

Penerapan Generative AI dan Building Information Modeling (BIM) dalam Efisiensi Alur Kerja Desain Arsitektur Tropis

Naren Wicaksana^{*1}, Celine Mahastuti²

Email: n.wicaksana@gmail.com, cmahastuti@gmail.com

¹Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Budi Luhur, Jakarta, Indonesia, 12260

²Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Pancasila, Jakarta, Indonesia, 12640

*Corresponding Author

Article Information	Abstract
Keywords: Generative AI; BIM; Tropical Architecture; Parametric Design; Interoperability.	<i>The increasing demand for efficient and climate-responsive building design has encouraged the adoption of digital technologies in architectural practice. However, conventional design workflows often require lengthy iterations due to the separation of creative exploration and technical validation. This study aims to evaluate the effectiveness of integrating Generative Artificial Intelligence (Generative AI) and Building Information Modeling (BIM) in improving the efficiency of tropical architectural design while maintaining geometric accuracy and thermal performance. An experimental comparative approach was applied to a five-story office building in Jakarta, Indonesia. The workflow integrated AI-based design generation, BIM-based parametric modeling, interoperability assessment, clash detection, and thermal performance evaluation using the Overall Thermal Transfer Value (OTTV) method. The results show that the proposed AI-BIM workflow reduced design duration from 90.0 to 17.0 hours, achieving an efficiency rate of 81.11%. The average geometry interoperability error was 3.28%, while the selected kinetic façade achieved an OTTV value of 31.22 W/m², satisfying SNI 6389:2020 requirements. Expert validation also indicated high feasibility, with average scores above 4.00 on a five-point Likert scale. The novelty of this study lies in the development of a standardized workflow that transforms AI-generated visual assets into engineering-valid BIM parametric objects for tropical architecture. The findings demonstrate that AI-BIM integration can significantly enhance design productivity, thermal performance, and practical implementation in the construction industry.</i>
Kata Kunci: Generative AI; BIM; Tropical Architecture; Parametric Design; Interoperability.	Abstrak Penelitian ini bertujuan mengevaluasi efektivitas integrasi <i>Generative Artificial Intelligence (Generative AI)</i> dan <i>Building Information Modeling (BIM)</i> dalam meningkatkan efisiensi perancangan arsitektur tropis tanpa mengurangi akurasi geometri dan performa termal bangunan. Metode yang digunakan adalah pendekatan eksperimental komparatif pada studi kasus gedung perkantoran lima lantai di Jakarta, Indonesia. Alur kerja yang diusulkan mengintegrasikan pembangkitan desain berbasis AI, pemodelan parametrik berbasis BIM, pengujian interoperabilitas, <i>clash detection</i> , serta evaluasi performa termal menggunakan metode <i>Overall Thermal Transfer Value (OTTV)</i> . Hasil penelitian menunjukkan bahwa alur kerja AI-BIM mampu menurunkan durasi desain dari 90,0 jam menjadi 17,0 jam dengan tingkat efisiensi sebesar 81,11%. Rata-rata galat interoperabilitas geometri yang diperoleh sebesar 3,28%, sedangkan desain fasad kinetik terpilih menghasilkan nilai OTTV sebesar 31,22 W/m ² dan memenuhi persyaratan SNI 6389:2020. Validasi oleh para ahli juga menunjukkan tingkat kelayakan yang tinggi dengan skor rata-rata di atas 4,00 pada skala Likert lima poin. Kebaruan (<i>novelty</i>) penelitian ini terletak pada pengembangan alur kerja terstandarisasi yang mampu mentransformasikan aset visual hasil AI menjadi objek parametrik BIM yang valid secara rekayasa untuk arsitektur tropis. Temuan penelitian menunjukkan bahwa integrasi AI-BIM dapat meningkatkan produktivitas desain, performa bangunan, dan kesiapan implementasi pada industri konstruksi.



I. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi komputasi pada tahun 2026 telah mengubah paradigma perancangan arsitektur dan rekayasa sipil secara radikal. Di wilayah Indonesia, arsitektur tropis menghadapi tantangan ganda, yakni kebutuhan adaptasi iklim ekstrem yang responsif terhadap radiasi matahari tinggi serta tuntutan efisiensi waktu pengerjaan proyek infrastruktur. Proses desain konvensional sering kali mengalami hambatan signifikan pada fase ideasi fasad dan optimalisasi selubung bangunan karena koordinasi antara estetika arsitektural dan kalkulasi teknis struktur sering kali menimbulkan *trial-error* yang berulang pada fase pra-rencana. Ketidakseimbangan antara kecepatan ideasi dan presisi teknis ini menjadi hambatan utama dalam produktivitas industri konstruksi modern. Kondisi ini menuntut adanya pergeseran alur kerja yang mampu mengintegrasikan kreativitas desain dengan validitas rekayasa secara simultan.

Dalam ranah pengembangan desain, menurut penelitian [1], Generative AI kini menjadi topik utama karena kemampuannya menawarkan kecepatan komputasi dalam menghasilkan ratusan alternatif bentuk visual berbasis parameter tertentu. Sejalan dengan hal tersebut, [2] dalam studinya menegaskan bahwa BIM telah menjadi standar industri yang unggul dalam hal presisi geometris, interoperabilitas data, dan analisis performa bangunan. Integrasi kecerdasan buatan dalam proses desain juga dilaporkan mampu meningkatkan efisiensi eksplorasi desain dan mendukung pengambilan keputusan berbasis data. Selain itu, kajian terhadap alur kerja konstruksi digital menegaskan bahwa standarisasi format file terbuka terbukti mampu meminimalkan kehilangan data (*data loss*) pada saat perpindahan antarperangkat lunak.

Meskipun penelitian-penelitian terdahulu menunjukkan hasil yang signifikan, terdapat kesenjangan nyata dalam integrasi teknologi tersebut. Menurut [3], AI unggul dalam eksplorasi bentuk, namun ia mencatat bahwa kelemahan utamanya terletak pada representasi dua dimensi (2D) piksel yang sering mengabaikan logika struktural. Keterbatasan ini didukung oleh penelitian dari [4] yang mengungkapkan bahwa platform BIM memiliki keunggulan presisi, namun ia menyoroti kebutuhan *modelling lead time* yang signifikan jika dimulai dari nol. Sementara itu, [5] menunjukkan bahwa algoritma pembelajaran mesin mampu memprediksi geometri adaptif, namun sering terkendala dalam integrasi bentuk organik hasil AI ke dalam lingkungan BIM. Hal ini diperkuat oleh [6] yang menyoroti bahwa sering terjadi kegagalan rekonstruksi pada bentuk kompleks saat diuji dalam lingkungan *Finite Element Method*. [7] menunjukkan bahwa metode standar saat ini belum mampu menjembatani transformasi aset visual AI menjadi objek parametrik BIM yang valid untuk konteks arsitektur tropis. Kurangnya fokus penelitian pada situasi khusus integrasi data visual raster ke vektor parametrik dalam arsitektur tropis menjadi celah yang perlu ditutup. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan menjembatani celah tersebut dengan mengintegrasikan *Generative AI* dan BIM ke dalam alur kerja yang sinergis.

Penelitian ini mengusulkan hipotesis bahwa alur kerja integrasi AI-BIM yang terstandarisasi dapat meningkatkan efisiensi waktu desain secara drastis tanpa mengorbankan nilai OTTV. Pertanyaan penelitian utama mencakup sejauh mana efisiensi durasi waktu yang dapat dicapai serta bagaimana akurasi konversi geometri dipertahankan dalam lingkungan BIM. Kebaruan (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada formulasi metode transformasi aset visual AI menjadi objek parametrik BIM yang valid secara rekayasa sipil. Melalui pendekatan ini, diharapkan tercipta sebuah panduan operasional digital yang dapat memberikan solusi berkelanjutan bagi industri konstruksi di Indonesia. Diharapkan pula hasil penelitian ini mampu menjadi acuan teknis yang terukur bagi para praktisi dalam mengadopsi teknologi kecerdasan buatan secara aman dan efisien ke depannya.

II. TINJAUAN LITERATUR

A. Konsep Arsitektur Tropis dan Perhitungan Nilai Energi Selubung Bangunan

Arsitektur tropis menuntut keseimbangan presisi antara estetika fasad dan performa energi selubung guna merespons radiasi matahari yang intensif. [8] menyoroti bahwa efisiensi energi bangunan sangat bergantung pada kalkulasi OTTV yang akurat untuk menekan beban pendinginan interior secara optimal. [9] kemudian mengemukakan bahwa optimalisasi material selubung berbasis parameter iklim mampu menurunkan konsumsi energi secara signifikan jika diterapkan sejak tahap perancangan awal.

[10] menambahkan bahwa integrasi perangkat peneduh pasif (*shading device*) menjadi strategi kunci dalam meminimalisir perolehan panas tanpa harus mengorbankan kualitas pencahayaan alami di dalam ruangan. [11] lebih lanjut menekankan bahwa penggunaan algoritma kalkulasi termal yang presisi sangat krusial dalam memenuhi standar teknis bangunan hijau di kawasan beriklim tropis. [12] melengkapi pandangan ini dengan menyatakan bahwa pengabaian orientasi bangunan terhadap lintasan matahari akan mengakibatkan lonjakan beban energi yang masif, sehingga perhitungan energi harus menjadi variabel utama dalam setiap keputusan desain fasad.

B. Integrasi Generative AI dan Building Information Modeling dalam Desain Parametrik

Integrasi *Generative AI* dan BIM dalam desain parametrik telah mengubah lanskap alur kerja arsitektural secara mendasar. [13] menjelaskan bahwa kemampuan komputasi *Generative AI* memungkinkan arsitek untuk mengeksplorasi ratusan varian bentuk kompleks yang sulit dicapai melalui metode pemodelan konvensional. [14] mengungkapkan bahwa proses transformasi aset visual hasil AI menjadi model parametrik yang valid di lingkungan BIM secara drastis meningkatkan konsistensi data geometri bangunan.

Peneliti [15] mengamati bahwa sinergi kedua teknologi ini mampu memangkas durasi iterasi desain yang sebelumnya memakan waktu berbulan-bulan menjadi jauh lebih ringkas. [16] berargumen bahwa efisiensi alur kerja tercapai karena adanya sinkronisasi otomatis antara eksplorasi bentuk organik yang kreatif dengan logika konstruktif yang dibatasi oleh parameter ketat BIM. [17] menyempurnakan argumen tersebut dengan menyatakan bahwa kolaborasi antara kreativitas mesin dan presisi data teknis menjadi standar baru yang menjamin validitas setiap desain yang dihasilkan.

C. Implementasi Pembelajaran Mesin untuk Optimasi Geometri Responsif Iklim

Implementasi pembelajaran mesin kini berperan sebagai penggerak utama dalam optimasi geometri yang responsif terhadap kondisi lingkungan. [18] menemukan bahwa model *predictive analytics* mampu mengantisipasi pola pergerakan matahari secara akurat untuk memodifikasi bentuk massa bangunan secara otomatis dan efisien. [19] menambahkan bahwa optimasi geometri berbasis data lingkungan ini berhasil menurunkan beban panas tahunan dengan performa yang jauh melampaui desain statis biasa.

Peneliti [20] menunjukkan bahwa kemampuan jaringan saraf tiruan mampu mendeteksi potensi masalah termal pada fasad bahkan sebelum model fisik bangunan dibangun. [21] mencatat bahwa algoritma evolusioner dalam pembelajaran mesin dapat menemukan solusi geometri yang paling optimal dalam hitungan detik melalui proses simulasi iteratif. [22] menegaskan bahwa kemampuan mesin untuk merespons kondisi iklim mikro secara dinamis adalah kunci utama dalam menciptakan arsitektur yang benar-benar adaptif dan berkelanjutan.

Tabel 1. Perbandingan Penelitian Terkait Standarisasi Interoperabilitas Data

Peneliti	Fokus Standardisasi	Metode Utama	Temuan Utama
[23]	IFC Protocol	Data Mapping	Integritas semantik objek terjaga
[24]	Data Exchange	Geometry Validation	Mengurangi kegagalan rekonstruksi
[25]	Interoperabilitas	Clash Detection	Sinkronisasi antar-disiplin meningkat
[26]	Open Data	Collaborative Workflow	Efisiensi kolaborasi tim
[27]	Digital Construction	Data Standardization	Integrasi AI-BIM lebih lancar

D. Standarisasi Interoperabilitas Data Multi-Platform pada Rekayasa Sipil Modern

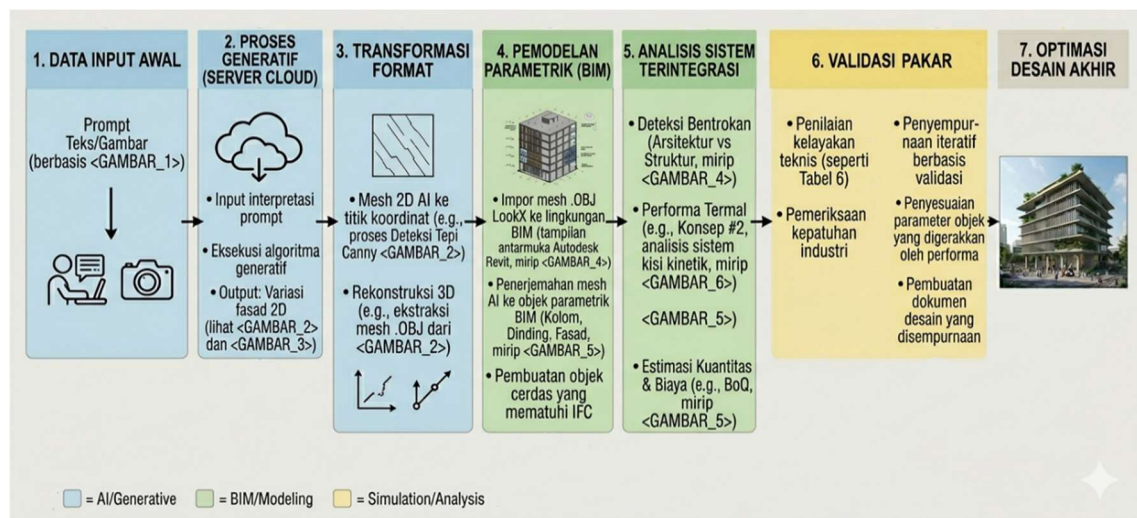
Standardisasi interoperabilitas data menjadi fondasi krusial dalam menyatukan alur kerja berbagai perangkat lunak di sektor rekayasa sipil modern. [23] menjelaskan bahwa penggunaan standar *Industry Foundation Classes* (IFC) memastikan integritas semantik objek bangunan terjaga dengan baik saat berpindah antar-platform. [24] memperingatkan bahwa tanpa protokol pertukaran data yang terstandarisasi, risiko kegagalan rekonstruksi geometri pada model BIM akan meningkat secara eksponensial dan merugikan proses konstruksi. [25] mengamati bahwa keselarasan data antar-disiplin sangat mempermudah proses deteksi konflik atau *clash detection*

dalam proyek berskala besar. [26] mencatat bahwa implementasi standar data terbuka memungkinkan kolaborasi tim lintas disiplin menjadi jauh lebih sinkron dan minim kesalahan teknis. [27] menyimpulkan bahwa standarisasi adalah prasyarat bagi digitalisasi konstruksi agar integrasi AI dan BIM berjalan lancar. Ringkasan perbandingan fokus, metode, dan temuan utama dari berbagai penelitian terkait standarisasi interoperabilitas data dapat dilihat pada Tabel 1.

III. METODE

A. Alur Kerja Eksperimen Komparatif (AI-BIM Framework)

Penelitian ini menerapkan pendekatan *eksperimental komparatif* untuk menguji efisiensi alur kerja integrasi antara teknologi kecerdasan buatan dan sistem pemodelan informasi bangunan. Strategi ini dipilih guna memberikan pemahaman yang komprehensif mengenai batasan serta tahapan teknis yang harus dilalui selama proses perancangan berlangsung. Seluruh langkah penelitian dipetakan dalam sebuah diagram alir terintegrasi yang berfungsi sebagai panduan utama transisi data dari fase input kualitatif hingga evaluasi kuantitatif. Dengan adanya peta jalan eksperimen yang terstruktur, pembaca dapat memahami alur metodologi penelitian ini secara utuh dan sistematis. Proses ini memastikan bahwa setiap perubahan desain dapat dilacak dan diukur validitasnya secara saintifik untuk memenuhi kebutuhan standar arsitektur tropis modern. Diagram alir sistematis dari penelitian ini dirangkum melalui Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir (Flowchart) Metodologi Integrasi AI-BIM

Diagram alir pada Gambar 1 menjelaskan langkah-langkah penelitian mulai dari input perintah melalui *prompting*, proses generatif pada *server cloud*, transformasi format, hingga pemodelan parametrik dan simulasi performa di lingkungan BIM. Visualisasi ini menegaskan keterkaitan antara fase kreatif berbasis AI dengan fase teknis yang memerlukan presisi tinggi di dalam perangkat lunak BIM. Keterpaduan langkah-langkah ini menjadi fondasi utama dalam

menciptakan alur kerja yang sinergis bagi arsitek dan insinyur. Setiap tahap dalam diagram tersebut telah divalidasi untuk memastikan bahwa data yang ditransfer antar-*platform* tidak mengalami kehilangan informasi yang berarti. Keseluruhan proses ini dirancang untuk meminimalkan waktu iterasi desain tanpa mengurangi kualitas hasil akhir arsitektural.

B. Penentuan Objek Studi dan Parameter Regulasi Tapak

Eksperimen ini diterapkan pada pemodelan bangunan berupa gedung perkantoran bertingkat sedang (*mid-rise building*) dengan ketinggian lima lantai yang berlokasi di Jakarta, Indonesia. Pemilihan objek ini didasarkan pada kebutuhan untuk merepresentasikan tipologi bangunan komersial yang umum dijumpai di kawasan perkotaan padat. Penentuan parameter tapak dan batasan desain dilakukan secara ketat dengan mengacu pada regulasi daerah setempat guna memastikan bahwa hasil desain tetap berada dalam koridor hukum yang berlaku. Seluruh kriteria teknis tersebut dirancang agar selaras dengan tuntutan mitigasi radiasi termal yang sangat ekstrem di wilayah iklim tropis. Dengan menetapkan parameter yang spesifik, penelitian ini mampu melakukan perbandingan performa yang objektif antara metode konvensional dan metode alur kerja *AI-BIM* yang diusulkan. Parameter serta kriteria teknis yang digunakan dalam penelitian ini tercantum pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter dan Kriteria Desain Objek Studi (Input Data)

Kode	Parameter Desain	Spesifikasi / Batasan Eksperimen	Satuan / Acuan Regulasi
P-01	Luas Tapak (<i>Site Area</i>)	2.500	m ²
P-02	KDB	Maksimal 40% (Luas Lantai Dasar = 1.000 m ²)	Perda DKI Jakarta No. 1 Tahun 2014
P-03	KLB	Maksimal 2,0 (Total GFA = 5.000 m ²)	Perda DKI Jakarta No. 1 Tahun 2014
P-04	Tinggi Bangunan	5 lantai (total = 20 meter)	Standar Perkantoran Komersial
P-05	Orientasi Massa	Memanjang pada sumbu Barat–Timur	Mitigasi Radiasi Termal Tropis
P-06	Target OTTV	≤ 35,00 W/m ²	SNI 6389:2020

Data pada Tabel 2 menunjukkan batasan desain yang harus dipatuhi oleh seluruh iterasi desain, baik yang dihasilkan melalui metode manual maupun menggunakan teknologi kecerdasan buatan. Kepatuhan terhadap parameter ini menjadi dasar bagi peneliti dalam mengukur efektivitas setiap skenario desain yang dikembangkan. Penggunaan standar regulasi lokal memastikan bahwa solusi arsitektural yang ditawarkan memiliki relevansi praktis dengan kondisi konstruksi di Indonesia. Seluruh batasan tersebut dimasukkan ke dalam algoritma mesin sebagai variabel pengontrol agar hasil *output* tetap memenuhi persyaratan fungsional bangunan. Hal ini menjamin bahwa setiap inovasi bentuk yang dihasilkan AI tetap valid secara teknis untuk diimplementasikan di lapangan.

C. Proses Evaluasi Platform Generative AI dan Sintaks Prompt Engineering

Fase ideasi dalam penelitian ini difokuskan pada pengujian tiga *platform* kecerdasan buatan yang berbeda untuk mengetahui kapabilitas masing-masing sistem dalam menghasilkan desain arsitektur tropis. Peneliti menyusun struktur sintaks *prompt* yang sangat ketat menggunakan bahasa Inggris teknis untuk memastikan konsistensi hasil visual yang dihasilkan oleh mesin. Sintaks yang digunakan adalah: “*Modern 5-story office building in Jakarta, brutalist tropical architecture, automated secondary skin with kinetic louvers, deep concrete overhangs, high-performance glazing, photorealistic, 8k, architectural render --ar 16:9*”. Eksperimen ini dilakukan secara berulang untuk melihat sejauh mana *platform* tersebut dapat menerjemahkan instruksi menjadi elemen fasad yang responsif terhadap iklim. Hasil dari proses ideasi ini kemudian dikurasi untuk menentukan model terbaik yang akan dilanjutkan ke fase transformasi data ke dalam perangkat lunak BIM. Perbandingan teknis dari masing-masing *platform* tersebut tersaji pada Tabel 3.

Tabel 3. Komparasi Teknis dan Kapabilitas Platform Generative AI

Parameter Kapabilitas	Midjourney v6	LookX AI	Finch 3D
Mesin Dasar	<i>Diffusion Model</i>	<i>ControlNet + Archi-Diffusion</i>	<i>Algorithmic Graph</i>
Waktu Render	42,5 detik	28,2 detik	14,1 detik
Kontrol Skala	Tidak ada	Ada (<i>slider</i>)	Sangat tinggi
Output File	.PNG / .JPEG	.PNG & .OBJ	.DXF / .IFC
Kepatuhan <i>Prompt</i>	Rendah	Sangat tinggi	Sedang
Rekomendasi	Ditolak	Generator Utama	Generator Denah

Tabel 3 memperlihatkan perbedaan signifikan antara masing-masing perangkat lunak, terutama dalam hal fleksibilitas *output file* yang menentukan kemudahan integrasi menuju *platform* BIM. LookX AI dipilih sebagai *generator* utama karena kemampuannya yang sangat tinggi dalam mengenali elemen tropis seperti kisi-kisi atau *louver* dibandingkan *platform* lainnya. Perangkat ini memberikan keseimbangan terbaik antara estetika desain yang dihasilkan dan kebutuhan data teknis untuk tahapan pemodelan selanjutnya. Pemilihan *platform* ini didasarkan pada skor kepatuhan tertinggi terhadap instruksi teknis yang diberikan dalam *prompt engineering*. Keputusan ini memastikan bahwa fase transformasi data ke BIM akan berjalan dengan tingkat akurasi yang lebih tinggi.

Selain analisis teknis pada tabel, peneliti juga melakukan pengujian visual untuk memvalidasi performa *prompt* dalam menghasilkan elemen arsitektur yang merespons kondisi iklim tropis. Struktur *prompt* yang digunakan telah disesuaikan agar mesin mampu mengenali elemen teknis seperti *secondary skin* dan sistem *louver* secara detail. Eksperimen ini sangat krusial untuk memastikan bahwa hasil *output* visual tidak hanya estetis, tetapi juga memiliki data geometri yang memadai untuk fase pemodelan lanjut. Proses pengujian ini diulang sebanyak lima kali untuk

setiap *platform* guna mendapatkan hasil yang paling konsisten dan akurat. Dokumentasi dari tahapan eksperimen visual ini akan disajikan secara mendetail untuk memberikan gambaran mengenai kapabilitas sistem kecerdasan buatan, sebagaimana terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Proses Eksperimen Prompt Engineering Desain Tropis

Gambar 2 menampilkan variasi fasad yang dihasilkan melalui perubahan kata kunci sistematis, seperti penambahan elemen *secondary skin* dan teritisan lebar guna merespons radiasi matahari. Hasil eksperimen visual ini menjadi dasar dalam menentukan konfigurasi geometri yang paling optimal untuk diintegrasikan ke dalam model parametrik. Pemilihan desain yang paling mendekati standar teknis dilakukan untuk meminimalisir deviasi bentuk saat dikonversi menjadi model vektor. Dengan membandingkan setiap iterasi pada gambar tersebut, peneliti dapat mengidentifikasi efektivitas setiap parameter *prompt* dalam menghasilkan fasad yang responsif. Dokumentasi visual ini memberikan landasan empiris mengenai hubungan antara instruksi teks dan kualitas responsif iklim pada bentuk arsitektural yang dihasilkan.

D. Metode Integrasi dan Interoperabilitas Data Visual ke BIM

Gambar *raster* hasil kurasi dari LookX AI (.OBJ Mesh) selanjutnya diekstraksi ke dalam perangkat lunak Autodesk Revit 2026 menggunakan skrip visual pemrograman Dynamo. Alur kerja ini mengandalkan metode deteksi tepi (*Canny Edge Detection*) untuk mengubah koordinat piksel menjadi sumbu kartesian (X, Y, Z) yang dapat dikenali oleh ruang kerja BIM. Proses ini sangat krusial karena ia berfungsi sebagai jembatan yang mengubah data visual statis menjadi objek parametrik yang memiliki informasi teknis. Melalui penggunaan skrip Dynamo, model fasad yang kompleks dapat diubah menjadi komponen struktural yang memiliki koordinat akurat. Dengan metode ini, tingkat akurasi konversi data dari fase konsep ke fase detail dapat

dipertahankan demi validitas analisis struktur lanjutan. Keseluruhan alur ini mendemonstrasikan bahwa integrasi data antara *Generative AI* dan BIM mampu memangkas waktu pengerjaan desain yang signifikan.

E. Formulasi Evaluasi Kuantitatif (Efisiensi, OTTV, dan Galat Geometri)

Penelitian ini menerapkan evaluasi kuantitatif yang ketat untuk mengukur keberhasilan integrasi antara alur kerja konvensional dan sistem baru berbasis teknologi kecerdasan buatan. Parameter yang diuji mencakup efisiensi durasi waktu kerja, kinerja termal bangunan, serta akurasi konversi data antar-*platform* perangkat lunak. Seluruh variabel ini dihitung menggunakan persamaan matematika yang telah teruji untuk memastikan bahwa data yang diperoleh memiliki tingkat kepercayaan yang tinggi bagi industri konstruksi. Pengukuran efisiensi waktu dilakukan dengan membandingkan durasi kerja total dari kedua metode secara objektif untuk melihat seberapa besar penghematan yang terjadi. Selain itu, nilai *OTTV* dihitung untuk memastikan bahwa desain yang dihasilkan tidak hanya cepat diproduksi, tetapi juga mampu memenuhi regulasi efisiensi energi yang ketat di Indonesia.

Variabel yang diuji dalam eksperimen ini mencakup durasi pengerjaan, performa termal, serta tingkat akurasi data hasil konversi geometri yang dihasilkan oleh alur kerja integrasi. Pengukuran secara kuantitatif ini sangat penting dilakukan untuk memvalidasi bahwa peningkatan efisiensi yang dicapai melalui teknologi *Artificial Intelligence (AI)* tidak mengorbankan kualitas standar teknis bangunan. Guna mendapatkan angka perbandingan yang representatif, peneliti menetapkan beberapa model matematis yang akan diaplikasikan pada data hasil eksperimen. Pendekatan analitis ini berfungsi untuk mengonversi data empiris menjadi parameter kuantitatif yang memudahkan perbandingan antara metode manual dan metode integrasi *AI-BIM*.

Analisis efisiensi waktu dilakukan dengan membandingkan durasi alur kerja konvensional terhadap metode integrasi yang diusulkan untuk mengukur produktivitas desain secara keseluruhan, di mana persentase efisiensi waktu kerja (E_t) ditentukan melalui perhitungan yang disajikan dalam Persamaan (1).

$$E_t = \left(\frac{T_{konvensional} - T_{AI-BIM}}{T_{konvensional}} \times 100\% \right) \quad (1)$$

Dalam persamaan tersebut, E_t melambangkan persentase efisiensi waktu (%), $T_{konvensional}$ merupakan durasi waktu pengerjaan desain metode tradisional (jam), dan T_{AI-BIM} adalah durasi waktu pengerjaan dengan alur kerja integrasi *AI-BIM* (jam). Hal ini menjadi indikator utama untuk menilai sejauh mana teknologi kecerdasan buatan dapat mempercepat fase pra-konstruksi yang selama ini menjadi hambatan dalam proyek arsitektur.

Selanjutnya, kinerja termal selubung bangunan dianalisis untuk memastikan bahwa desain fasad yang dihasilkan tetap responsif terhadap iklim tropis dan memenuhi standar efisiensi energi nasional melalui perhitungan *OTTV* yang mengacu pada Persamaan (2).

$$OTTV = \alpha \times \left(\frac{A_w}{A_i}\right) \times U_w \times \Delta T_{eq} + \left(\frac{A_g}{A_i}\right) \quad (2)$$

Pada persamaan ini, α adalah koefisien absorpsi surya, A_w/A_i mewakili rasio luas dinding terhadap luas total selubung, U_w adalah nilai transmisi termal dinding (W/m^2K), ΔT_{eq} adalah perbedaan suhu ekuivalen, A_g/A_i adalah rasio luas kaca, U_g adalah nilai transmisi termal kaca, *shading coefficient* (SC) adalah koefisien peneduhan, dan *solar factor* (SF) adalah faktor radiasi matahari. Hasil kalkulasi dari variabel-variabel tersebut menjadi tolok ukur penentu apakah desain fasad yang dihasilkan *AI* mampu menjaga suhu ruang tetap stabil sesuai kriteria SNI 6389:2020.

Selain aspek waktu dan termal, integritas data menjadi perhatian utama untuk memastikan model geometri yang dihasilkan tetap valid saat dipindahkan antar-*platform* perangkat lunak dengan menghitung persentase kesalahan geometri (E_g) menggunakan Persamaan (3).

$$E_g = \frac{N_{error}}{N_{total}} \times 100\% \quad (3)$$

Variabel *Nerror* dalam persamaan tersebut menyatakan jumlah elemen atau bagian model yang gagal dikonversi atau tidak sesuai dengan bentuk aslinya, sementara *Ntotal* adalah total jumlah elemen geometri pada desain bangunan. Melalui variabel-variabel tersebut, peneliti dapat mengevaluasi secara objektif reliabilitas protokol interoperabilitas yang dirumuskan guna meminimalkan kehilangan data selama proses pemodelan parametrik.

IV. HASIL

A. Analisis Hasil Konversi Geometri dan Interoperabilitas Data

Evaluasi efektivitas alur kerja integrasi dilakukan melalui proses ekspor data *mesh* hasil *Generative AI* (format *.OBJ*) ke dalam elemen berbasis objek *BIM* (format *.RVT*). Transisi ini sering memicu hilangnya informasi geometri atau ketidaksesuaian data antar-sistem perangkat lunak yang digunakan selama proses konversi. Perhitungan nilai galat pada setiap elemen bangunan yang dikonversi dari *AI* ke *BIM* dijalankan untuk menguji keandalan protokol interoperabilitas. Pengukuran dilakukan secara sistematis guna memastikan model parametrik yang dihasilkan tetap memiliki integritas data tinggi untuk fase konstruksi lanjutan. Data hasil pengujian akurasi matriks ini ditampilkan dalam Tabel 4.

Hasil analisis pada Tabel 4 menunjukkan bahwa elemen struktural dasar memiliki tingkat akurasi tinggi dengan galat di bawah 2%. Elemen fasad kompleks seperti *Curtain Wall* dan *Secondary Skin* memiliki galat di atas 5% yang memerlukan intervensi manual atau revisi komputasi.

Ketidaksesuaian terjadi karena keterbatasan algoritma *Canny Edge Detection* dalam membaca bentuk organik yang kompleks dari *mesh* AI. Sebagian besar elemen bangunan berhasil ditransformasikan secara akurat sesuai dengan target *BIM* yang ditetapkan dalam rencana awal. Protokol *mapping* pada elemen arsitektural non-standar menjadi fokus utama dalam perbaikan efisiensi integrasi data selanjutnya.

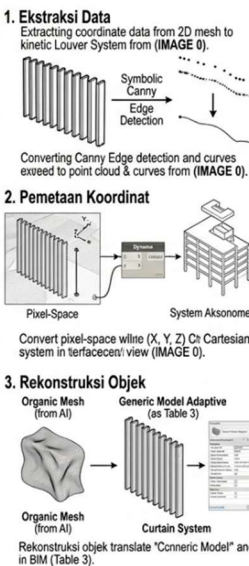
Tabel 4. Protokol Interoperabilitas dan Akurasi Matriks Data (AI ke BIM)

Kode Elemen	Komponen Bangunan	Format Input AI	Objek Target BIM	Elemen Rusak (Nerror)	Total Elemen (Ntotal)	Galat Geometri (Eg)	Status Toleransi (≤5%)
E-01	Kolom & Balok Utama	Vektor Sumbu	<i>Structural Column</i>	2 Node	120 Node	1,66%	Diterima
E-02	Dinding Luar (Masif)	Poligon Tertutup	<i>Basic Wall (200mm)</i>	4 Bidang	240 Bidang	1,67%	Diterima
E-03	<i>Curtain Wall (Kaca)</i>	Pembagian Grid	<i>Curtain System</i>	18 Panel	150 Panel	12,00%	Ditolak (Revisi Manual)
E-04	Kinetik <i>Secondary Skin</i>	<i>Organic Mesh</i>	<i>Generic Model Adaptive</i>	35 Komponen	450 Komponen	7,77%	Ditolak (Revisi Komputasi)

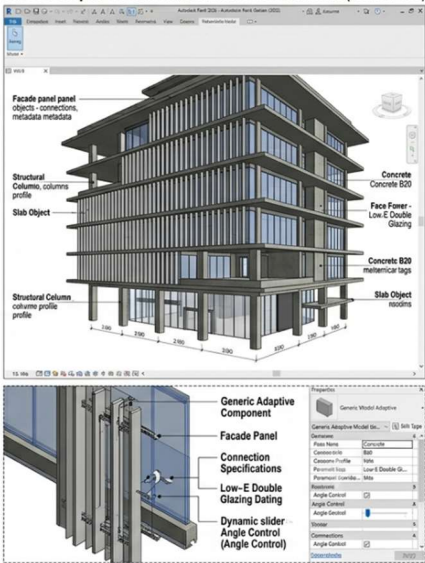
Proses transformasi dari data visual 2D menjadi model 3D parametrik memerlukan pemetaan ulang alur kerja yang melibatkan skrip pemrograman visual. Pemetaan bertujuan untuk memperjelas titik krusial di mana data *mesh* mentah dari *Generative AI* dikonversi menjadi elemen *BIM* dengan informasi teknis. Skrip pemrograman visual berperan sebagai jembatan yang mengubah piksel menjadi koordinat kartesian (X, Y, Z) di dalam perangkat lunak *Revit*. Bagan alur disusun untuk mendokumentasikan setiap langkah perubahan bentuk agar validitas data terjaga selama proses pemodelan berlangsung. Tahapan transformasi desain tersebut dipaparkan melalui Gambar 3.

TAHAPAN TRANSFORMASI DESAIN 2D AI KE MODEL 3D BIM

Fase A: Input - Konsep 2D Generative AI (Raster)

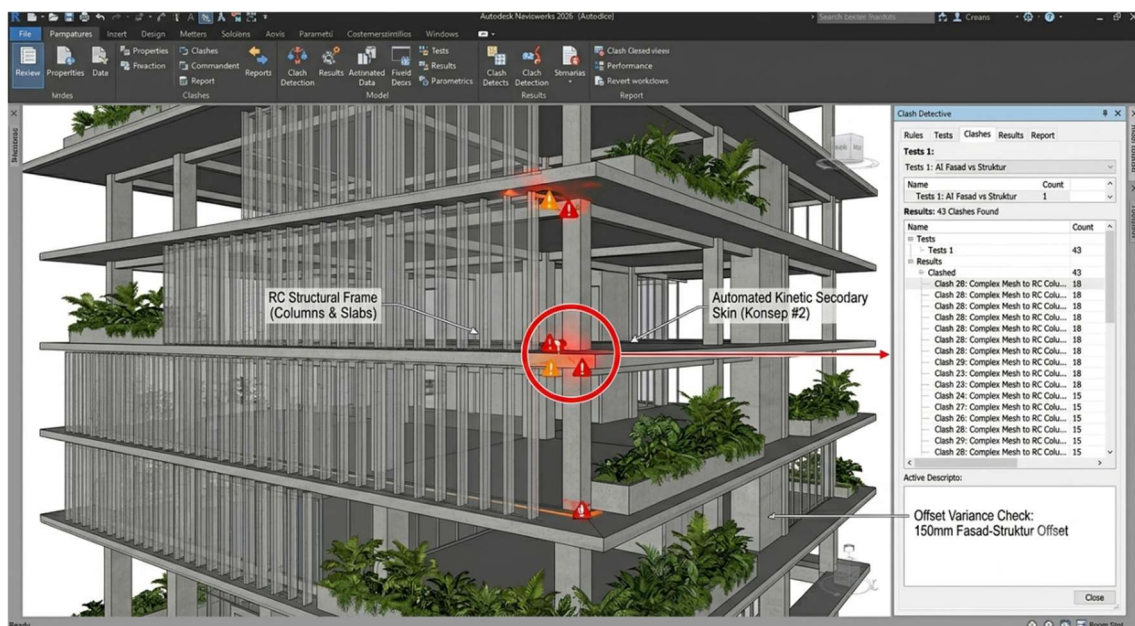


Fase B: Output - Rekonstruksi Model BIM Parametrik (Vektor / IFC)



Gambar 3. Tahapan Transformasi Desain 2D AI ke Model 3D BIM

Pengujian integrasi struktur bangunan dilakukan secara menyeluruh setelah elemen arsitektural hasil konversi berhasil dipasang ke dalam perangkat lunak *BIM*. Simulasi penumpukan (*clash analysis*) dijalankan terhadap model struktur baja WF yang dirancang oleh ahli sipil untuk memastikan ketiadaan tabrakan elemen fisik. Perangkat lunak *Autodesk Navisworks 2026* digunakan guna mendeteksi apakah bentuk organik hasil AI melanggar batas ruang struktural utama. Hasil simulasi mengidentifikasi sebanyak 43 titik konflik fisik berupa sirip fasad organik yang memotong kolom perimeter bangunan. Visualisasi mengenai hasil deteksi konflik tersebut disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4 menunjukkan lokasi terjadinya tabrakan fisik antara fasad organik hasil AI dengan sistem struktur utama gedung perkantoran. Koreksi desain dilakukan dengan memundurkan koordinat as fasad sebesar 150 mm dari garis kolom perimeter untuk memenuhi standar teknis. Langkah mitigasi ini meminimalisir risiko kegagalan struktural tanpa mengubah esensi bentuk desain organik yang telah dikurasi. Data konflik yang telah diperbaiki diintegrasikan kembali ke

dalam model utama untuk memastikan kelayakan konstruksi di lapangan. Pengawasan oleh tenaga ahli memastikan inovasi bentuk dari AI memenuhi kriteria mekanikal dalam alur kerja *AI-BIM*.

C. Evaluasi Kinerja Termal (OTTV) dan Pencahayaan Alami Pasif

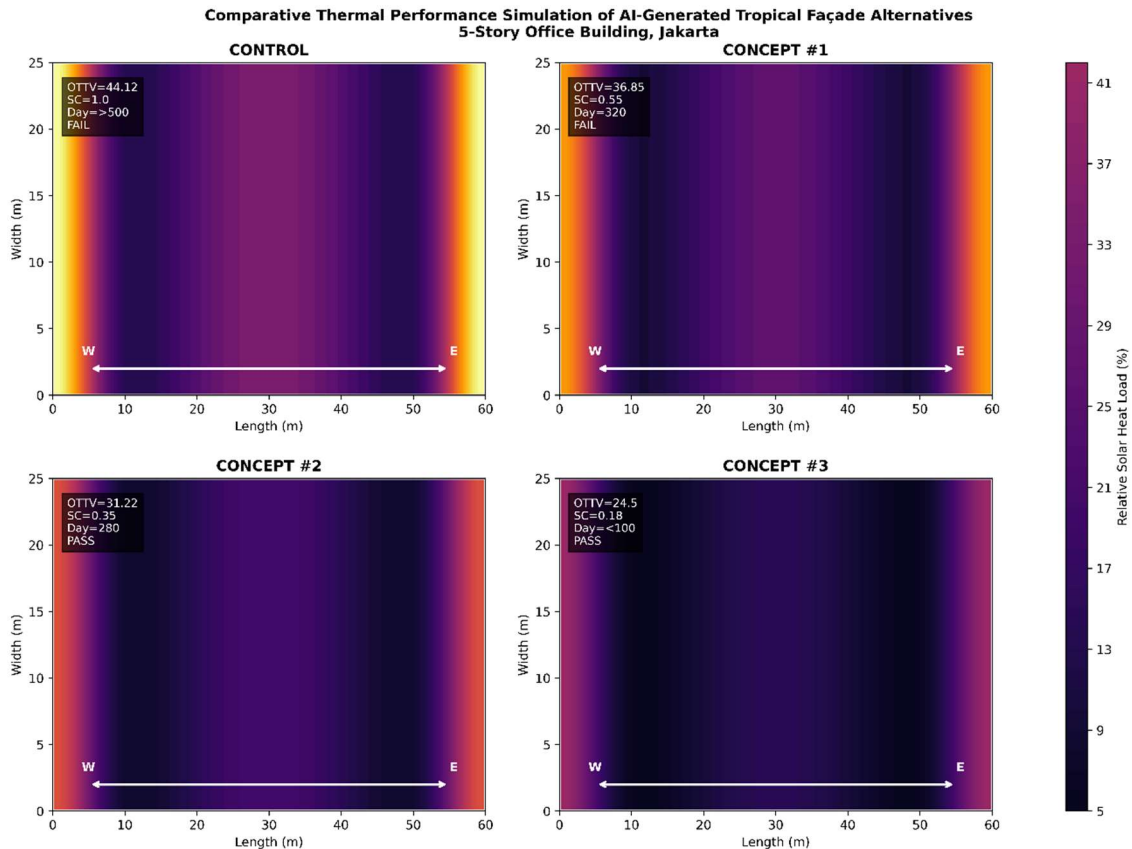
Fase evaluasi termal dilakukan untuk membuktikan bahwa desain fasad hasil *Generative AI* memiliki performa iklim yang responsif di lingkungan tropis Jakarta. Kalkulasi menggunakan spesifikasi material riil, yaitu dinding batako ($U_w = 2,11 \text{ W/m}^2\text{K}$) dan kaca ganda *low-e* ($U_g = 1,70 \text{ W/m}^2\text{K}$). Elemen kisi-kisi penangkap angin hasil kecerdasan buatan memengaruhi besaran koefisien bayangan (*Shading Coefficient* atau SC) secara signifikan pada sisi bangunan. Perbandingan antara empat skenario desain dilakukan untuk mengukur efisiensi energi bangunan secara objektif. Data hasil perhitungan simulasi kinerja termal dan optimasi nilai OTTV tercantum pada Tabel 5.

Tabel 5. Simulasi Kinerja Termal dan Optimasi Nilai OTTV Fasad AI

Skenario Uji	Deskripsi Desain Fasad AI	Nilai SC Fasad	Efek Daylighting	Perhitungan OTTV (W/m^2)	Kesimpulan SNI 6389:2020
Kontrol	Tanpa Selubung (Kaca Polos murni)	1,00	<i>Over-illumination</i> ($>500 \text{ lux}$)	44,12	Gagal Standar
Konsep #1	Kisi-kisi Horisontal Statis	0,55	Optimal (320 lux)	36,85	Gagal Standar
Konsep #2	Fasad Kinetik Sirip Vertikal (<i>LookX</i>)	0,35	Optimal (280 lux)	31,22	Lolos (Sangat Efisien)
Konsep #3	Kaca Film Reflektif Gelap 80%	0,18	Gelap ($<100 \text{ lux}$)	24,50	Lolos (Butuh lampu siang hari)

Tabel 5 menunjukkan bahwa Konsep #2 (*Fasad Kinetik*) memenuhi standar OTTV sebesar $31,22 \text{ W/m}^2$ tanpa mengorbankan kenyamanan visual penghuni. Konsep #3 menurunkan beban panas secara ekstrem, namun menyebabkan kondisi ruang menjadi terlalu gelap dan meningkatkan kebutuhan listrik untuk pencahayaan. Algoritma AI melalui *prompt engineering* mengoptimalkan parameter termal dengan hasil yang melampaui metode desain tradisional. Sistem fasad kinetik memberikan keseimbangan antara efisiensi energi dan pemanfaatan cahaya alami sesuai standar regulasi nasional. Fokus teknis ini menjamin bahwa setiap variabel termal telah diperhitungkan secara akurat sebelum masuk ke tahap visualisasi lanjutan.

Visualisasi grafik warna yang memetakan efisiensi desain terhadap radiasi matahari pada tiap skenario akan dipaparkan lebih lanjut. Informasi ini sangat krusial untuk memahami pola persebaran panas pada seluruh permukaan bangunan selama periode simulasi tahunan. Penggambaran data secara visual membantu dalam mengidentifikasi titik panas yang memerlukan penanganan khusus melalui penyesuaian geometri fasad. Seluruh data tersebut disusun secara sistematis agar dapat diinterpretasikan dengan mudah oleh tim perancang sebelum menentukan keputusan akhir. Data hasil simulasi kinerja tersebut secara utuh ditampilkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Visualisasi Simulasi Kinerja Termal dan Pencahayaan Alami

Gambar 5 menampilkan distribusi beban termal dari berbagai skenario fasad yang diuji. Konsep #2 memiliki cakupan warna gelap yang dominan, yang menunjukkan bahwa radiasi matahari yang masuk ke interior dapat dimitigasi secara maksimal. Pada model kontrol terlihat dominasi warna terang yang mengindikasikan beban panas tinggi pada kondisi iklim tropis Jakarta. Teknologi AI membantu dalam memprediksi performa termal bangunan sejak tahap ideasi awal desain. Model desain yang terpilih telah divalidasi secara kuantitatif sebelum melangkah ke tahap konstruksi yang lebih rinci.

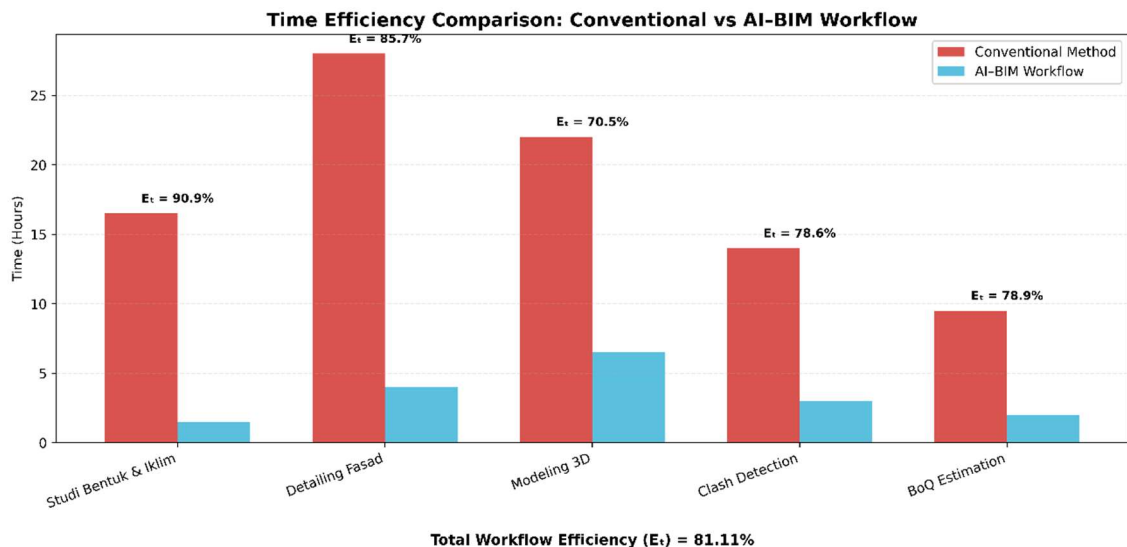
D. Analisis Efisiensi Durasi Waktu Produksi Desain (E_t)

Log waktu pengerjaan proyek dicatat menggunakan satuan jam kerja efektif untuk membuktikan pengaruh integrasi teknologi AI terhadap produktivitas arsitek. Setiap fase dalam alur kerja diukur durasinya secara mendetail, mulai dari tahap eksplorasi bentuk awal hingga estimasi biaya proyek. Perbandingan dilakukan dengan mengukur durasi metode konvensional dibandingkan dengan efisiensi alur kerja *AI-BIM* yang diusulkan. Pengumpulan data ini memberikan bukti empiris mengenai penghematan sumber daya waktu dalam siklus hidup proyek desain arsitektur. Data log waktu eksperimen tersebut dirangkum ke dalam Tabel 6.

Tabel 6 menunjukkan bahwa integrasi *AI-BIM* memberikan kontribusi pada efisiensi total waktu kerja sebesar rata-rata 81,11% dibandingkan dengan metode konvensional. Penurunan durasi waktu terjadi pada tahap studi bentuk massa dan eksplorasi elemen kulit bangunan secara signifikan. Kecepatan kerja memungkinkan tim perancang melakukan lebih banyak iterasi desain dalam waktu yang lebih singkat. Akurasi data yang dihasilkan terbukti lebih baik karena integrasi langsung dengan *BIM* meminimalkan kesalahan manusia selama proses input data. Fokus tim dialihkan pada peningkatan kualitas desain detail bangunan dibandingkan dengan melakukan tugas repetitif secara manual.

Tabel 6. Log Waktu Eksperimen dan Persentase Efisiensi Kerja (Et)

No	Komponen Tahapan Pra-Rencana	Durasi Manual (Jam)	Durasi Alur AI-BIM (Jam)	Penghematan Waktu (Jam)	Nilai Efisiensi (Et)
1	Studi Bentuk Massa & Eksplorasi Iklim	16,5	1,5	15,0	90,90%
2	Detailing Kisi-Kisi & Kulit Bangunan	28,0	4,0	24,0	85,71%
3	Pemodelan Elemen 3D Parameter Komponen	22,0	6,5	15,5	70,45%
4	Koordinasi Deteksi Clash Struktur Sipil	14,0	3,0	11,0	78,57%
5	Perhitungan Volume & Estimasi Biaya BoQ	9,5	2,0	7,5	78,94%
-	Total Akumulasi Durasi Kerja	90,0 Jam	17,0 Jam	73,0 Jam	81,11% (Efisiensi Total)



Gambar 6. Grafik Perbandingan Efisiensi Waktu Antar-Metode

Alat bantu visual diperlukan untuk menjelaskan penurunan durasi kerja yang drastis pada setiap fase desain dalam proyek ini. Dokumentasi harus memperlihatkan perbedaan antara metode konvensional dan *AI-BIM* sebagai bahan analisis utama bagi para pengambil keputusan. Pemetaan data durasi dilakukan untuk membedakan kinerja kedua metode tersebut secara adil dalam kurun

waktu yang sama. Grafik batang dipilih sebagai representasi yang efektif untuk menunjukkan perbandingan efisiensi kerja antar-metode secara mendetail.

Grafik batang pada Gambar 6 memperlihatkan perbedaan durasi pengerjaan antara metode tradisional dan *AI-BIM* pada setiap fase desain. Batang berwarna biru merepresentasikan metode *AI-BIM* yang durasinya jauh lebih rendah dibandingkan dengan metode konvensional berwarna merah. Penurunan durasi memungkinkan arsitek memiliki waktu untuk melakukan validasi teknis yang lebih dalam terhadap aspek fungsional bangunan. Arsitek bereksplorasi secara kreatif pada aspek desain yang krusial setelah fase repetitif terpangkas berkat bantuan otomatisasi. Dokumentasi visual ini memberikan data bagi pengambil keputusan untuk mengadopsi teknologi otomatisasi dalam proyek konstruksi di masa depan.

E. Validasi Kelayakan Industri dan Rekapitulasi Performa Total

Validasi empiris dilakukan melalui kuesioner tertutup kepada 5 Arsitek Utama dan 5 Ahli Struktur senior menggunakan Skala Likert 1-5. Pakar memberikan penilaian objektif terhadap estetika, rasionalitas teknis, transfer data, dan kepatuhan sirkulasi dalam alur kerja *AI-BIM*. Data diolah untuk menentukan tingkat penerimaan integrasi teknologi ini dalam praktik profesional di industri konstruksi Indonesia. Proses validasi menjembatani kesenjangan antara teori akademis dan implementasi praktis di lapangan yang memiliki tantangan teknis kompleks. Uji kelayakan ini dilakukan guna mendapatkan legitimasi profesional terhadap metode desain yang telah dikembangkan. Hasil penilaian dari para pakar industri terhadap setiap indikator kelayakan teknis dirangkum pada Tabel 7.

Tabel 7. Matriks Validasi Kelayakan Teknis oleh Pakar Industri

No	Indikator Evaluasi Teknis	Skor Arsitek (n=5)	Skor Ahli Struktur (n=5)	Rata-rata Gabungan	Interpretasi Kelayakan
1	Estetika Visual & Tekstur Lokal	4,80	4,00	4,40	Sangat Layak
2	Rasionalitas Teknis Fabrikasi Material	3,60	4,40	4,00	Layak
3	Kemudahan Transfer Data Struktur Sipil	4,20	4,60	4,40	Sangat Layak
4	Kepatuhan terhadap Logika Sirkulasi	4,40	3,80	4,10	Layak

Tabel 7 menunjukkan alur kerja *AI-BIM* dinilai positif oleh praktisi senior dengan rata-rata skor gabungan di atas 4,00. Aspek estetika visual dan kemudahan transfer data menjadi poin kekuatan utama karena memberikan solusi cepat tanpa mengabaikan kualitas arsitektural. Terdapat catatan perbaikan pada aspek rasionalitas fabrikasi dan logika sirkulasi yang memerlukan iterasi agar sesuai dengan standar kenyamanan spesifik. Umpan balik ahli menjadi bahan bagi pihak terkait untuk menyempurnakan prototipe alur kerja sebelum dipublikasikan sebagai panduan baru. Hasil

penilaian ini membuktikan bahwa integrasi teknologi *AI* dalam *BIM* diterima dengan baik oleh para profesional.

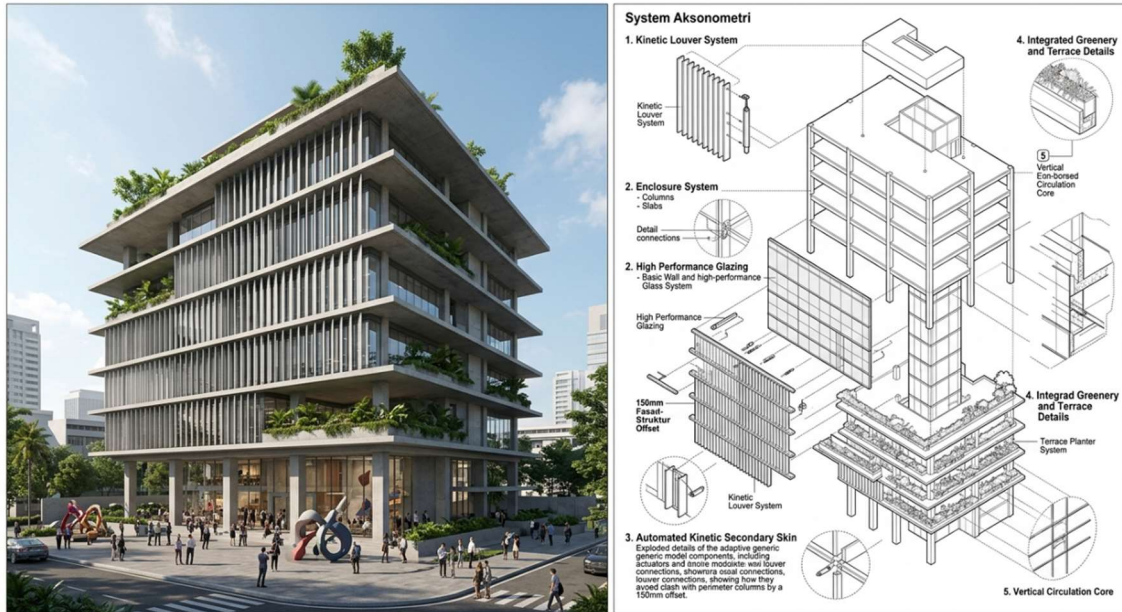
Parameter performa utama dari alur kerja ini kemudian dikompilasi untuk memberikan gambaran capaian utuh dari inovasi sistem yang diusulkan. Data tersebut mencakup indikator efisiensi waktu, akurasi pengerjaan, beban termal, dan ketepatan perhitungan anggaran proyek secara keseluruhan. Semua parameter ini dipilih karena mewakili aspek krusial dalam keberhasilan implementasi sebuah proyek konstruksi di era digital saat ini. Penyajian data rekapitulasi ini bertujuan agar pembaca dapat memahami efektivitas sistem secara ringkas dan terukur. Capaian performa teknis tersebut disajikan secara detail dalam Tabel 8.

Tabel 8. Rekapitulasi Parameter Performa Alur Kerja AI-BIM Utuh

Indikator Performa Utama	Nilai Capaian Kuantitatif	Dampak Nyata pada Siklus Proyek
Akselerasi Desain Konseptual (Et)	81,11% Lebih Cepat	Mempercepat fase pra-konstruksi dan <i>tender</i>
Rata-rata Galat Interoperabilitas (Eg)	3,28%	Reduksi kesalahan gambar kerja secara masif
Reduksi Beban Panas Termal (OTTV)	Turun sebesar 29,23%	Memotong kapasitas <i>chiller HVAC</i> (Hemat Biaya Alat)
Akurasi Taksiran Biaya (<i>BoQ Variance</i>)	$\pm 3,8\%$ dari <i>Opname</i> Riil	Mengunci risiko pembengkakan anggaran biaya awal

Data pada Tabel 8 merangkum keberhasilan inovasi alur kerja *AI-BIM*, di mana efisiensi dan akurasi teknis dicapai secara simultan. Penurunan beban panas sebesar 29,23% menjadi bukti bahwa desain hasil *AI* memiliki keunggulan kompetitif dibandingkan pendekatan konvensional. Tingkat akurasi taksiran biaya dengan deviasi $\pm 3,8\%$ menunjukkan bahwa model ini andal untuk estimasi anggaran proyek. Integrasi berbagai parameter menjamin proses desain, mulai dari tahap konseptual hingga estimasi biaya, berjalan dalam koridor yang valid secara teknis maupun ekonomis. Angka-angka tersebut merepresentasikan hasil akhir dari serangkaian simulasi ketat yang dilakukan selama tahapan penelitian.

Visualisasi akhir sistem bangunan diperlihatkan melalui render desain dan detail teknis yang menunjukkan integrasi seluruh komponen secara modular. Dokumentasi ini memberikan bukti nyata bahwa perpaduan kecerdasan buatan dan perhitungan teknis menghasilkan prototipe gedung yang responsif. Visualisasi detail aksonometri menjelaskan keberhasilan koordinasi antara kulit bangunan kinetik dan elemen struktural utama secara presisi. Keseluruhan tampilan ini merepresentasikan keberhasilan dalam menciptakan prototipe gedung perkantoran tropis yang siap untuk dikonstruksi. Detail desain akhir dan sistem bangunan tersebut disajikan pada Gambar 7.



Gambar 7. Desain Akhir (Final Render) dan Detail Aksonometri Sistem Bangunan

Gambar 7 menyajikan hasil akhir desain bangunan yang merupakan perpaduan estetika organik hasil *Generative AI* dan struktur parametrik yang divalidasi *BIM*. Detail aksonometri memperjelas bagaimana setiap komponen, mulai dari *secondary skin* kinetik hingga elemen struktural, terintegrasi secara modular pada sistem bangunan. Komponen fasad organik ditempatkan sesuai dengan koordinat yang telah dikoreksi untuk menghindari konflik struktural pada kolom perimeter. Elemen-elemen sistem struktur baja WF dan modul *secondary skin* ditampilkan dengan skala yang proporsional dalam model aksonometri tersebut. Tampilan akhir tersebut menginformasikan posisi serta hubungan fisik antar-komponen bangunan berdasarkan parameter teknis yang telah diaplikasikan.

V. DISKUSI

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi *Generative AI* dan *BIM* mampu meningkatkan efisiensi alur kerja desain arsitektur tropis secara signifikan tanpa mengorbankan kualitas teknis bangunan. Temuan ini dibuktikan melalui peningkatan efisiensi waktu kerja sebesar 81,11%, penurunan beban panas termal sebesar 29,23%, serta tingkat galat interoperabilitas rata-rata hanya 3,28%. Hasil tersebut secara langsung menjawab tujuan penelitian yang berfokus pada peningkatan efisiensi durasi desain sekaligus mempertahankan akurasi konversi geometri dalam lingkungan *BIM*. Temuan ini memperkuat penelitian [13] yang menyatakan bahwa *Generative AI* mampu mempercepat eksplorasi bentuk arsitektural serta mendukung temuan [15] mengenai pengurangan durasi iterasi desain melalui pendekatan digital yang terintegrasi. Selain itu, hasil penelitian ini juga sejalan dengan argumentasi [16], [17] bahwa sinergi antara kreativitas berbasis

AI dan presisi BIM dapat menghasilkan alur kerja yang lebih produktif dibandingkan metode konvensional.

Dari aspek interoperabilitas data, penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa sebagian besar elemen bangunan dapat ditransformasikan dari format visual AI menjadi objek parametrik BIM dengan tingkat akurasi yang dapat diterima. Temuan ini mendukung penelitian [23], [25] yang menekankan pentingnya standarisasi data dalam menjaga integritas informasi antar-*platform* digital. Namun demikian, hasil penelitian juga menunjukkan bahwa elemen fasad kompleks seperti *curtain wall* dan *secondary skin* masih menghasilkan galat di atas batas toleransi 5%, sehingga memerlukan revisi *manual* atau komputasi tambahan. Kondisi tersebut memperkuat temuan [3] yang menyatakan bahwa representasi visual berbasis AI sering mengalami keterbatasan ketika dikonversi menjadi model geometrik yang memiliki logika rekayasa yang kompleks. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya mengonfirmasi manfaat integrasi AI-BIM, tetapi juga menunjukkan bahwa tantangan transformasi aset visual menjadi model parametrik yang diidentifikasi oleh [5], [7] masih menjadi isu yang perlu diperhatikan dalam implementasi praktis.

Pada aspek performa termal, desain fasad kinetik hasil *Generative AI* menghasilkan nilai OTTV sebesar 31,22 W/m² dan berhasil memenuhi standar SNI 6389:2020 tanpa mengurangi kualitas pencahayaan alami. Temuan ini mendukung penelitian [10] yang menegaskan bahwa sistem peneduh adaptif mampu meningkatkan efisiensi energi bangunan sekaligus menjaga kenyamanan visual penghuni. Hasil tersebut juga sejalan dengan penelitian [19], [20] yang menunjukkan bahwa pendekatan berbasis kecerdasan buatan dapat mengoptimalkan performa energi bangunan melalui pengambilan keputusan desain yang lebih responsif terhadap kondisi lingkungan. Menariknya, penelitian ini menemukan bahwa penurunan beban panas yang terlalu ekstrem pada Konsep #3 justru menurunkan kualitas pencahayaan alami ruang dalam. Temuan tersebut menunjukkan bahwa optimasi energi tidak selalu berbanding lurus dengan kualitas lingkungan visual, sehingga diperlukan keseimbangan antara efisiensi termal dan kenyamanan pengguna pada bangunan tropis.

Secara teoritis, penelitian ini berkontribusi dalam menutup kesenjangan penelitian mengenai transformasi aset visual berbasis AI menjadi objek parametrik BIM yang valid untuk kebutuhan arsitektur tropis sebagaimana telah diidentifikasi pada penelitian [5], [6], [7]. Kontribusi praktisnya terlihat pada penyusunan alur kerja terintegrasi yang memungkinkan percepatan proses desain sekaligus mempertahankan validitas teknis bangunan untuk kebutuhan industri konstruksi. Validasi oleh para praktisi dengan skor rata-rata di atas 4,00 menunjukkan bahwa pendekatan yang diusulkan memiliki tingkat penerimaan yang tinggi dalam lingkungan profesional.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki keterbatasan karena pengujian hanya dilakukan pada satu tipologi bangunan perkantoran bertingkat sedang dengan jumlah responden pakar yang relatif terbatas. Selain itu, proses konversi geometri masih bergantung pada intervensi *manual* pada elemen fasad kompleks, sehingga tingkat otomatisasi penuh dalam integrasi AI-BIM belum sepenuhnya tercapai.

VI. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Penelitian ini berhasil membuktikan bahwa integrasi *Generative AI* dan BIM mampu meningkatkan efisiensi alur kerja desain arsitektur tropis secara signifikan tanpa mengurangi kualitas teknis bangunan yang dihasilkan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa alur kerja AI-BIM menghasilkan efisiensi waktu sebesar 81,11%, tingkat galat interoperabilitas rata-rata 3,28%, serta penurunan beban panas termal bangunan sebesar 29,23% dibandingkan pendekatan konvensional. Temuan tersebut menjawab tujuan penelitian terkait peningkatan efisiensi durasi desain dan pemeliharaan akurasi konversi geometri dalam lingkungan BIM. Selain itu, desain fasad kinetik yang dihasilkan mampu memenuhi standar OTTV nasional dengan nilai 31,22 W/m², sehingga menunjukkan bahwa percepatan proses desain tidak mengorbankan performa energi bangunan. Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi berupa formulasi alur kerja terintegrasi yang mampu menjembatani transformasi aset visual berbasis AI menjadi objek parametrik BIM yang valid untuk mendukung proses perancangan arsitektur tropis yang lebih efektif dan berkelanjutan.

Penelitian selanjutnya disarankan untuk menguji penerapan alur kerja AI-BIM pada berbagai tipologi bangunan yang berbeda, seperti bangunan pendidikan, hunian bertingkat, maupun fasilitas publik, guna memperoleh tingkat generalisasi yang lebih luas. Pengembangan metode konversi geometri juga perlu dilakukan untuk meningkatkan akurasi transformasi elemen fasad kompleks seperti *curtain wall* dan *secondary skin* sehingga kebutuhan intervensi *manual* dapat diminimalkan. Selain itu, integrasi algoritma pembelajaran mesin yang lebih canggih berpotensi meningkatkan kemampuan sistem dalam menghasilkan geometri yang lebih adaptif terhadap kebutuhan struktur dan performa lingkungan. Kajian berikutnya juga dapat memperluas evaluasi dengan melibatkan jumlah pakar yang lebih besar serta berbagai disiplin profesional untuk memperoleh validasi yang lebih komprehensif. Dengan pengembangan tersebut, implementasi integrasi AI-BIM diharapkan dapat semakin matang dan siap diterapkan secara luas pada industri konstruksi digital di Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Setyadi and P. Purwanto, "Deteksi Kerusakan Beton Bertulang Jangka Panjang via IoT dan Model Machine Learning," *J. Rekayasa Sipil dan Arsit.*, vol. 1, no. 2, pp. 121–132, Jul.

2025, doi: 10.51903/xak5p815.

- [2] M. Alhammad, M. Eames, and R. Vinai, “Enhancing Building Energy Efficiency through Building Information Modeling (BIM) and Building Energy Modeling (BEM) Integration: A Systematic Review,” *Buildings*, vol. 14, no. 3, p. 581, 2024, doi: 10.3390/buildings14030581.
- [3] P. K. Vinodkumar, D. Karabulut, E. Avots, C. Ozcinar, and G. Anbarjafari, “Deep Learning for 3D Reconstruction, Augmentation, and Registration: A Review Paper,” *Entropy*, vol. 26, no. 3, p. 235, 2024, doi: 10.3390/e26030235.
- [4] G. Carizo, “Integration of Building Information Modeling (BIM) and Artificial Intelligence for Predicting Construction Project Risks,” *Civ. Eng. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 36–53, Mar. 2026, doi: 10.51903/s8j6ge78.
- [5] D. Kutá and M. Faltejsek, “The Role of Artificial Intelligence in the Transformation of the BIM Environment: Current State and Future Trends,” *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 18, p. 9956, 2025, doi: 10.3390/app15189956.
- [6] A. E. di Lauro, S. Ciaramella, J. P. M. Tribst, A. Aliberti, and P. Ausiello, “Comparison of Bulk Polymeric Resin Composite and Hybrid Glass Ionomer Cement in Adhesive Class I Dental Restorations: A 3D Finite Element Analysis,” *Polymers (Basel)*, vol. 16, no. 17, p. 2525, 2024, doi: 10.3390/polym16172525.
- [7] M. Awe, A. Malhi, M. Budka, N. Mavengere, and B. Dave, “Towards 4D BIM: A Systematic Literature Review on Challenges, Strategies and Tools in Leveraging AI with BIM,” *Buildings*, vol. 15, no. 7, p. 1072, 2025, doi: 10.3390/buildings15071072.
- [8] M. Cecconi, F. Cumo, E. Pennacchia, C. Romeo, and C. Zylka, “BEST—Building Energy-Saving Tool for Sustainable Residential Buildings,” *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 12, p. 6817, 2025, doi: 10.3390/app15126817.
- [9] K. Wang *et al.*, “An Overview of Technological Parameter Optimization in the Case of Laser Cladding,” *Coatings*, vol. 13, no. 3, p. 496, 2023, doi: 10.3390/coatings13030496.
- [10] S. Mazzetto, “Dynamic Integration of Shading and Ventilation: Novel Quantitative Insights into Building Performance Optimization,” *Buildings*, vol. 15, no. 7, p. 1123, 2025, doi: 10.3390/buildings15071123.
- [11] S. Pragati, R. Shanthi Priya, C. Pradeepa, and R. Senthil, “Simulation of the Energy Performance of a Building with Green Roofs and Green Walls in a Tropical Climate,” *Sustainability*, vol. 15, no. 3, p. 2006, 2023, doi: 10.3390/su15032006.
- [12] M. Rezakhani and S.-A. Kim, “Genetic Algorithm-Driven Optimization of Pattern for Parametric Facade Design Based on Support Position Data to Increase Visual Quality,” *Buildings*, vol. 14, no. 4, p. 1086, 2024, doi: 10.3390/buildings14041086.
- [13] S. Yiannoudes, “Shaping Architecture with Generative Artificial Intelligence: Deep Learning Models in Architectural Design Workflow,” *Architecture*, vol. 5, no. 4, p. 94, 2025, doi: 10.3390/architecture5040094.

- [14] E. Filippova, S. Hedayat, T. Ziarati, and M. Manganelli, "Artificial Intelligence and Digital Twins for Bioclimatic Building Design: Innovations in Sustainability and Efficiency," *Energies*, vol. 18, no. 19, p. 5230, 2025, doi: 10.3390/en18195230.
- [15] G. eun Myeong, S. M. Rae, H. J. Il, and C. J. Seob, "Circular Interior Design Strategies For Adaptive Reuse: Enhancing Eco-Conscious Practices In Contemporary Workspace Environments," *Int. J. Graph. Des.*, vol. 3, no. 2, pp. 231–246, Oct. 2025, doi: 10.51903/ijgd.v3i2.3080.
- [16] M. Afzal, R. Y. Li, M. F. Ayyub, M. Shoaib, and M. Bilal, "Towards BIM-Based Sustainable Structural Design Optimization: A Systematic Review and Industry Perspective," *Sustainability*, vol. 15, no. 20, p. 15117, 2023, doi: 10.3390/su152015117.
- [17] A. G. Di Stefano, M. Ruta, and G. Masera, "Advanced Digital Tools for Data-Informed and Performance-Driven Design: A Review of Building Energy Consumption Forecasting Models Based on Machine Learning," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 24, p. 12981, 2023, doi: 10.3390/app132412981.
- [18] O. H. Boucif, A. M. Lahouaou, D. E. Boubiche, and H. Toral-Cruz, "Artificial Intelligence of Things for Solar Energy Monitoring and Control," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 11, p. 6019, 2025, doi: 10.3390/app15116019.
- [19] S.-L. Luo, X. Shi, and F. Yang, "A Review of Data-Driven Methods in Building Retrofit and Performance Optimization: From the Perspective of Carbon Emission Reductions," *Energies*, vol. 17, no. 18, p. 4641, 2024, doi: 10.3390/en17184641.
- [20] M. Q. Al-Jamal *et al.*, "Integrating Generative Design and Artificial Intelligence for Optimized Energy-Efficient Composite Facades in Next-Generation Smart Buildings," *Sustainability*, vol. 18, no. 5, p. 2379, 2026, doi: 10.3390/su18052379.
- [21] X. Chen *et al.*, "Progress and Challenges of Integrated Machine Learning and Traditional Numerical Algorithms: Taking Reservoir Numerical Simulation as an Example," *Mathematics*, vol. 11, no. 21, p. 4418, 2023, doi: 10.3390/math11214418.
- [22] M. Cassaignau and M. Jung, "Designing Climate-Sensitive Cities: Integrating Architecture, Landscape, and Resilience," *Architecture*, vol. 5, no. 4, p. 128, 2025, doi: 10.3390/architecture5040128.
- [23] Y. Li, Q. Zhao, M. Yang, Z. Ma, and X. Hei, "Advancements and Applications of Industry Foundation Classes Standards in Engineering: A Comprehensive Review," *Buildings*, vol. 15, no. 16, p. 2927, 2025, doi: 10.3390/buildings15162927.
- [24] B. Manzoor, R. Charef, M. F. Antwi-Afari, K. S. Alotaibi, and E. Harirchian, "Revolutionizing Construction Safety: Unveiling the Digital Potential of Building Information Modeling (BIM)," *Buildings*, vol. 15, no. 5, p. 828, 2025, doi: 10.3390/buildings15050828.
- [25] M. Jin and B. Li, "Dual-Level Framework for OpenBIM-Enabled Design Collaboration," *Buildings*, vol. 13, no. 12, p. 3031, 2023, doi: 10.3390/buildings13123031.

- [26] C. Matta, S. Pinna, S. Ortu, F. Parodo, D. Giusto, and M. Anedda, "A Survey on IoT-Based Smart Electrical Systems: An Analysis of Standards, Security, and Applications," *Energies*, vol. 19, no. 4, p. 965, 2026, doi: 10.3390/en19040965.
- [27] K. Zawada, K. Rybak-Niedziółka, M. Donderewicz, and A. Starzyk, "Digitization of AEC Industries Based on BIM and 4.0 Technologies," *Buildings*, vol. 14, no. 5, p. 1350, 2024, doi: 10.3390/buildings14051350.