganalisis tingkat kematangan BIM di Indonesia, mengidentifikasi faktor *Technology–Organization–Environment* (TOE) yang memengaruhi kesiapan integrasi BIM–IoT, menentukan tingkat minimum BIM untuk integrasi *Digital Twin*, serta mengevaluasi *maturity assessment framework* yang relevan. Mengikuti pedoman PRISMA 2020, sebanyak 123 artikel *peer-reviewed* (41,5% dari jurnal Q1) periode 2013–2025 dianalisis menggunakan kerangka TOE dan *BIM Maturity Matrix* dari Succar. Hasil menunjukkan kematangan BIM Indonesia masih didominasi Level 1 (38,2%) dengan hanya 11,8% mencapai Level 2, sementara dari 527 kemunculan faktor TOE, hambatan jauh lebih dominan (61,1%) dibandingkan pendorong (38,9%), dengan keterbatasan SDM dan keterampilan sebagai hambatan utama. Integrasi BIM–*Digital Twin* yang mendominasi tren studi global mensyaratkan minimal Level 2, yaitu ambang yang belum dicapai sebagian besar organisasi Indonesia. Selain itu, hanya dua kerangka asesmen spesifik Indonesia yang teridentifikasi, sehingga strategi ganda yang mengombinasikan penegakan kebijakan *top-down* dengan pembangunan kapasitas *bottom-up* diperlukan untuk mempercepat kesiapan integrasi BIM–IoT di Indonesia.

Kata kunci: BIM, kerangka TOE, Digital Twin, IoT, industri konstruksi

BIM-IOT INTEGRATION IN INDONESIAN CONSTRUCTION: A COMPARATIVE CASE STUDY ANALYSIS

ABSTRACT

Building Information Modeling (BIM) has become a global standard in the construction industry, delivering 30–50% efficiency improvements and significant cost reductions. However, Indonesia faces an adoption paradox where high awareness levels (67–72%) contrast sharply with low implementation rates (38%), creating a persistent gap of approximately 30 percentage points despite regulatory mandates introduced since 2018. This systematic literature review aims to assess BIM maturity levels in Indonesia, identify Technology–Organization–Environment (TOE) factors influencing BIM–IoT integration readiness, determine the minimum BIM maturity threshold required for Digital Twin integration, and evaluate maturity assessment frameworks applicable to the Indonesian context. Following PRISMA 2020 guidelines, 123 peer-reviewed studies (41.5% from Q1 journals) published between 2013–2025 were analyzed using the TOE framework combined with Succar's BIM Maturity Matrix. The findings indicate that BIM maturity in Indonesia remains predominantly at Level 1 (38.2%), with only 11.8% achieving Level 2, while across 527 TOE factor occurrences, barriers (61.1%) significantly outweighed enablers (38.9%), with human resources and skills limitations emerging as the most frequently cited barrier. BIM–Digital Twin integration, which dominates global research trajectories, requires at least Level 2 maturity, a threshold not yet reached by most Indonesian organizations. Furthermore, only two Indonesia-specific assessment frameworks were identified, i.e. highlighting the need for a dual strategy combining top-down regulatory enforcement with bottom-up capacity development to accelerate BIM–IoT integration readiness in Indonesia.

Keywords: BIM, TOE framework, Digital Twin, IoT, construction industry

1 PENDAHULUAN

Building Information Modeling (BIM), yang merupakan representasi digital karakteristik fisik dan fungsional aset untuk pengambilan keputusan sepanjang siklus hidupnya (ISO 19650, 2018), berfungsi sebagai *single source of truth* bagi seluruh pemangku kepentingan (Sopaheluwakan and Adi, 2020). Adopsi BIM global meningkat setelah Inggris menetapkan mandat BIM Level 2 untuk proyek pemerintah pada April 2016 (Cabinet Office, 2011). Bukti empiris menunjukkan bahwa BIM menghemat waktu perencanaan hingga 50%, mengurangi tenaga kerja sebesar 22–27%, memangkas biaya personel sebesar 52%, dan meningkatkan efisiensi operasional hingga 30% (Berlian et al., 2016; Sholeh et al., 2020; Baskara et al., 2025). BIM juga mempercepat penyelesaian proyek hingga 39% dan mengurangi durasi proyek sampai dengan 32,17% (Sinaga and Husin, 2021; Yudha and Mutaqi, 2025).

Indonesia mendorong adopsi BIM melalui Permen PUPR No. 22/PRT/M/2018 yang mewajibkan penerapan BIM untuk bangunan negara dengan luas >2.000 m² dan minimal 2 lantai (Sopaheluwakan and Adi, 2020), serta diperkuat oleh SE Dirjen Bina Marga No. 11/SE/Db/2021 yang mengatur implementasi BIM pada proyek infrastruktur jalan dan jembatan. Selain itu, *Roadmap* BIM 2017–2024 dirancang dalam empat fase utama, yaitu *Adoption*, *Digitalization*, *Collaboration*, dan *Integration* (Kementerian PUPR, 2017). Namun demikian, terjadi paradoks signifikan dalam praktiknya, di mana tingkat kesadaran terhadap BIM telah mencapai 67–72%, sementara implementasi aktual masih terbatas pada 38% (Sopaheluwakan and Adi, 2020; Lembaga and Nurdiah, 2025), sehingga menciptakan kesenjangan sebesar 29–34%. Paradoks ini didefinisikan sebagai kondisi ketika bukti efisiensi BIM sangat kuat, tetapi adopsinya tetap berjalan lambat dan terfragmentasi (Mahatama et al., 2025). Fenomena serupa juga dialami oleh negara berkembang lain seperti Malaysia, Vietnam, dan India, yang menghadapi tantangan berupa tingginya biaya investasi, kesenjangan kompetensi, serta ketiadaan standar nasional yang mapan (Gamil and Rahman, 2019; Nguyen and Nguyen, 2021).

Literatur BIM Indonesia terfragmentasi. Studi terdahulu berfokus pada aspek tunggal seperti hambatan adopsi (Roy and Firdaus, 2020) manfaat efisiensi (Tanne et al., 2025), atau kesiapan organisasi kontraktor terhadap BIM (Latupeirissa et al., 2024), sehingga tidak menampilkan kerangka yang terintegratif. Di samping itu, belum terdapat *systematic literature review* (SLR) yang secara komprehensif mengintegrasikan: (1) analisis tingkat kematangan BIM, (2) pemetaan faktor *Technology–Organization–Environment* (TOE), (3) pola integrasi BIM–IoT–*Digital Twin*, serta (4) evaluasi *framework* asesmen yang relevan untuk konteks Indonesia. Secara teoritis, belum ada kajian yang menjelaskan paradoks adopsi BIM melalui perspektif Teori Institusional (Taylor and Levitt, 2004) dan Teori Difusi Inovasi (Rogers, 2003; Saputra et al., 2024).

Berdasarkan kesenjangan tersebut, studi ini mengajukan empat tujuan, yaitu: (1) menganalisis kondisi aktual tingkat kematangan BIM di Indonesia berdasarkan bukti empiris, (2) mengidentifikasi faktor TOE yang memengaruhi adopsi dan kesiapan integrasi BIM–IoT, (3) menganalisis pola integrasi BIM–IoT–*Digital Twin* secara global serta implikasinya bagi Indonesia, dan (4) mengevaluasi *framework* asesmen BIM yang paling dapat diterapkan untuk konteks Indonesia.

Secara teoritis, studi ini merupakan sintesis integratif pertama yang menghubungkan kematangan BIM, faktor TOE, dan *Digital Twin* dalam konteks Indonesia. Secara praktis, studi ini menawarkan *roadmap* berbasis bukti melalui strategi *top-down* (penguatan standar nasional dan insentif fiskal) serta *bottom-up* (pengembangan kapasitas SDM dan *change management*), serta mengidentifikasi ambang minimum BIM Level 2 sebagai syarat integrasi *Digital Twin* yang baru dicapai oleh 11,8% organisasi.

2 BIM MATURITY, TOE FRAMEWORK, DAN INTEGRASI BIM-IOT-DIGITAL TWIN

2.1 BIM dan Maturity Models

Building Information Modeling (BIM) adalah representasi digital terstandarisasi lingkungan terbangun melalui *Industry Foundation Classes* (IFC) yaitu standar terbuka internasional (ISO 16739-1:2024) yang *vendor-neutral* (ISO 16739-1, 2024). BIM mencakup integrasi informasi untuk seluruh siklus hidup aset dari perencanaan hingga pemeliharaan (Sopaheluwakan and Adi, 2020).

Tabel 1. BIM Levels berdasarkan BS 1192 (Herr and Fischer, 2018)

Level	Deskripsi
Level 0	CAD tanpa kolaborasi, informasi via kertas/PDF
Level 1	Campuran 2D/3D dengan CDE, tanpa kolaborasi antar disiplin
Level 2	BIM kolaboratif penuh, model 3D terpisah terintegrasi, standar minimum proyek pemerintah Inggris sejak April 2016
Level 3	<i>Single shared model</i> berbasis <i>cloud</i> , akses <i>real-time</i>

BIM Maturity Matrix (BIM³) yang dikembangkan oleh Succar (2009) mengintegrasikan dua komponen utama, yaitu *BIM Capability Sets* dan *BIM Maturity Index*. *BIM Capability Sets* terdiri atas tiga tahapan perkembangan, meliputi *object-based modelling*, *model-based collaboration*, dan *network-based*

integration. Sementara itu, *BIM Maturity Index* mengukur tingkat kematangan implementasi BIM dalam lima level, yaitu *Initial* (Level 0), *Defined* (maksimum 10), *Managed* (maksimum 20), *Integrated* (maksimum 30), dan *Optimized* (maksimum 40). Kerangka ini telah menjadi salah satu referensi paling berpengaruh dalam studi kematangan BIM secara global.

2.2 TOE Framework

Technology–Organization–Environment (TOE) *Framework* yang dikembangkan oleh Tornatzky et al. (1990) mengidentifikasi tiga konteks utama yang memengaruhi adopsi teknologi dalam organisasi (Oliveira and Martins, 2011). Konteks teknologi mencakup faktor-faktor seperti kompleksitas, kompatibilitas, *relative advantage*, interoperabilitas, serta keamanan data. Dalam penerapan BIM, konteks ini berkaitan dengan ketersediaan infrastruktur digital, integrasi dengan standar nasional seperti SNI, serta kemampuan fitur-fitur utama seperti *clash detection*, *4D scheduling*, dan *5D cost estimation* (Tornatzky et al., 1990; Oliveira and Martins, 2011). Konteks organisasi meliputi ukuran organisasi, dukungan manajemen puncak, budaya organisasi, kesiapan finansial, serta kapasitas sumber daya manusia. Di Indonesia, faktor organisasi seperti tingginya biaya investasi dan keterbatasan tenaga kerja terampil menjadi hambatan paling dominan dalam adopsi BIM (Roy and Firdaus, 2020; Mahatama et al., 2025). Sementara itu, konteks lingkungan mencakup regulasi pemerintah, tekanan kompetitif, permintaan klien, dukungan vendor, serta program pelatihan akademis. Di Indonesia, mandat Permen PUPR No. 22/2018 dinilai belum berjalan optimal karena belum didukung oleh ekosistem pendukung yang komprehensif (Sopaheluwakan and Adi, 2020). Studi ini mengadopsi kerangka TOE dengan total 17 sub-kategori, yang terdiri atas dimensi *Technology* (5 sub-kategori), *Organization* (6 sub-kategori), dan *Environment* (6 sub-kategori).

2.3 Integrasi BIM-IoT-Digital Twin

Konsep *Digital Twin* pertama kali diperkenalkan oleh Dr. Michael Grieves pada konferensi *Society of Manufacturing Engineers* pada Oktober 2002, dengan tiga elemen inti yaitu entitas fisik, representasi virtual, dan koneksi data dua arah (*bidirectional*) antara keduanya (Grieves and Vickers, 2017). Dalam industri konstruksi, BIM berperan sebagai tulang punggung digital bagi *Digital Twin* dengan menyediakan representasi geometri 3D serta informasi semantik yang kaya. Integrasi *Internet of Things* (IoT) kemudian menambahkan lapisan data untuk pemantauan *real-time* melalui teknologi seperti sensor, RFID, GPS, dan *Wireless Sensor Networks* (WSN), yang didukung protokol komunikasi seperti MQTT dan HTTP (Lu et al., 2020). Konvergensi BIM–IoT–*Digital Twin* menjadi inti dari *Construction 4.0*, yaitu adaptasi *Industry 4.0* dalam sektor konstruksi yang mengintegrasikan *Cyber-Physical Systems* (CPS), *BIM*, *IoT*, *Big Data Analytics*, dan *Additive Manufacturing* (Oesterreich and Teuteberg, 2016). *Survei Dodge Data and Analytics* menunjukkan bahwa 61% pengguna melaporkan BIM mampu mengurangi kesalahan, 55% menyatakan adanya pengurangan waktu komunikasi, dan 82% memperoleh ROI positif (Dodge Construction Network, 2021). Namun, implementasi *Digital Twin* secara efektif mensyaratkan tingkat kematangan minimum BIM Level 2 sebagai prasyarat utama (Lu et al., 2020).

2.4 BIM di Negara Berkembang

Studi adopsi BIM di negara berkembang mengidentifikasi tiga hambatan universal: tingginya biaya investasi, kesenjangan kompetensi SDM, serta kelemahan regulasi. Beberapa studi di negara berkembang melaporkan pola serupa, dengan tingkat awareness yang lebih tinggi dibanding implementasi aktual (Gamil and Rahman, 2019; Nguyen and Nguyen, 2021). Indonesia menempati posisi lebih kritis dengan kesenjangan *awareness–implementation* terbesar (~30%), diperparah ketidakselarasan platform BIM global dengan SNI serta keteringgalan 16 tahun dari Jepang dalam adopsi IoT konstruksi (Wimala and Imanuela, 2022).

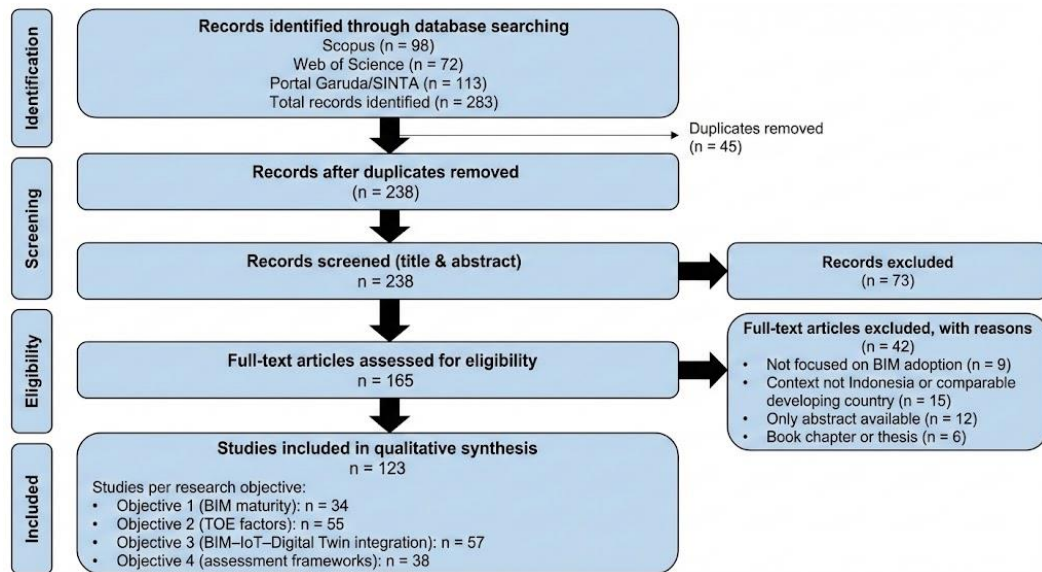
Dalam upaya mengatasi hambatan tersebut, beberapa negara berkembang telah mengembangkan strategi yang dapat menjadi referensi bagi Indonesia. Malaysia melalui *Construction Industry Development Board* (CIDB) menerapkan *roadmap* BIM bertahap sejak 2016 dengan dukungan insentif fiskal dan program sertifikasi nasional (Gamil and Rahman, 2019). Vietnam mulai mengintegrasikan BIM ke dalam regulasi perencanaan kota, meskipun masih terkendala kerangka hukum yang belum komprehensif (Nguyen and Nguyen, 2021). Pelajaran dari negara-negara ini menunjukkan bahwa kombinasi antara mandat kebijakan, pengembangan SDM, dan dukungan ekosistem industri menjadi kunci keberhasilan percepatan adopsi BIM di negara berkembang.

3 METODE

Studi ini dirancang sebagai *Systematic Literature Review* (SLR) dengan pendekatan *mixed-method* yang mengombinasikan sintesis kuantitatif dan kualitatif untuk menghasilkan pemahaman yang komprehensif. Pedoman utama yang digunakan adalah PRISMA 2020 (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses*), yaitu standar terbaru yang mencakup *27-item checklist* dalam tujuh bagian utama untuk memastikan transparansi dan konsistensi proses review (Page et al., 2021). Pendekatan *mixed synthesis* dalam studi ini meliputi sintesis kuantitatif melalui analisis frekuensi, persentase, dan distribusi temuan, serta sintesis kualitatif melalui *thematic analysis* dan *framework synthesis* dengan menggunakan kerangka *Technology–*

Organization–Environment (TOE) dari Tornatzky et al. (1990) yang dioperasionisasikan ke dalam 17 sub-kategori.

Pencarian literatur dilakukan pada tiga basis data utama, yaitu *Scopus* (n = 98), *Web of Science* (n = 72), dan Portal Garuda/SINTA (n = 113), sehingga diperoleh total 283 artikel pada tahap identifikasi. Setelah proses seleksi PRISMA, dari 98 artikel *Scopus* yang teridentifikasi, 67 artikel lolos ke sintesis akhir (51 dari jurnal Q1 dan 16 dari Q2–Q4). Pencarian awal dilakukan menggunakan *string*: ("BIM" OR "Building Information Model") AND ("adopt*" OR "implement*" OR "mature*" OR "barrier*" OR "readiness") AND ("Indonesia" OR "developing country*" OR "construction industry"). Untuk tujuan ketiga yang berfokus pada integrasi BIM–IoT–Digital Twin, studi tambahan diidentifikasi melalui **backward and forward snowballing** pada artikel kunci serta pencarian manual dengan kata kunci “IoT”, “Internet of Things”, dan “Digital Twin”. Rentang publikasi yang dikaji mencakup periode 2013–2025, dengan pencarian awal dilakukan pada November 2024 dan pembaruan pada Desember 2025 (Gambar 1 dan Tabel 2).



Gambar 1. PRISMA 2020 Flow Diagram.

Tabel 2. Kriteria Inklusi dan Eksklusi Literatur

Kriteria	Inklusi	Eksklusi
Tipe Publikasi	Jurnal <i>peer-reviewed</i> , prosiding konferensi	<i>Book chapter</i> , tesis/disertasi
Bahasa	Bahasa Inggris, Bahasa Indonesia	Bahasa lainnya
Fokus Topik	Adopsi BIM, implementasi, hambatan, kematangan	Tutorial perangkat lunak, manual teknis
Aksesibilitas	Teks lengkap tersedia	Hanya abstrak
Konteks	Indonesia atau negara berkembang lainnya dengan relevansi komparatif	Negara maju tanpa relevansi
Metodologi	Empiris (survei, studi kasus, eksperimen) atau SLR	Opini tanpa data

Data diekstraksi menggunakan formulir terstruktur yang mencakup variabel utama seperti nomor studi, judul, penulis/tahun, lokasi atau sampel, pemetaan tujuan studi, temuan utama, klasifikasi faktor berdasarkan TOE, estimasi tingkat kematangan BIM menurut Succar (2009), serta skor kualitas artikel. Analisis dilakukan melalui pendekatan kuantitatif dan kualitatif. Secara kuantitatif, digunakan analisis frekuensi, persentase, dan tabulasi silang untuk menggambarkan distribusi temuan. Secara kualitatif, dilakukan *thematic analysis* mengikuti metode enam fase dari Braun and Clarke (2006), dilanjutkan dengan *framework synthesis* berdasarkan 17 sub-kategori TOE serta *narrative synthesis* untuk menginterpretasikan pola hasil secara komprehensif. Pengelolaan data dilakukan dengan Microsoft Excel.

Proses seleksi studi mengikuti protokol PRISMA 2020 melalui empat tahap utama. Pada tahap identifikasi, diperoleh 283 artikel dari tiga basis data. Setelah penghapusan duplikat sebanyak 45 artikel, dilakukan *screening* judul dan abstrak terhadap 238 artikel, dengan 73 artikel dikeluarkan. Tahap *eligibility* menilai 165 artikel *full-text*, dan 42 artikel dieksklusi karena tidak relevan. Dengan demikian, sebanyak 123 studi dimasukkan dalam sintesis kualitatif akhir. Setiap studi dapat menjawab lebih dari satu tujuan penelitian, sehingga terdapat *multi-coding* di mana satu studi yang relevan dikategorikan ke dalam beberapa tujuan secara simultan. Distribusi studi

per tujuan adalah: Tujuan 1 (n=34), Tujuan 2 (n=55), Tujuan 3 (n=57), dan Tujuan 4 (n=38), dengan total kemunculan 184 yang mencerminkan *overlap* antar-kategori. Khusus untuk analisis TOE (Tujuan 2), 55 studi primer menghasilkan 527 *factor mentions* melalui *multi-coding*, di mana setiap studi dapat berkontribusi pada lebih dari satu sub-kategori TOE. Untuk analisis pola integrasi (Tujuan 3), tipe integrasi dikelompokkan berdasarkan teknologi dominan; studi dengan komponen *Digital Twin* dikategorikan ke *BIM-Digital Twin*, sedangkan studi dengan komponen IoT tanpa *Digital Twin* dikategorikan ke *BIM-IoT*. Alasan utama eksklusi meliputi ketidaksesuaian konteks Indonesia atau negara berkembang (n = 15), hanya tersedia abstrak (n = 12), tidak berfokus pada adopsi BIM (n = 9), serta berupa *book chapter* atau tesis (n = 6). Studi akhir didominasi oleh studi yang berlokasi di Pulau Jawa (~72%), dengan distribusi metodologi berupa survei *cross-sectional* (38%), *studi review*/SLR (25%), studi kasus (19%), *mixed-method* (13%), dan eksperimen (5%).

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Deskripsi Korpus Literatur

Proses seleksi PRISMA 2020 menghasilkan 123 studi yang memenuhi kriteria inklusi (Page et al., 2021).

Tabel 3. Korpus Literatur

Database	Jumlah	%	Peringkat
Scopus (Q1)	51	41.5%	Q1 Internasional
Scopus (Q2-Q4)	16	13.0%	Q2-Q4 Internasional
Web of Science	34	27.6%	Terindeks WoS
Portal Garuda/SINTA	22	17.9%	Nasional Terakreditasi
Total	123	100%	

Dominasi jurnal Q1 (41,5%) menunjukkan bahwa kualitas publikasi yang dianalisis tergolong tinggi dan didukung oleh sumber-sumber bereputasi. Dari sisi distribusi geografis, studi paling banyak berasal dari Indonesia (34 studi; 27,6%), diikuti oleh penelitian *multi-country* (18,7%) serta kontribusi dari China/Hong Kong (6,5%).

4.2 Tingkat Kematangan BIM di Indonesia

Analisis tingkat kematangan BIM di Indonesia pada 34 studi menggunakan Succar *BIM Maturity Matrix* (Succar, 2009) ditampilkan dalam Tabel 4 di bawah ini.

Tabel 4. Distribusi Tingkat Kematangan BIM di Indonesia

Level	n	%	Karakteristik	Studi Kunci
Level 0	1	2.9%	Pra-BIM; CAD tradisional	(The SMERU Research Institute et al., 2022)
Level 0-1	8	23.5%	Transisi awal; <i>awareness</i> tinggi, implementasi minimal	(Wimala and Imanuela, 2022; Hagan et al., 2025; Tanne et al., 2025)
Level 1	13	38.2%	<i>Object-based modelling</i> ; 3D <i>visualization</i> dominan	(Fitriani et al., 2021; Ernestine and Hermin, 2024; Primasetra et al., 2024; Lembaga and Nurdiah, 2025)
Level 1-2	8	23.5%	Kolaborasi parsial; 4D <i>scheduling</i> terbatas	(Sopaheluwakan and Adi, 2020; Pratama and Marzuki, 2023; Mahatama et al., 2025)
Level 2	4	11.8%	<i>Model-based collaboration</i>	(Safira et al., 2024; Kurniawan and Sushandoyo, 2025; Yudha and Mutaqi, 2025)

Temuan utama untuk tujuan pertama menunjukkan bahwa tingkat kematangan BIM di Indonesia masih didominasi oleh Level 1 (38,2%), di mana sebagian besar organisasi baru mengadopsi *object-based modeling* tanpa kolaborasi terintegrasi yang memadai (Primasetra et al., 2024; Baskara et al., 2025; Lembaga and Nurdiah, 2025). Hanya 11,8% organisasi yang berhasil mencapai Level 2, yang merupakan prasyarat minimum untuk integrasi *Digital Twin*. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan signifikan pada dimensi *Technology* (2,43 dibanding target 3,00), *Process* (1,98 dibanding 3,00), dan *Macro-scale* (1,31 dibanding 3,00) (Kurniawan and Sushandoyo, 2025). Selain itu, Indonesia menghadapi paradoks antara kesadaran dan implementasi, di mana tingkat kesadaran terhadap BIM mencapai 67–72%, namun implementasi aktual hanya 38%, sehingga menciptakan kesenjangan sebesar 29–34% (Sopaheluwakan and Adi, 2020; Lembaga and Nurdiah, 2025). Ketertinggalan teknologi juga semakin memperkuat kondisi ini, dengan Indonesia dilaporkan tertinggal sekitar 16 tahun dari Jepang dalam adopsi IoT konstruksi (Wimala and Imanuela, 2022), serta memiliki anggaran R&D yang sangat rendah yaitu hanya 0,28% dari GDP dibandingkan Korea Selatan yang mencapai 4,81% pada tahun yang sama (World Bank, 2024).

4.3 Analisis Faktor TOE

Analisis terhadap 55 jurnal mengidentifikasi 527 *mentions* menggunakan kerangka TOE (Tabel 5):

Tabel 5. Distribusi Faktor TOE dalam Adopsi BIM di Indonesia

Dimensi	Hambatan	Pendorong	Total	%
Technology (T)	116	81	197	37.4%
Organization (O)	112	53	165	31.3%
Environment (E)	94	71	165	31.3%
TOTAL	322	205	527	100%

Rasio antara faktor hambatan dan faktor pendorong sebesar 61,1%: 38,9% mengonfirmasi bahwa hambatan masih jauh lebih dominan dibandingkan faktor pendorong dalam adopsi BIM di Indonesia (Roy and Firdaus, 2020; Mahatama et al., 2025). Lima sub-kategori TOE yang paling sering muncul (TOP 5) ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6. Sub-kategori TOE Dominan dalam Adopsi BIM di Indonesia

Kode	Sub-kategori	Hambatan	Pendorong	Total
O4	<i>Human Resources/Skills</i>	49	21	70
T4	<i>Relative Advantage</i>	0	53	53
E1	<i>Government Policy</i>	28	20	48
E2	<i>Market/Client Demand</i>	19	28	47
T2	<i>Complexity</i>	41	5	46

Faktor teknologi menunjukkan bahwa *relative advantage* merupakan satu-satunya faktor pendorong murni, karena manfaat efisiensi BIM telah terdokumentasi secara konsisten, termasuk penghematan waktu hingga 50% (Yudha and Mutaqi, 2025), pengurangan durasi proyek sebesar 32,17% (Sinaga and Husin, 2021) peningkatan efisiensi sekitar 30% (Baskara et al., 2025), serta penghindaran biaya *rework* hingga Rp269,3 juta (Tanne et al., 2025). Namun *interoperability* masih menjadi tantangan signifikan akibat ketidakselarasan antara platform BIM global dengan standar nasional seperti SNI, yang menghambat integrasi lintas sistem (Saputra et al., 2024; Silitonga et al., 2024). Pada dimensi organisasi, faktor *human resources/skills* muncul sebagai hambatan dominan, di mana kesenjangan kompetensi diperparah oleh kurikulum pendidikan teknik dan vokasi yang belum sepenuhnya mengintegrasikan BIM sesuai kebutuhan industri, sehingga lulusan sering kali belum memiliki keterampilan BIM yang memadai, tingginya biaya pelatihan (Primasetra et al., 2024), serta kualitas SDM yang dinilai sebagai tantangan utama oleh 40% responden (Tanne et al., 2025). Selain itu, faktor *change resistance* merupakan hambatan murni yang mencerminkan inersia budaya kerja tradisional dan resistensi terhadap transformasi digital (Sopaheluwakan and Adi, 2020; Pratama and Marzuki, 2023). Sementara itu, pada dimensi lingkungan, faktor *industry standards* tercatat sebagai hambatan terbesar, terutama karena ketiadaan BIM *library* lokal berbasis SNI yang menghambat standarisasi dan adopsi luas (Saputra et al., 2024; Silitonga et al., 2024). Faktor kebijakan pemerintah bersifat paradoksal, karena meskipun regulasi seperti Permen PUPR No. 22/2018 dan SE Dirjen Bina Marga No. 11/2021 telah diterbitkan, implementasinya masih lemah akibat belum adanya standar teknis operasional yang jelas dan ekosistem pendukung yang memadai (Sopaheluwakan and Adi, 2020; Mahatama et al., 2025).

4.4 Pola Integrasi BIM-IoT-Digital Twin

Analisis terhadap 57 studi menunjukkan bahwa pola integrasi yang paling dominan adalah BIM–*Digital Twin*, dengan 32 studi (56,1%), diikuti oleh integrasi BIM–IoT sebanyak 14 studi (24,6%). Pola lainnya seperti IoT berbasis *standalone* (4 studi; 7,0%), BIM–IoT–AI (1 studi; 1,8%), BIM–IoT–GIS (2 studi; 3,5%), serta pendekatan *full stack* yang mengintegrasikan BIM–IoT–*Digital Twin*–AI (1 studi; 1,8%) masih relatif terbatas. Distribusi lengkap pola integrasi disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Distribusi Pola Integrasi Teknologi BIM dalam Literatur Global

Pola Integrasi	n	%	Contoh Studi
BIM–Digital Twin	35	61,4%	Lu et al., 2020;
BIM–IoT	14	24,6%	Silitonga et al., 2024
IoT-based (<i>standalone</i>)	4	7,0%	Wimala and Imanuela, 2022
BIM–IoT–AI	1	1,8%	Silitonga et al., 2024
BIM–IoT–GIS	2	3,5%	Lembagan and Nurdiah, 2025
Full Stack (BIM–IoT–DT–AI)	1	1,8%	Wang et al., 2022
Total	57	100%	

Temuan ini mengonfirmasi bahwa integrasi BIM–*Digital Twin* merupakan arah utama perkembangan global, di mana *Digital Twin* mensyaratkan keberadaan entitas fisik, representasi virtual, serta koneksi data dua arah (*bidirectional*) antara keduanya (Grieves and Vickers, 2017). Sejumlah studi juga menegaskan bahwa implementasi *Digital Twin* memerlukan tingkat kematangan minimum BIM Level 2 sebagai prasyarat dasar (Lu et al., 2020). Dalam konteks Indonesia, kondisi ini menunjukkan kesenjangan yang sangat besar, karena hanya 11,8% organisasi yang telah mencapai Level 2, sementara integrasi *Digital Twin* mensyaratkan kesiapan penuh pada level tersebut, sehingga sekitar 88,2 % organisasi belum memenuhi prasyarat BIM Level 2 yang diperlukan untuk integrasi *Digital Twin* (Kurniawan and Sushandoyo, 2025; Tanne et al., 2025).

4.5 Framework dan Assessment Tools

Analisis terhadap 38 studi menunjukkan bahwa *framework* asesmen BIM dapat diklasifikasikan ke dalam beberapa kategori utama, sebagaimana disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8. Klasifikasi *Framework* Asesmen BIM Berdasarkan Tinjauan Literatur

Kategori Framework	n	%
Competency/Skills Framework	8	21.1%
Technical/Integration Framework	7	18.4%
Maturity/Capability Framework	5	13.2%
Assessment Tools	5	13.2%
Lainnya	13	34.2%
Total	38	100%

Framework dominan secara global adalah Succar BIM³ dengan lima tingkat kematangan dan tiga *capability sets* (Succar, 2009), serta UK BIM Levels 0–3 berbasis BS 1192 (Herr and Fischer, 2018). Dalam konteks Indonesia, hanya dua *framework* spesifik yang ditemukan, yaitu BIMII dengan skor 67,46 (“quite achieved”) (Sopaheluwan and Adi, 2020) dan *dual-framework* ADKAR–SECI (Kurniawan and Sushandoyo, 2025). Kesenjangan utama adalah belum adanya *framework* yang terintegrasi dengan standar nasional seperti SNI, sehingga menghambat standardisasi BIM di Indonesia (Primasetra et al., 2024; Sopaheluwan and Adi, 2020).

4.6 BIM Maturity Gap sebagai Akar Paradoks Adopsi

Hasil SLR menunjukkan bahwa *BIM maturity*/kematangan BIM di Indonesia masih didominasi oleh Level 1 (38,2%), sementara hanya 11,8% organisasi yang mencapai Level 2 prasyarat minimum untuk kolaborasi terintegrasi dan kesiapan *Digital Twin* (Primasetra et al., 2024; Kurniawan and Sushandoyo, 2025). Studi Kurniawan & Sushandoyo (2025) mengidentifikasi kesenjangan signifikan pada tiga dimensi: *Technology* (2,43 vs target 3,00), *Process* (1,98 vs 3,00), dan *Macro-scale* (1,31 vs 3,00). Kondisi ini mengindikasikan bahwa adopsi BIM masih terbatas pada penggunaan dasar seperti visualisasi 3D, belum menghasilkan transformasi proses kerja secara menyeluruh. Kesenjangan kematangan ini berkontribusi langsung pada paradoks nasional, di mana kesadaran terhadap BIM relatif tinggi (67–72%) namun implementasi aktual tetap rendah (38%). Hal ini menciptakan kesenjangan sampai 30% (Sopaheluwan and Adi, 2020; Lembaga and Nurdiah, 2025). Dengan demikian, persoalan utama bukan sekadar kurangnya pengetahuan, tetapi ketidakmampuan sistemik untuk meningkatkan *maturity* menuju tahap kolaboratif.

4.7 Ketidakeimbangan Hambatan dan Pendorong (Perspektif TOE)

Analisis TOE terhadap 527 *factor mentions* mengonfirmasi bahwa faktor penghambat jauh lebih dominan dibandingkan faktor pendorong, dengan rasio 61,1% : 38,9% (322 : 205) (Roy and Firdaus, 2020; Mahatama et al., 2025). Hambatan utama terkonsentrasi pada kompleksitas teknologi (41 kemunculan), biaya investasi (36 kemunculan), serta keterbatasan SDM terampil (49 kemunculan). Sebaliknya, keunggulan relatif BIM (*Relative Advantage*) merupakan satu-satunya pendorong murni dengan 53 *mentions* positif dan nol hambatan, menunjukkan bahwa manfaat BIM telah diakui namun belum cukup untuk mengimbangi hambatan struktural yang saling memperkuat. Temuan ini menjelaskan mengapa bukti efisiensi BIM dengan penghematan waktu hingga 50%, pengurangan durasi proyek 32,17%, dan penghindaran biaya *rework* Rp269,3 juta ini tidak secara otomatis mendorong implementasi luas (Sinaga and Husin, 2021; Baskara et al., 2025; Tanne et al., 2025; Yudha and Mutaqi, 2025).

4.8 Bottleneck Sumber Daya Manusia sebagai Binding constraint

Faktor organisasi, khususnya *Human Resources/Skills* (Sumber Daya Manusia/Keterampilan), muncul sebagai hambatan paling dominan dengan 70 total kemunculan (13,3% dari seluruh faktor TOE) dan rasio 70% hambatan, berfungsi sebagai *binding constraint* dalam peningkatan *maturity* BIM. Kekurangan tenaga terampil menciptakan lingkaran setan: rendahnya kapasitas implementasi menurunkan ROI pelatihan, yang pada gilirannya melemahkan insentif investasi SDM dan akhirnya menyebabkan stagnasi adopsi (Roy and Firdaus,

2020; Wimala and Imanuela, 2022; Mahatama et al., 2025). Kondisi ini diperparah oleh: (1) kurikulum pendidikan BIM yang belum terintegrasi di perguruan tinggi, (2) biaya pelatihan dan sertifikasi yang tinggi (Primasetra et al., 2024), (3) kualitas SDM sebagai tantangan utama bagi 40% responden (Safira et al., 2024), serta (4) rendahnya investasi R&D nasional (0,28% GDP) dibanding Korea Selatan (4,81%) dan kesenjangan teknologi 16 tahun di belakang Jepang dalam adopsi IoT konstruksi (Wimala and Imanuela, 2022).

4.9 Implikasi Teoritis

Distribusi faktor yang relatif seimbang pada dimensi *Technology* (37,4%), *Organization* (31,3%), dan *Environment* (31,3%) memvalidasi relevansi *TOE Framework* (Tornatzky et al., 1990) untuk konteks negara berkembang. Hambatan terbesar pada aspek lingkungan, khususnya lemahnya standar industri lokal, dapat dijelaskan melalui *Institutional Theory* dan *path dependency* (Taylor and Levitt, 2004), di mana SNI yang dikembangkan untuk era pra-digital menjadi resisten terhadap perubahan. Selain itu, temuan bahwa *perceived advantage* tidak secara otomatis menghasilkan adopsi luas memberikan nuansa tambahan terhadap peran *relative advantage* dalam *Diffusion of Innovations Theory* (Rogers, 2003), mengindikasikan adanya *decoupling* antara manfaat kolektif dengan biaya yang terkonsentrasi pada pihak tertentu..

4.10 Implikasi Praktis

Integrasi BIM–*Digital Twin* merupakan pola dominan secara global, namun mensyaratkan minimum BIM Level 2 (Lu et al., 2020). Dengan hanya 11,8% organisasi Indonesia mencapai Level 2, terdapat kesenjangan kesiapan yang sangat besar untuk transformasi digital lanjut, yang berimplikasi pada daya saing proyek regional dan internasional. Berdasarkan temuan, prioritas intervensi perlu difokuskan pada: (1) penguatan kapasitas SDM melalui sertifikasi nasional dan pembaruan kurikulum, (2) dukungan fiskal untuk mengurangi beban investasi teknologi, serta (3) harmonisasi standar SNI dengan ISO/IFC untuk membangun ekosistem BIM yang operasional. Selain itu, hanya dua framework asesmen yang spesifik Indonesia telah teridentifikasi (Sopaheluwakan and Adi, 2020; Kurniawan and Sushandoyo, 2025), menunjukkan urgensi pengembangan indeks kematangan BIM nasional yang terintegrasi dengan kebutuhan lokal.

4.11 Limitasi Penelitian

SLR ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, potensi *publication bias* karena literatur cenderung melaporkan hasil signifikan. Kedua, dominasi studi di Pulau Jawa (~72%) dapat membatasi representasi nasional. Ketiga, mayoritas data bersifat *self-reported* sehingga rentan bias persepsi. Keempat, estimasi *maturity level* dilakukan melalui *author-assigned scoring* berdasarkan deskripsi dalam studi primer, sehingga berpotensi mengandung bias interpretasi. Kelima, proses *coding* TOE tidak dilengkapi dengan uji *inter-rater reliability*, yang dapat memengaruhi konsistensi klasifikasi faktor. Keenam, inklusi hanya pada literatur berbahasa Inggris dan Indonesia berpotensi menimbulkan *language bias*. Terakhir, periode 2013–2025 mungkin belum sepenuhnya menangkap dinamika pasca-pandemi yang mempercepat digitalisasi.

5 KESIMPULAN

5.1 Ringkasan Temuan Utama

Studi ini menyajikan *systematic literature review (SLR)* terhadap 123 artikel terakreditasi periode 2013–2025, dengan 41,5% berasal dari jurnal Q1 internasional, untuk mencapai empat tujuan studi terkait paradoks adopsi BIM di Indonesia. Hasil tujuan pertama menunjukkan bahwa kematangan BIM di Indonesia masih didominasi oleh Level 1 (38,2%), sementara hanya 11,8% organisasi mencapai Level 2 dan tidak ditemukan bukti pencapaian Level 3. Distribusi ini mengindikasikan bahwa implementasi BIM masih terbatas pada *object-based modelling* tanpa kolaborasi multidisiplin yang terintegrasi. Kondisi tersebut memperkuat paradoks *awareness–implementation*, di mana *awareness* mencapai 67–72% namun implementasi aktual hanya 38%, sehingga menghasilkan kesenjangan sekitar 30 poin persentase.

Temuan tujuan kedua mengidentifikasi 527 *factor mentions* dalam 17 sub-kategori TOE, dengan faktor penghambat (61,1%) secara signifikan melebihi faktor pendorong (38,9%). *Human Resources/Skills* muncul sebagai hambatan paling dominan, sedangkan *Relative Advantage* merupakan pendorong utama yang konsisten positif. Ketidakseimbangan ini menjelaskan mengapa manfaat BIM yang terdokumentasi kuat belum mampu mendorong adopsi luas secara sistemik.

Terkait tujuan ketiga, pola integrasi global menunjukkan dominasi BIM–*Digital Twin* (61,4%), dengan BIM Level 2 sebagai *threshold* minimum implementasi. Dengan demikian, sekitar 88,2% organisasi di Indonesia belum siap menuju integrasi *Digital Twin*, yang menjadi tantangan strategis dalam agenda *Construction 4.0*. Sementara itu, tujuan keempat menunjukkan bahwa dari 38 *framework* asesmen yang dievaluasi, hanya dua yang spesifik untuk konteks Indonesia, menegaskan kebutuhan mendesak akan instrumen asesmen yang selaras dengan standar lokal seperti SNI.

5.2 Kontribusi Studi

Secara teoritis, studi ini menawarkan sintesis integratif yang menghubungkan *BIM maturity*, faktor TOE, dan *Digital Twin readiness* dalam satu kerangka analitik untuk konteks Indonesia. Studi ini juga memberikan *evidence base* komprehensif melalui kuantifikasi 527 *factor mentions*, serta menunjukkan bahwa dimensi organisasi khususnya hambatan SDM berfungsi sebagai *binding constraint* yang memperkuat lingkaran setan dalam adopsi BIM di negara berkembang. Secara praktis, studi ini menghasilkan prioritas intervensi berbasis data dengan menempatkan penguatan kompetensi SDM, harmonisasi standar industri, serta dukungan infrastruktur dan pembiayaan sebagai area strategis utama. Selain itu, *gap analysis* menunjukkan bahwa sebagian besar organisasi Indonesia belum memenuhi *threshold* Level 2 yang dibutuhkan untuk transformasi digital lanjutan menuju *Digital Twin*.

5.3 Rekomendasi

Untuk mempercepat adopsi BIM dan kesiapan integrasi *Digital Twin*, studi ini merekomendasikan: (1) penguatan implementasi Permen PUPR No. 22/2018 melalui standar teknis operasional yang jelas, (2) pengembangan program sertifikasi kompetensi BIM nasional untuk mengatasi hambatan SDM, (3) harmonisasi SNI dengan ISO 19650 dan standar IFC untuk memperkuat ekosistem kolaborasi, serta (4) pemberian insentif fiskal bagi *early adopters*, khususnya UKM konstruksi. Di sisi industri, diperlukan strategi transisi terarah dari Level 1 menuju Level 2 melalui *pilot projects*, investasi pelatihan sistematis, dan adopsi kontrak kolaboratif seperti *Integrated Project Delivery* (IPD). Sementara itu, akademisi memiliki peran penting dalam integrasi BIM ke dalam kurikulum teknik sipil dan pengembangan instrumen asesmen berbasis konteks nasional.

5.4 Agenda Studi Selanjutnya

Studi mendatang perlu difokuskan pada studi longitudinal pasca-2025 untuk mengevaluasi dampak kebijakan, eksplorasi studi kasus organisasi yang berhasil mencapai Level 2/3, validasi empiris framework asesmen pada proyek nyata, serta studi komparatif ASEAN untuk pembelajaran kebijakan regional. Selain itu, riset kualitatif terkait *change management* dan transformasi budaya organisasi menjadi krusial untuk memahami hambatan sosio-institusional yang tidak sepenuhnya tertangkap dalam survei kuantitatif.

DAFTAR PUSTAKA

- Baskara, S., Putra, A.A., Simatupang, M. 2025. Pemanfaatan Inovasi Teknologi Dalam Dunia Teknik Sipil : Menuju Konstruksi Masa Depan. *Jurnal Pengabdian Masyarakat Dan Riset Pendidikan*, 3(4): 5598–5600.
- Berlian, C.A., Adhi, R.P., Hidayat, A. 2016. Perbandingan Efisiensi Waktu, Biaya, Dan Sumber Daya Manusia Antara Metode Building Information Modelling (BIM) Dan Konvensional (Studi Kasus: Perencanaan Gedung 20 Lantai). *Jurnal Karya Teknik Sipil*, 5(2): 220–229.
- Braun, V., Clarke, V. 2006. Using Thematic Analysis in Psychology. *Qualitative Research in Psychology*, 3(2): 77–101.
- Cabinet Office. 2011. Government Construction Strategy. *Construction*, 96(May): 43.
- Dodge Construction Network. 2021. *Accelerating Digital Transformation Through BIM*. Dodge Data & Analytics.
- Gamil, Y., Rahman, I. 2019. Awareness and Challenges of Building Information Modelling (BIM) Implementation in the Yemen Construction Industry. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 17(4): 802–823.
- Grieves, M., Vickers, J. 2017. *Digital Twin: Mitigating Unpredictable, Undesirable Emergent Behavior in Complex Systems* BT - *Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches*. F.-J. Kahlen, S. Flumerfelt, & A. Alves, Eds. Cham: Springer International Publishing.
- Herr, C.M., Fischer, T. 2018. BIM Adoption across the Chinese AEC Industries: An Extended BIM Adoption Model. *Journal of Computational Design and Engineering*, 6(2): 173–178.
- ISO 16739-1. 2024. *Industry Foundation Classes (IFC) for Data Sharing in the Construction and Facility Management Industries — Part 1: Data Schema*. Geneva.
- ISO 19650. 2018. *Organization and digitization of information about buildings and civil engineering works, including building information modelling (BIM)*.
- Kementerian PUPR. 2017. *Roadmap Penerapan Building Information Modeling (BIM) 2017–2024*. Jakarta.
- Kurniawan, R., Sushandoyo, D. 2025. Bridging the BIM Maturity Gap in Developing Country : A Change and Knowledge Management Framework for Enhancing Project Values. *European Journal of Business and Management Research*, 10(4): 198–202.
- Latupeirissa, J.E., Arrang, H., Wong, I.L.K. 2024. The Challenges of Implementing Building Information Modeling in Indonesia Construction Projects. *Engineering And Technology Journal*, 9(4 SE-Articles): 3863–3871.

- Lembagan, M.O., Nurdiah, E.A. 2025. A Review of BIM Implementation in Indonesia ' s Smart Cities : Challenges and Opportunities. *Int. J. of Built Environment and Scientific Research*, 7(1): 46–59.
- Lu, Q., Asce, A.M., Parlikad, A.K., Woodall, P., Ranasinghe, G.D., Xie, X., Liang, Z., Konstantinou, E., Heaton, J., Schooling, J. 2020. Developing a Digital Twin at Building and City Levels : Case Study of West Cambridge Campus. *Journal of Management in Engineering*, 36(3): 05020004.
- Mahatama, I.K.B.W., Sanjaya, I.P.A., Dewi, A.A.D.P. 2025. Paradoks Adopsi Bim Di Indonesia: Tinjauan Sistematis Atas Efisiensi, Hambatan, Dan Implikasi Kebijakan. *Jurnal Spektran*, 13(2): 52–58.
- Nguyen, T.Q., Nguyen, D.P. 2021. Barriers in Bim Adoption and the Legal Considerations in Vietnam. *International Journal of Sustainable Construction Engineering and Technology*, 12(1): 283–295.
- Oesterreich, T.D., Teuteberg, F. 2016. Understanding the Implications of Digitisation and Automation in the Context of Industry 4.0: A Triangulation Approach and Elements of a Research Agenda for the Construction Industry. *Computers in Industry*, 83: 121–139.
- Oliveira, T., Martins, M.R. 2011. Literature Review of Information Technology Adoption Models at Firm Level. *The Electronic Journal Information Systems Evaluation*, 14(1): 110–121.
- Page, M.J., McKenzie, J.E., Bossuyt, P.M., Boutron, I., Hoffmann, T.C., Mulrow, C.D., Shamseer, L., Tetzlaff, J.M., Akl, E.A., Brennan, S.E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J.M., Hróbjartsson, A., Lalu, M.M., Li, T., Loder, E.W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., McGuinness, L.A., Stewart, L.A., Thomas, J., Tricco, A.C., Welch, V.A., Whiting, P., Moher, D. 2021. The PRISMA 2020 Statement: An Updated Guideline for Reporting Systematic Reviews. *BMJ*, 372(n71).
- Pratama, A., Marzuki, P.F. 2023. Kajian Implementasi BIM (Building Information Modeling) Di Indonesia Berdasarkan Perspektif Pelaksana Konstruksi (Studi Kasus: Proyek Kontraktor BUMN). *Jurnal Teknik Sipil*, 30(2): 277–296.
- Primasetra, A., Larasati, D., Wonorahardjo, S. 2024. Factors Affecting BIM (Building Information Modeling) Utilization Based on Stakeholder Perceptions in Indonesia. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, 14(1): 259–267.
- Rogers, E.M. 2003. *Diffusion of Innovations*, 5th Edition. Free Press.
- Roy, A.F. Van, Firdaus, A. 2020. Building Information Modelling in Indonesia: Knowledge, Implementation and Barriers. *Journal of Construction in Developing Countries*, 25(2): 199–217.
- Safira, H., Tanne, Y.A., Maarif, M.S. 2024. Feasibility Assessment of Construction 4 . 0 Technology Investment : Drones , Building Information Modeling (BIM) and Virtual Reality (VR). *Journal of Engineering and Applied Technology*, 5(1): 37–51.
- Saputra, C.G.P.H., Deni, D.P., Alfianarrochmah, I., Kurnianingsih, O., Rahmi, A.T., Pratiwi, K.H., Susanto, T., Legowo, S.J., Yanto, F.H., Pratama, R.W., Halimah, R.S.N. 2024. Application Of 5D Building Information Modeling Using Cubicost In Estimating Construction Structure Work Costs (Case Study: Emergency Room And Hemodialysis Building At Waras Wiris Local General Hospital Of Boyolali, Indonesia). *Engineering and Applied Science Research*, 51(3): 276–285.
- Saputra, H., Pratama, R., Tita, E.E., Yusa, M. 2024. Comparative Analysis of Quantity Take-Off Material Between Conventional Method & BIM Nemetschek Allplan Method on Bridge. *Civil Engineering and Architecture*, 12(4): 2622–2633.
- Sholeh, M.N., Fauziyah, S., Khasan, R.R. 2020. Effect of Building Information Modeling (BIM) on Reduced Construction Time-Costs: A Case Study. *E3S Web of Conferences*, 202: 1–7.
- Silitonga, D.M., Hendrawan, S.Y., Jin, O.F. 2024. Digitalisasi Metode Konstruksi Pada Proyek High-Rise Building. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 7(3): 795–806.
- Sinaga, T., Husin, A.E. 2021. Analysis of Time Efficiency with Ccpm Method and Bim in Construction Projects Construction of High-Rise Residential Building Basement. *Civil Engineering and Architecture*, 9(5): 1465–1477.
- Sopaheluwakan, M.P., Adi, T.J.W. 2020. Adoption and Implementation of Building Information Modeling (BIM) by the Government in the Indonesian Construction Industry. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 930(1).
- Succar, B. 2009. Building Information Modelling Framework: A Research and Delivery Foundation for Industry Stakeholders. *Automation in Construction*, 18(3): 357–375.
- Tanne, Y.A., Rivana, D., Ramadan, R., Farhani, S. 2025. BIM For Efficiency And Sustainability In Construction: A Case Study In Indonesia. *Discover Civil Engineering*, 2(1).
- Taylor, J., Levitt, R. 2004. Understanding and Managing Systemic Innovation in Project-Based Industries. *Innovations: Project Management Research*. Newtown Square, PA.
- The SMERU Research Institute, Digital Pathways at University of Oxford, UNESCAP. 2022. Diagnostic

- Report: Digital Skills Landscape in Indonesia. In *SMERU Research Report No. 2*. Jakarta:
- Tornatzky, L.G., Fleischer, M., Chakrabarti, A.K. 1990. *The Processes of Technological Innovation*. Lexington Books.
- Wang, T., Gan, V.J.L., Hu, D., Liu, H. 2022. Automation in Construction Digital Twin-Enabled Built Environment Sensing and Monitoring through Semantic Enrichment of BIM with SensorML. *Automation in Construction*, 144(October): 104625.
- Wimala, M., Imanuela, K. 2022. Perkembangan Internet of Things Di Industri Konstruksi. *Journal of Sustainable Construction (JoSC)*, 1(2): 43–51.
- World Bank. 2024. *Research and Development Expenditure (% of GDP)*. Washington, DC.
- Yudha, F.P., Mutaqi, A.S. 2025. Literature Review : Pemanfaatan Building Information Modeling (BIM) Dalam Konstruksi Sebagai Alat Komunikasi Dan Kolaborasi Dalam Integrated Project Delivery (IPD). *Konstruksi: Publikasi Ilmu Teknik, Perencanaan Tata Ruang Dan Teknik Sipil*, 3(4): 11–30.