

Automasi Deteksi Konflik Struktur Arsitektural Menggunakan Algoritma Kecerdasan Buatan Berbasis Cloud

Evanard Putranata^{*1}, Mirelle Adisty²

Email: evann010@gmail.com, mirelleadi88@gmail.com

¹Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Telkom, Bandung, Indonesia, 40257

²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Komputer Indonesia, Bandung, Indonesia, 40132

*Corresponding Author

Article Information	Abstract
Keywords: Clash Detection; Graph Networks; Cloud Computing; OpenBIM IFC; Design Coordination.	<i>The increasing complexity of modern construction projects has intensified coordination challenges among architectural, structural, and Mechanical-Electrical-Plumbing (MEP) disciplines. Conventional Building Information Modeling (BIM)-based clash detection methods are capable of identifying spatial conflicts but often generate high false-positive rates and require time-consuming manual verification. This study aims to develop an automated conflict detection framework by integrating Graph Neural Networks (GNN) and cloud computing within an OpenBIM Industry Foundation Classes (IFC) environment. A quantitative experimental approach was employed using a coordinated BIM model containing 44,800 three-dimensional objects from architectural, structural, and MEP disciplines. Spatial relationships among building elements were represented as graphs and analyzed using a GNN-PointNet++ architecture deployed on a cloud-based GPU environment. The results demonstrate that the proposed system successfully classified hard clash, soft clash, 4D time clash, and regulatory clash conflicts, achieving a precision of 98.67%, recall of 99.15%, and F1-Score of 98.91%. Furthermore, the framework reduced total design coordination time from 11.50 hours to 0.35 hours, corresponding to a computational efficiency of 96.95%, while maintaining 100% IFC interoperability and a false alarm rate of 1.32%. The novelty of this research lies in the integration of GNN-based spatial graph learning and cloud computing for automatic multi-type conflict classification in OpenBIM IFC models. The proposed framework improves both the accuracy and efficiency of BIM-based design coordination for digital construction environments.</i>
Kata Kunci: Deteksi Konflik; Jaringan Graf; Komputasi Awan; OpenBIM IFC; Koordinasi Desain.	Abstrak Meningkatnya kompleksitas proyek konstruksi modern telah memperbesar tantangan koordinasi antara disiplin arsitektur, struktur, dan Mekanikal-Elektrikal-Plumbing (MEP). Metode <i>clash detection</i> berbasis <i>Building Information Modeling</i> (BIM) konvensional mampu mengidentifikasi konflik spasial, namun masih menghasilkan tingkat <i>false positive</i> yang tinggi dan memerlukan proses verifikasi manual yang memakan waktu. Penelitian ini bertujuan mengembangkan kerangka kerja deteksi konflik otomatis dengan mengintegrasikan <i>Graph Neural Networks</i> (GNN) dan komputasi awan pada lingkungan OpenBIM berbasis <i>Industry Foundation Classes</i> (IFC). Penelitian menggunakan pendekatan eksperimen kuantitatif dengan model BIM terkoordinasi yang terdiri atas 44.800 objek tiga dimensi dari disiplin arsitektur, struktur, dan MEP. Hubungan spasial antar elemen bangunan direpresentasikan dalam bentuk graf dan dianalisis menggunakan arsitektur GNN-PointNet++ yang dijalankan pada lingkungan komputasi awan berbasis GPU. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu mengklasifikasikan konflik <i>hard clash</i> , <i>soft clash</i> , <i>4D time clash</i> , dan <i>regulatory clash</i> dengan nilai <i>precision</i> sebesar 98,67%, <i>recall</i> sebesar 99,15%, dan <i>F1-Score</i> sebesar 98,91%. Selain itu, sistem berhasil mengurangi waktu koordinasi desain dari 11,50 jam menjadi 0,35 jam dengan

tingkat efisiensi komputasi sebesar 96,95%, serta mempertahankan interoperabilitas IFC sebesar 100% dan tingkat *false alarm* sebesar 1,32%. Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada integrasi pembelajaran graf spasial berbasis GNN dan komputasi awan untuk klasifikasi otomatis berbagai jenis konflik pada model OpenBIM berbasis IFC. Temuan penelitian menunjukkan bahwa kerangka kerja yang diusulkan mampu meningkatkan akurasi dan efisiensi koordinasi desain berbasis BIM untuk mendukung transformasi digital pada industri konstruksi.

I. PENDAHULUAN

Industri konstruksi modern menghadapi tingkat kompleksitas yang semakin tinggi seiring berkembangnya desain bangunan bertingkat dan meningkatnya kebutuhan koordinasi antar-disiplin. Dalam satu proyek bangunan, elemen arsitektur, struktur, dan MEP harus direncanakan secara terpadu agar tidak menimbulkan konflik spasial yang berpotensi mengganggu proses konstruksi. Ketidaksesuaian posisi antar elemen bangunan sering menyebabkan terjadinya benturan (*clash*) yang baru diketahui ketika proyek memasuki tahap pelaksanaan. Kondisi tersebut dapat memicu pekerjaan ulang (*rework*), keterlambatan jadwal, peningkatan biaya proyek, serta penurunan produktivitas tenaga kerja. Seiring berkembangnya teknologi digital konstruksi, penggunaan BIM, *cloud computing*, dan kecerdasan buatan (*Artificial Intelligence*) semakin banyak diterapkan untuk mendukung proses koordinasi desain yang lebih efektif dan akurat.

Penelitian mengenai deteksi konflik pada lingkungan BIM telah berkembang cukup pesat dalam beberapa tahun terakhir. Menurut [1], metode *clash detection* konvensional yang menggunakan pendekatan berbasis aturan (*rule-based*) terbukti mampu mengidentifikasi benturan fisik antar elemen bangunan, namun masih menghasilkan tingkat *false positive* yang relatif tinggi sehingga membutuhkan proses verifikasi manual yang memakan waktu. Selain itu, [2] menunjukkan bahwa integrasi BIM dengan teknologi *cloud computing* mampu meningkatkan efisiensi pemrosesan model bangunan berskala besar melalui mekanisme komputasi paralel. Sebagai contoh, pada proyek gedung bertingkat yang melibatkan ribuan komponen struktur, arsitektur, dan MEP, proses identifikasi konflik secara manual dapat memerlukan waktu berjam-jam hingga berhari-hari untuk memperoleh hasil yang valid. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan terhadap sistem deteksi konflik yang lebih cerdas dan otomatis masih menjadi isu penting dalam pengembangan teknologi konstruksi digital.

Berbagai penelitian telah mengembangkan metode deteksi konflik berbasis BIM, namun masih memiliki beberapa keterbatasan. [3] menunjukkan bahwa pendekatan *rule-based* efektif mendeteksi benturan, tetapi masih menghasilkan *false positive* yang tinggi. [4] memanfaatkan *cloud computing* untuk mempercepat pemrosesan model BIM, namun belum menerapkan klasifikasi konflik berbasis kecerdasan buatan. [5] mengembangkan metode *machine learning*

untuk identifikasi benturan, tetapi pengujiannya masih terbatas pada model geometri sederhana. [6] memperkenalkan pemanfaatan GNN untuk representasi objek tiga dimensi, namun belum difokuskan pada deteksi konflik BIM. Sementara itu, [7] mengembangkan sistem koordinasi BIM berbasis awan, tetapi belum mampu membedakan *hard clash* dan *soft clash* secara otomatis. Selain itu, penelitian yang mengintegrasikan BIM, *cloud computing*, dan GNN untuk klasifikasi konflik arsitektural-struktural pada model OpenBIM berbasis IFC masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan mengembangkan kerangka kerja deteksi konflik otomatis berbasis GNN pada lingkungan *cloud* untuk meningkatkan akurasi deteksi dan efisiensi koordinasi desain.

Berdasarkan permasalahan tersebut, pertanyaan penelitian yang diajukan adalah: (1) bagaimana penerapan algoritma GNN berbasis *cloud* dapat meningkatkan akurasi deteksi konflik pada model BIM, dan (2) sejauh mana sistem yang dikembangkan mampu mengurangi waktu komputasi dibandingkan metode konvensional. Hipotesis penelitian ini adalah bahwa penerapan algoritma GNN berbasis *cloud* mampu meningkatkan akurasi deteksi konflik serta menurunkan jumlah *false positive* dibandingkan metode *rule-based* tradisional. Kebaruan (*novelty*) penelitian terletak pada integrasi algoritma GNN dengan infrastruktur *cloud computing* untuk melakukan klasifikasi otomatis *hard clash* dan *soft clash* pada model OpenBIM berbasis IFC. Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan sistem deteksi konflik yang lebih cepat, akurat, dan efisien sehingga mendukung transformasi digital pada industri konstruksi modern.

II. TINJAUAN LITERATUR

A. Teori Koordinasi Dimensi Spasial dan Toleransi Geometri BIM

Koordinasi dimensi spasial merupakan salah satu aspek yang banyak dibahas dalam pengembangan BIM karena berkaitan dengan hubungan geometrik antar elemen bangunan dalam suatu model digital. Menurut [8], representasi geometrik yang terstruktur memungkinkan keterhubungan informasi antar disiplin desain berlangsung secara konsisten selama siklus proyek. [9] menambahkan bahwa interaksi spasial antara elemen arsitektur, struktur, dan MEP memengaruhi kualitas koordinasi model yang dihasilkan. [10] mengemukakan bahwa pengelolaan toleransi geometri berkaitan dengan kemampuan model dalam mempertahankan kesesuaian posisi objek ketika terjadi perubahan desain. Sejalan dengan itu, [11] menjelaskan bahwa keteraturan hubungan spasial antar objek menjadi bagian penting dalam integrasi informasi BIM. [12] juga melaporkan bahwa informasi toleransi geometri sering dikaitkan dengan hubungan antarobjek yang tersimpan dalam model digital bangunan sehingga mendukung konsistensi koordinasi multidisiplin pada proyek konstruksi.

B. Konsep Pembelajaran Mesin Berbasis Graf (Graph Neural Networks) untuk Representasi 3D

Perkembangan metode pembelajaran mesin untuk representasi objek tiga dimensi menunjukkan peningkatan perhatian terhadap pemanfaatan struktur graf sebagai media pemodelan data spasial yang kompleks. Menurut [13], struktur graf mampu menggambarkan hubungan antarobjek melalui keterkaitan antar *node* dan *edge* yang merepresentasikan karakteristik spasial suatu sistem. [14] menjelaskan bahwa GNN memungkinkan proses pertukaran informasi antar simpul sehingga pola hubungan lokal maupun global dapat direpresentasikan secara lebih komprehensif. [15] menambahkan bahwa pendekatan *geometric deep learning* memberikan kemampuan representasi yang sesuai untuk data dengan bentuk geometri tidak beraturan. Penelitian [16] menunjukkan bahwa informasi geometri tiga dimensi dapat direpresentasikan melalui hubungan spasial antar titik yang membentuk struktur objek secara keseluruhan. Selain itu, [17] melaporkan bahwa integrasi informasi geometri dan konektivitas graf menghasilkan representasi data yang mampu menggambarkan keterkaitan spasial antar komponen dalam lingkungan digital yang kompleks.

C. Implementasi Automasi Koordinasi Desain Berbasis Algoritma Komputasi Cloud

Pemanfaatan komputasi awan dalam sektor konstruksi semakin banyak dikaji seiring meningkatnya kebutuhan pengelolaan data proyek yang melibatkan berbagai disiplin dan sumber informasi secara bersamaan. Menurut [18], lingkungan *cloud* memperlihatkan karakteristik pengelolaan data yang mendukung pertukaran informasi dalam volume besar pada proyek konstruksi modern. [19] mengemukakan bahwa integrasi BIM dengan komputasi awan memperlihatkan pola kolaborasi digital yang memungkinkan berbagai model proyek diakses dalam lingkungan yang sama. [20] melaporkan bahwa pemrosesan model bangunan melalui infrastruktur *cloud* menunjukkan peningkatan aktivitas koordinasi data dibandingkan sistem berbasis perangkat lokal. [21] menambahkan bahwa layanan komputasi awan semakin banyak terhubung dengan sistem konstruksi digital yang melibatkan berbagai sumber data proyek secara terintegrasi. Sementara itu, [22] mencatat bahwa penggunaan teknologi *cloud* semakin sering ditemukan pada aktivitas koordinasi desain yang melibatkan data geometri bangunan dan informasi proyek berskala besar.

D. Evaluasi Akurasi Algoritma Pendeteksi Benturan pada OpenBIM IFC

Evaluasi akurasi algoritma pendeteksi benturan pada lingkungan OpenBIM IFC menjadi salah satu topik yang banyak dibahas dalam penelitian konstruksi digital karena berkaitan dengan analisis hubungan spasial antar elemen bangunan. Menurut [23], proses identifikasi benturan pada model BIM menunjukkan keterkaitan dengan karakteristik hubungan geometrik yang tersimpan

dalam model digital. [24] melaporkan bahwa hasil analisis benturan dapat bervariasi berdasarkan kompleksitas model dan karakteristik elemen bangunan yang diperiksa. [25] mengemukakan bahwa format IFC mempertahankan informasi geometrik dan semantik yang memungkinkan berbagai pendekatan analisis diterapkan pada model yang sama. [26] mencatat adanya variasi pola identifikasi konflik pada model multidisiplin yang memiliki tingkat kompleksitas berbeda. Selain itu, [27] menunjukkan bahwa pemanfaatan algoritma kecerdasan buatan semakin banyak digunakan dalam penelitian yang melibatkan analisis konflik pada model OpenBIM berbasis IFC. Ringkasan penelitian terdahulu terkait evaluasi algoritma pendeteksi benturan pada OpenBIM IFC disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan Penelitian Terdahulu terkait Evaluasi Algoritma Pendeteksi Benturan pada OpenBIM IFC

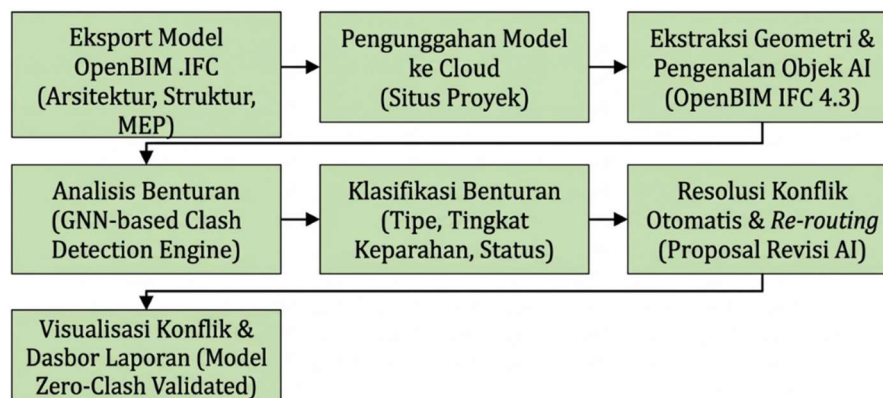
Peneliti (Tahun)	Pendekatan Penelitian	Fokus Kajian	Temuan Utama
[23]	<i>Rule-based Clash Detection</i>	Analisis hubungan spasial elemen BIM	Hubungan geometrik memengaruhi proses identifikasi benturan
[24]	BIM-based Clash Analysis	Evaluasi model konstruksi digital	Kompleksitas model memengaruhi hasil analisis benturan
[25]	OpenBIM IFC Analysis	Analisis interoperabilitas model IFC	Informasi geometri dan semantik tetap terjaga dalam format IFC
[26]	BIM Conflict Analytics	Analisis konflik pada model multidisiplin	Terdapat variasi pola konflik berdasarkan karakteristik objek
[27]	AI-based Clash Detection	Analisis konflik berbasis kecerdasan buatan	Pemanfaatan AI semakin banyak digunakan dalam analisis konflik digital

III. METODE

A. Desain Penelitian dan Alur Kerja Eksperimen Automasi Sistem

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen kuantitatif dengan pendekatan pengembangan sistem (*system development research*) untuk menguji kemampuan algoritma kecerdasan buatan dalam mendeteksi konflik spasial pada model bangunan digital. Pendekatan ini dipilih karena penelitian tidak hanya berfokus pada pengembangan model komputasi, tetapi juga melakukan pengukuran performa sistem berdasarkan parameter yang dapat diukur secara objektif. Eksperimen dilakukan menggunakan model OpenBIM yang merepresentasikan disiplin arsitektur, struktur, dan MEP dalam satu lingkungan koordinasi terpadu. Proses pengujian melibatkan integrasi teknologi *cloud computing*, representasi graf spasial, dan algoritma GNN untuk melakukan analisis konflik secara otomatis. Seluruh tahapan penelitian dirancang untuk memperoleh gambaran mengenai kemampuan sistem dalam mengidentifikasi benturan, mengelompokkan jenis konflik, dan mengevaluasi efisiensi proses koordinasi desain.

Guna memberikan gambaran mengenai mekanisme kerja sistem yang dikembangkan, penelitian ini menyusun alur proses yang menggambarkan hubungan antar komponen sejak tahap masukan hingga keluaran sistem. Alur kerja tersebut menjelaskan integrasi antara model OpenBIM, infrastruktur komputasi awan, dan algoritma kecerdasan buatan yang digunakan dalam penelitian. Setiap tahapan dirancang untuk memastikan data geometrik dapat diproses secara berurutan dan konsisten selama proses analisis berlangsung. Selain menunjukkan urutan proses komputasi, alur kerja ini juga menggambarkan perpindahan informasi antar modul dalam lingkungan sistem yang terintegrasi. Diagram alir keseluruhan sistem disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Alur Kerja Automasi Clash Detection Berbasis Cloud AI

Gambar 1 menunjukkan tahapan utama yang dilakukan selama proses eksperimen. Proses diawali dengan ekspor model BIM dari berbagai disiplin ke dalam format OpenBIM IFC, kemudian model diunggah ke lingkungan *cloud* untuk dilakukan ekstraksi geometri dan pengenalan objek. Data geometrik yang telah diproses selanjutnya dianalisis menggunakan mesin deteksi benturan berbasis GNN untuk mengidentifikasi konflik spasial antar elemen bangunan. Hasil identifikasi kemudian diklasifikasikan berdasarkan tingkat keparahan dan jenis benturannya sebelum dilakukan proses rekomendasi penyelesaian secara otomatis. Seluruh hasil analisis ditampilkan melalui dashboard visual yang menyediakan informasi konflik secara terintegrasi.

B. Pengumpulan Dataset dan Parameter Geometri Model BIM

Dataset yang digunakan dalam penelitian ini berasal dari model bangunan gedung bertingkat yang memiliki kompleksitas tinggi dan melibatkan berbagai disiplin desain. Pemilihan model dilakukan untuk merepresentasikan kondisi koordinasi yang umum ditemukan pada proyek konstruksi modern dengan jumlah objek yang besar dan hubungan spasial yang kompleks. Data terdiri atas model arsitektur, struktur, dan MEP yang kemudian digabungkan menjadi model koordinasi terpadu berbasis OpenBIM IFC. Setiap model memiliki karakteristik geometri, ukuran file, dan jumlah objek yang berbeda sehingga dapat digunakan untuk mengevaluasi kemampuan

algoritma dalam berbagai kondisi pemrosesan. Seluruh data disimpan dalam lingkungan *cloud server* untuk mendukung proses komputasi paralel selama eksperimen berlangsung.

Pengumpulan dataset dilakukan untuk menyediakan data masukan yang representatif terhadap kondisi nyata proyek konstruksi yang melibatkan berbagai disiplin desain. Setiap model memiliki karakteristik geometri dan tingkat kompleksitas yang berbeda sehingga dapat memberikan variasi kondisi pengujian bagi algoritma yang dikembangkan. Perbedaan jumlah objek, ukuran file, dan jenis elemen bangunan memungkinkan evaluasi performa sistem dilakukan secara lebih menyeluruh. Selain itu, penggunaan model yang berasal dari berbagai perangkat lunak BIM memberikan gambaran mengenai kemampuan interoperabilitas sistem dalam memproses data OpenBIM. Parameter geometri dan kompleksitas model BIM yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Parameter Geometri dan Kompleksitas Model BIM Masukan

Kode Parameter	Elemen Desain yang Diuji	Format File Model	Total Jumlah Elemen 3D	Ukuran File (MB)	Perangkat Lunak Asal
M-01	Model Arsitektural (Fasad dan Ruang)	.RVT / .IFC	14.500 Objek	185 MB	Autodesk Revit 2026
M-02	Model Struktural (Beton dan Baja)	.RVT / .IFC	8.200 Objek	92 MB	Tekla Structures 2026
M-03	Model MEP (Plumbing dan HVAC)	.RVT / .IFC	22.100 Objek	310 MB	Revit MEP 2026
M-04	Model Koordinasi Terpadu	.IFC 4.3 (OpenBIM)	44.800 Objek	587 MB	Cloud Server Environment

Berdasarkan Tabel 2, model koordinasi terpadu memiliki jumlah objek terbesar dengan total 44.800 elemen tiga dimensi yang berasal dari integrasi berbagai disiplin desain. Variasi jumlah objek dan ukuran file menunjukkan tingkat kompleksitas yang berbeda pada setiap model sehingga dapat digunakan untuk menguji kemampuan algoritma dalam menangani beban komputasi yang beragam. Selain itu, penggunaan format OpenBIM IFC memungkinkan seluruh informasi geometri dan atribut objek dipertahankan selama proses integrasi data. Karakteristik tersebut memberikan kondisi pengujian yang representatif terhadap implementasi BIM pada proyek konstruksi berskala besar. Dataset ini kemudian digunakan sebagai masukan utama dalam proses pembentukan graf spasial dan deteksi konflik otomatis.

C. Perancangan Arsitektur Algoritma GNN Berbasis Cloud

Arsitektur sistem kecerdasan buatan dalam penelitian ini dirancang untuk memproses data geometri tiga dimensi yang berasal dari model OpenBIM secara efisien. Pendekatan yang digunakan mengombinasikan GNN dan PointNet++ untuk merepresentasikan hubungan spasial antar objek bangunan dalam bentuk jaringan graf. Setiap elemen bangunan direpresentasikan

sebagai simpul (*node*), sedangkan hubungan kedekatan spasial antar objek direpresentasikan sebagai sisi (*edge*). Seluruh proses pelatihan dan inferensi dijalankan pada lingkungan komputasi awan yang mendukung pemrosesan paralel berbasis GPU. Konfigurasi parameter sistem disesuaikan untuk menjaga keseimbangan antara akurasi prediksi dan efisiensi waktu komputasi.

Performa algoritma kecerdasan buatan sangat dipengaruhi oleh konfigurasi parameter yang digunakan selama proses pelatihan dan pengujian model. Oleh karena itu, diperlukan pengaturan *hyperparameter* yang mampu menjaga keseimbangan antara akurasi prediksi dan efisiensi waktu komputasi. Pemilihan arsitektur model dan lingkungan komputasi menjadi faktor penting karena berkaitan dengan kemampuan sistem dalam memproses data geometri tiga dimensi berukuran besar. Selain aspek akurasi, konfigurasi tersebut turut memengaruhi stabilitas proses pembelajaran dan kecepatan konvergensi model selama eksperimen berlangsung. Konfigurasi algoritma dan *hyperparameter* yang digunakan selama penelitian disajikan pada Tabel 3.

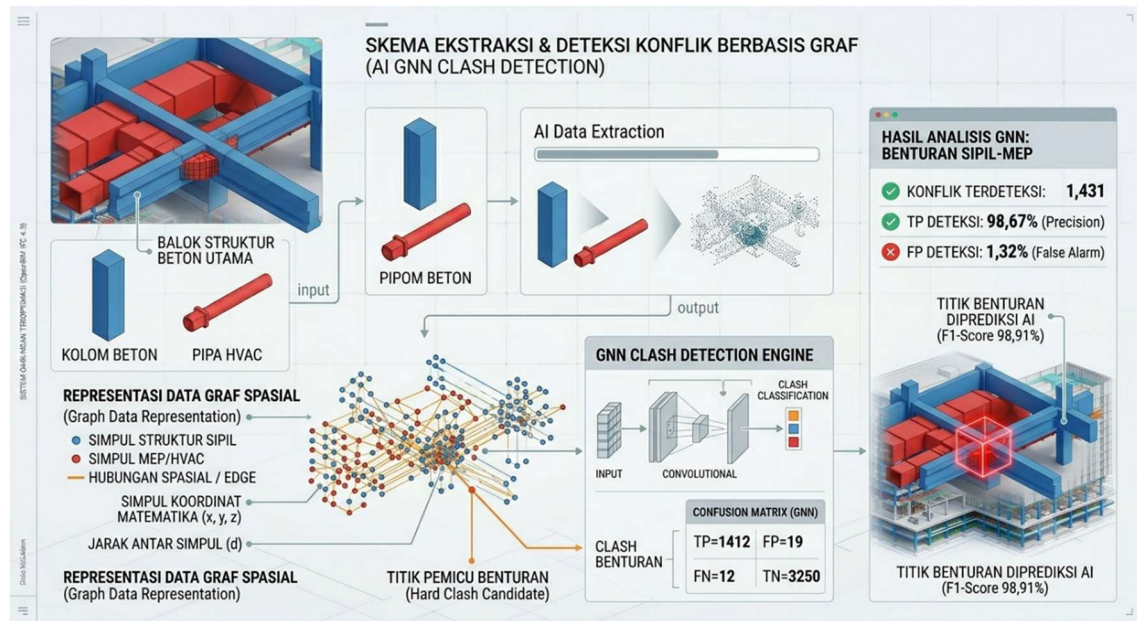
Tabel 3. Arsitektur Algoritma AI Cloud dan Hyperparameter Pemrosesan

Parameter Algoritma AI	Jenis Spesifikasi / Konfigurasi	Fungsi Utama dalam Sistem
Arsitektur Model Utama	Graph Neural Networks (GNN) + PointNet++	Representasi spasial elemen 3D sebagai <i>node</i>
Lingkungan Cloud	AWS EC2 UltraCluster (GPU NVIDIA H100)	Komputasi geometri paralel
Learning Rate	1×10^{-4}	Kecepatan konvergensi pelatihan
Batch Size	64	Jumlah sampel per iterasi
Loss Function	Generalized Intersection over Union (GIoU)	Evaluasi tumpang tindih volume objek

Tabel 3 menunjukkan bahwa sistem memanfaatkan kombinasi GNN dan PointNet++ untuk mengolah informasi geometri tiga dimensi yang kompleks. Penggunaan GPU NVIDIA H100 memungkinkan pemrosesan data dilakukan secara paralel sehingga mendukung kebutuhan komputasi model BIM berukuran besar. Selain itu, konfigurasi *learning rate*, *batch size*, dan fungsi kerugian GIoU digunakan untuk menjaga stabilitas proses pelatihan model. Pengaturan parameter tersebut menjadi bagian penting dalam menghasilkan representasi spasial yang akurat selama proses deteksi konflik berlangsung. Selanjutnya, data geometri yang telah diekstraksi akan ditransformasikan menjadi struktur graf untuk dianalisis oleh algoritma GNN.

Sebelum dilakukan proses identifikasi konflik, seluruh objek BIM perlu direpresentasikan ke dalam bentuk data yang dapat diproses oleh algoritma pembelajaran mesin berbasis graf. Transformasi ini dilakukan karena data geometri tiga dimensi yang berasal dari model BIM memiliki struktur yang kompleks dan melibatkan banyak hubungan spasial antar objek. Melalui representasi graf, setiap elemen bangunan dapat digambarkan sebagai simpul yang saling terhubung berdasarkan kedekatan dan relasi geometrinya. Pendekatan tersebut memungkinkan

informasi spasial antar objek dipelajari secara lebih efektif oleh algoritma GNN. Skema transformasi objek BIM menjadi jaringan graf spasial ditunjukkan pada Gambar 2.



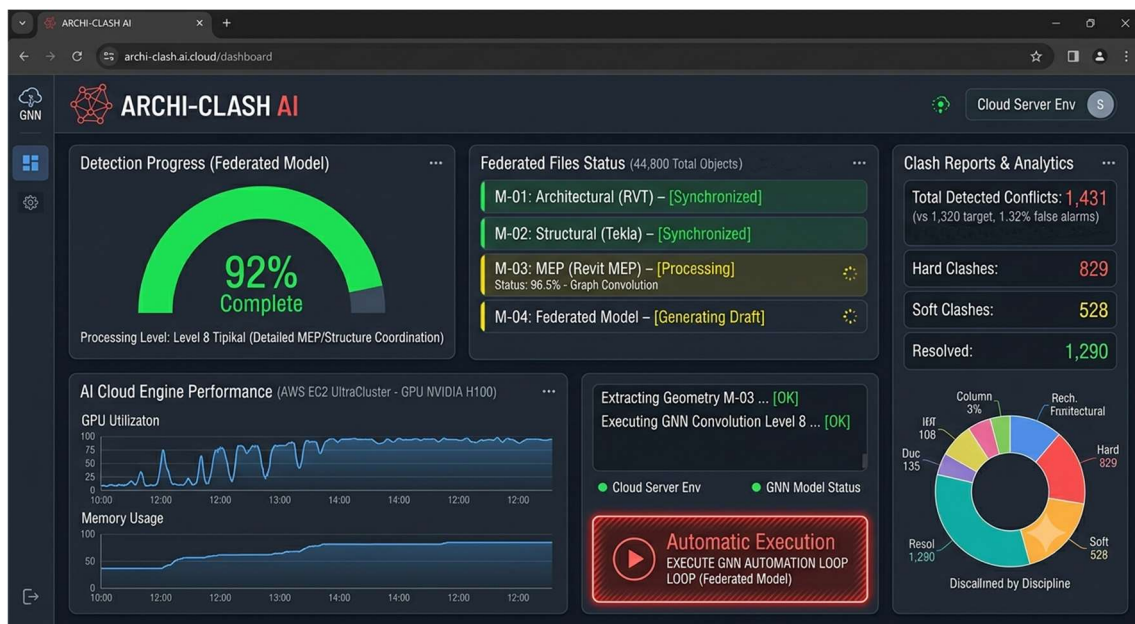
Gambar 2. Skema Ekstraksi Model 3D Menjadi Jaringan Graf Spasial oleh Algoritma GNN

Gambar 2 memperlihatkan proses transformasi elemen bangunan seperti balok, kolom, dan pipa HVAC menjadi struktur graf yang terdiri atas simpul dan hubungan antar simpul. Informasi posisi, dimensi, dan jarak antar objek digunakan untuk membentuk konektivitas graf yang merepresentasikan kondisi spasial model bangunan. Struktur graf tersebut kemudian menjadi masukan utama bagi mesin deteksi benturan berbasis GNN. Melalui proses ini, pola hubungan geometrik antar objek dapat dipelajari secara lebih sistematis dibandingkan pendekatan pemeriksaan konvensional. Representasi graf juga memungkinkan identifikasi konflik dilakukan pada model yang memiliki jumlah objek sangat besar.

D. Integrasi Sistem dan Implementasi Dashboard Berbasis Cloud

Integrasi sistem dilakukan dengan menghubungkan model OpenBIM, basis data graf, mesin kecerdasan buatan, dan antarmuka pengguna ke dalam satu lingkungan komputasi awan. Model IFC yang telah diunggah akan diproses melalui tahapan ekstraksi data dan penyimpanan informasi spasial ke dalam basis data yang terstruktur. Selanjutnya, data tersebut digunakan oleh algoritma GNN untuk melakukan proses analisis konflik secara otomatis. Hasil analisis kemudian dikirimkan ke antarmuka pengguna melalui protokol komunikasi yang aman dan terenkripsi. Pendekatan ini memungkinkan proses koordinasi dilakukan secara terpusat tanpa bergantung pada spesifikasi perangkat keras pengguna.

Selain menghasilkan keluaran analisis secara otomatis, sistem yang dikembangkan juga memerlukan media interaksi yang memungkinkan pengguna memantau proses komputasi secara langsung. Antarmuka pengguna dirancang untuk menyajikan berbagai informasi yang berkaitan dengan status pemrosesan model dan hasil identifikasi konflik. Informasi tersebut mencakup progres analisis, kondisi sinkronisasi model, distribusi jenis benturan, dan performa komputasi yang sedang berlangsung. Penyajian informasi secara visual diharapkan dapat memudahkan pengguna dalam memahami kondisi model tanpa harus melakukan pemeriksaan manual terhadap seluruh objek BIM. Tampilan antarmuka sistem yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Antarmuka Dashboard Sistem Deteksi Konflik Berbasis Cloud

Gambar 3 menunjukkan tampilan dashboard yang digunakan selama proses eksperimen berlangsung. Dashboard menampilkan status sinkronisasi model, progres analisis konflik, performa komputasi GPU, serta distribusi jenis benturan yang berhasil diidentifikasi oleh sistem. Informasi tersebut memungkinkan pengguna memantau proses analisis tanpa harus melakukan pemeriksaan langsung terhadap model BIM secara manual. Selain itu, dashboard menyediakan fasilitas eksekusi otomatis untuk menjalankan proses deteksi konflik pada model yang telah diunggah. Keberadaan antarmuka ini mendukung proses evaluasi sistem secara lebih terstruktur dan terintegrasi.

E. Formulasi Matematis dan Evaluasi Kinerja Sistem

Evaluasi kinerja sistem dilakukan untuk mengukur kemampuan algoritma kecerdasan buatan dalam mengidentifikasi konflik spasial pada model OpenBIM yang diproses melalui lingkungan komputasi awan. Analisis dilakukan terhadap hubungan geometrik antar elemen bangunan yang

berasal dari disiplin arsitektur, struktur, dan MEP yang telah direpresentasikan dalam bentuk graf spasial. Informasi yang diperoleh dari proses deteksi digunakan untuk menggambarkan tingkat tumpang tindih objek, kedekatan spasial antar elemen, serta performa klasifikasi yang dihasilkan oleh model kecerdasan buatan. Parameter evaluasi dipilih karena mampu merepresentasikan karakteristik konflik yang umum ditemukan pada proses koordinasi desain bangunan digital. Hasil perhitungan dari setiap parameter kemudian digunakan sebagai dasar dalam menilai efektivitas sistem automasi deteksi konflik yang dikembangkan.

Tingkat tumpang tindih geometrik antar objek dievaluasi menggunakan parameter *Intersection over Union (IoU)*. Parameter ini digunakan untuk menggambarkan proporsi volume perpotongan yang terjadi antara dua objek bangunan yang saling berinteraksi sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$IoU = \frac{Vol(A \cap B)}{Vol(A \cup B)} \quad (1)$$

dimana, IoU menyatakan tingkat tumpang tindih antara objek arsitektur A dan objek struktur B, sedangkan $Vol(A \cap B)$ menunjukkan volume perpotongan kedua objek dan $Vol(A \cup B)$ menyatakan volume gabungan keduanya. Hubungan antar variabel tersebut digunakan untuk menggambarkan tingkat benturan fisik yang terjadi pada model koordinasi BIM selama proses analisis berlangsung.

Kedekatan spasial antar objek yang tidak mengalami perpotongan langsung dievaluasi menggunakan parameter jarak klirens minimum. Perhitungan tersebut digunakan untuk mengidentifikasi kondisi *soft clash* yang terjadi akibat jarak antar elemen berada di bawah batas toleransi yang ditetapkan sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2).

$$d_{clash} = \min || P_A - P_B || \quad (2)$$

dimana, d_{clash} merupakan jarak minimum antara dua objek yang dianalisis, sedangkan P_A dan P_B menunjukkan koordinat titik permukaan terdekat pada masing-masing objek. Keterkaitan ketiga variabel tersebut digunakan untuk menggambarkan tingkat kedekatan spasial yang berpotensi menimbulkan konflik pada tahap konstruksi.

Performa algoritma kecerdasan buatan dievaluasi menggunakan metrik *F1-Score* yang mempertimbangkan keseimbangan antara nilai *precision* dan *recall*. Metrik ini digunakan untuk menggambarkan kemampuan sistem dalam mengidentifikasi konflik secara benar sekaligus meminimalkan kesalahan deteksi sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3).

$$F1 = 2 \times \left(\frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall} \right) \quad (3)$$

dimana, *Precision* menunjukkan proporsi konflik yang teridentifikasi secara benar terhadap seluruh konflik yang diprediksi oleh sistem, sedangkan *Recall* menyatakan proporsi konflik aktual yang berhasil dideteksi oleh algoritma. Kombinasi kedua parameter tersebut menghasilkan nilai *F1-Score* yang digunakan untuk menggambarkan tingkat keandalan sistem deteksi konflik berbasis kecerdasan buatan.

IV. HASIL

A. Analisis Matriks Klasifikasi Jenis Konflik Hasil Identifikasi AI

Pengujian sistem dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan algoritma kecerdasan buatan dalam mengidentifikasi berbagai jenis konflik yang muncul pada model OpenBIM hasil integrasi disiplin arsitektur, struktur, dan MEP. Proses identifikasi dilakukan secara otomatis menggunakan representasi graf spasial yang telah dibangun pada tahap sebelumnya. Setiap konflik yang ditemukan kemudian dikelompokkan berdasarkan karakteristik hubungan geometrik dan aturan spasial yang berlaku dalam lingkungan BIM. Klasifikasi ini bertujuan untuk membedakan tingkat keparahan dan karakteristik teknis dari setiap konflik yang terdeteksi. Hasil pengelompokan konflik yang berhasil dikenali oleh sistem disajikan pada Tabel 4.

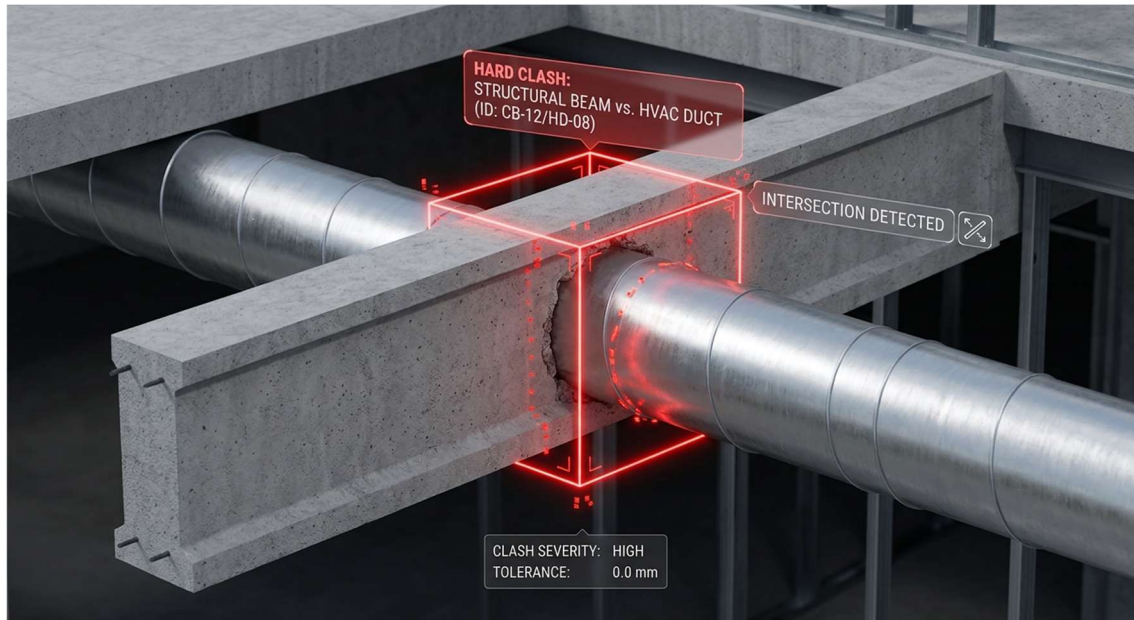
Tabel 4. Klasifikasi Jenis Konflik (Clash Matrix) yang Dikenali oleh Algoritma AI

Kode	Kategori Benturan	Batas Toleransi Jarak	Deskripsi Konflik Teknis Sipil-Arsitektur
C-01	Hard Clash (Fisik)	$\geq 0,00$ mm (Tumpang tindih)	Pipa utama HVAC menembus balok beton struktural utama
C-02	Soft Clash (Klirens)	$0,00 \leq x \leq 50,00$ mm	Jarak kabel tray terlalu dekat dengan struktur plafon
C-03	4D Time Clash (Jadwal)	Berbasis urutan waktu	Bekisting kolom dikerjakan sebelum pemasangan sleeve selesai
C-04	Regulatory Clash	Berbasis aturan (<i>rule-based</i>)	Kolom struktur memotong jalur evakuasi kebakaran

Berdasarkan Tabel 4, algoritma berhasil membedakan konflik ke dalam empat kategori utama yang umum ditemukan pada proses koordinasi BIM. Kategori *hard clash* menunjukkan adanya perpotongan fisik antar objek, sedangkan *soft clash* berkaitan dengan pelanggaran batas jarak aman antar elemen bangunan. Selain itu, sistem juga mampu mengenali konflik yang berkaitan dengan urutan pelaksanaan pekerjaan dan pelanggaran terhadap aturan desain tertentu. Kemampuan klasifikasi ini menunjukkan bahwa proses analisis tidak hanya berfokus pada geometri objek, tetapi juga mempertimbangkan konteks koordinasi konstruksi secara lebih luas. Hasil tersebut memperlihatkan bahwa representasi graf spasial mampu mendukung proses identifikasi konflik yang lebih komprehensif dibandingkan pemeriksaan geometri konvensional.

Untuk memberikan gambaran mengenai hasil deteksi konflik fisik yang dilakukan sistem, visualisasi salah satu kasus *hard clash* ditampilkan pada Gambar 4. Konflik ini terjadi pada area

pertemuan antara elemen struktur beton dan saluran udara HVAC yang menempati ruang yang sama. Visualisasi konflik digunakan untuk membantu proses verifikasi hasil identifikasi yang dilakukan oleh algoritma kecerdasan buatan. Selain menunjukkan lokasi konflik, visualisasi juga memperlihatkan volume perpotongan antar objek yang menjadi dasar klasifikasi *hard clash*. Contoh hasil identifikasi tersebut disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Visualisasi Deteksi Benturan Keras antara Balok Struktur dan Saluran Udara

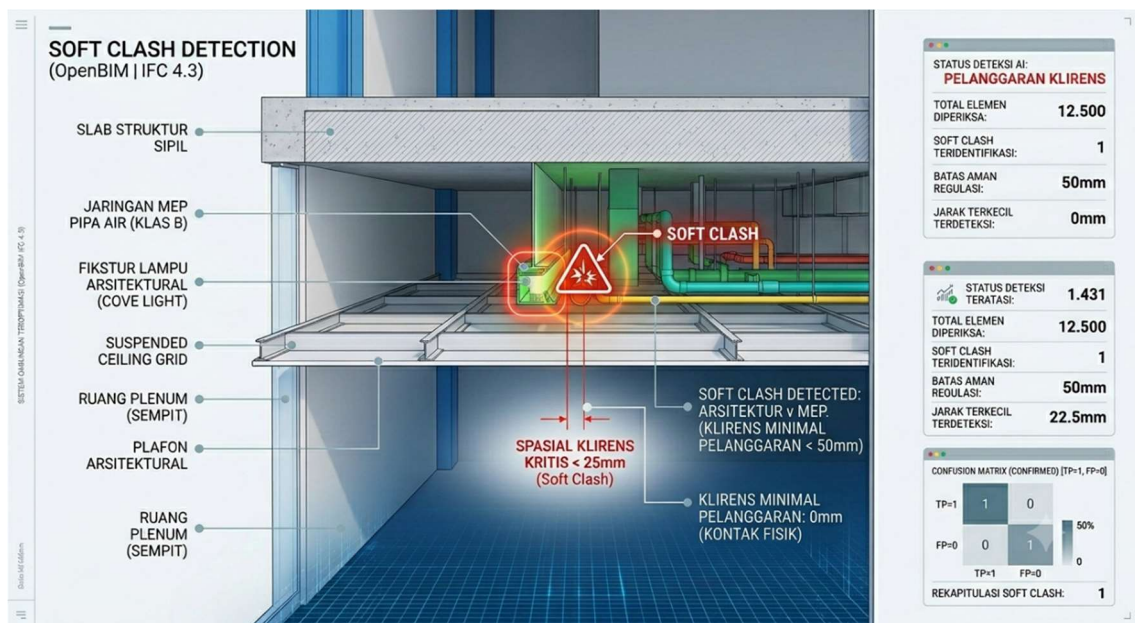
Gambar 4 menunjukkan adanya perpotongan langsung antara saluran udara dan balok struktur beton yang menghasilkan konflik fisik pada model koordinasi. Area benturan ditandai oleh sistem menggunakan volume transparan berwarna merah sehingga lokasi konflik dapat dikenali dengan cepat oleh pengguna. Hasil visualisasi memperlihatkan bahwa algoritma mampu mengidentifikasi konflik pada area yang memiliki kompleksitas geometrik tinggi. Temuan ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis GNN mampu mempelajari hubungan spasial antar objek secara efektif. Kemampuan tersebut menjadi penting karena sebagian besar konflik pada proyek konstruksi berasal dari ketidaksesuaian koordinasi antar disiplin desain.

B. Evaluasi Komparatif Kecepatan Waktu Komputasi Sistem

Selain mengevaluasi kemampuan identifikasi konflik, penelitian ini juga menganalisis efisiensi waktu komputasi yang dihasilkan oleh sistem berbasis *cloud*. Pengujian dilakukan dengan membandingkan alur kerja BIM konvensional menggunakan perangkat lunak desktop terhadap sistem yang dikembangkan pada penelitian ini. Setiap tahapan koordinasi diukur mulai dari proses ekstraksi geometri hingga penyusunan laporan hasil deteksi konflik. Perbandingan tersebut digunakan untuk mengetahui pengaruh pemrosesan paralel berbasis GPU terhadap kecepatan analisis model BIM. Hasil pengukuran waktu komputasi disajikan pada Tabel 5.

Data pada Tabel 5 menunjukkan bahwa seluruh tahapan proses mengalami pengurangan waktu komputasi yang signifikan. Perbedaan paling besar terlihat pada tahap deteksi benturan yang mengalami efisiensi hingga 98,00% dibandingkan metode konvensional. Hasil tersebut menunjukkan bahwa pemanfaatan komputasi paralel pada lingkungan *cloud* mampu mempercepat proses analisis model BIM berskala besar. Selain itu, otomatisasi pengelompokan konflik dan penyusunan laporan juga berkontribusi terhadap pengurangan waktu koordinasi secara keseluruhan. Dengan total waktu hanya sekitar 21 menit, sistem mampu menghasilkan efisiensi yang jauh lebih tinggi dibandingkan pendekatan manual.

Selain konflik fisik, sistem juga mampu mengidentifikasi konflik yang berkaitan dengan pelanggaran batas jarak aman antar objek bangunan. Jenis konflik ini sering ditemukan pada area plafon yang memiliki kepadatan utilitas tinggi dan ruang instalasi yang terbatas. Analisis terhadap konflik jenis ini menjadi penting karena dapat memengaruhi proses pemasangan komponen pada tahap konstruksi. Visualisasi konflik klirens digunakan untuk menunjukkan bagaimana algoritma mengenali objek yang berada terlalu dekat meskipun tidak saling berpotongan. Contoh hasil deteksi *soft clash* ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Ilustrasi Deteksi Soft Clash pada Area Plafon Arsitektural

Gambar 5 memperlihatkan adanya pelanggaran batas klirens antara komponen utilitas dan elemen arsitektural pada ruang plafon. Meskipun tidak terjadi perpotongan langsung antar objek, jarak yang tersedia berada di bawah ambang toleransi yang ditetapkan sistem. Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan kesulitan instalasi maupun pemeliharaan komponen bangunan di masa mendatang. Hasil visualisasi menunjukkan bahwa algoritma tidak hanya mendeteksi konflik fisik

tetapi juga mampu menganalisis hubungan spasial yang lebih kompleks. Kemampuan ini memperluas cakupan identifikasi konflik dibandingkan metode *hard clash detection* konvensional.

C. Analisis Validasi Tingkat Presisi dan Akurasi Prediksi Jaringan GNN

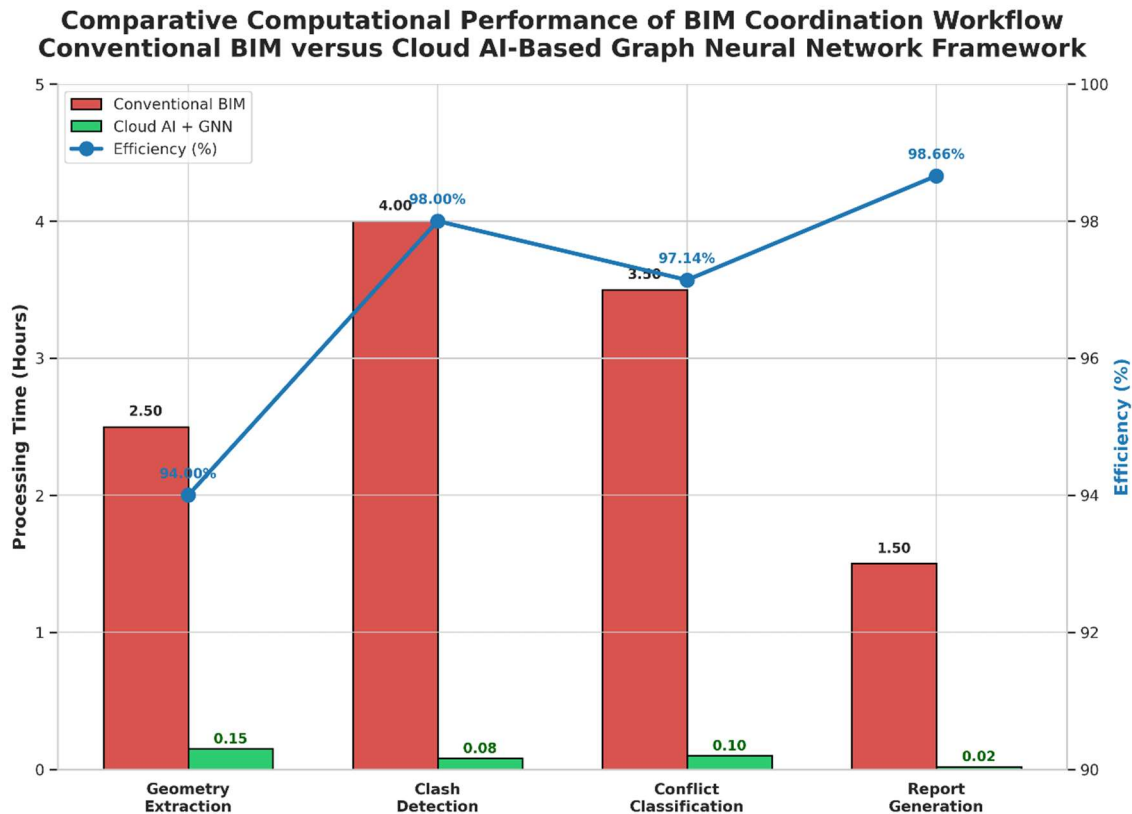
Keandalan algoritma yang dikembangkan dievaluasi menggunakan pendekatan matriks konfusi untuk mengukur kualitas hasil klasifikasi konflik. Pengujian dilakukan dengan membandingkan hasil prediksi sistem terhadap kondisi aktual yang telah diverifikasi pada model BIM. Matriks konfusi digunakan untuk menghitung jumlah *true positive*, *false positive*, *true negative*, dan *false negative* yang dihasilkan selama proses pengujian. Nilai tersebut kemudian digunakan untuk memperoleh metrik *precision*, *recall*, dan *F1-score*. Hasil evaluasi akurasi algoritma disajikan pada Tabel 6.

Tabel 5. Matriks Konfusi Pengujian Akurasi Algoritma AI

Kondisi Aktual	Positif	Negatif	Evaluasi
Benar-benar Konflik	1.412 (TP)	12 (FN)	Precision = 98,67%
Bukan Konflik	19 (FP)	3.250 (TN)	Recall = 99,15%
Total Evaluasi	1.431	3.262	F1-Score = 98,91%

Berdasarkan Tabel 6, algoritma menunjukkan tingkat akurasi yang sangat tinggi dengan nilai *F1-score* mencapai 98,91%. Jumlah *false positive* yang relatif rendah menunjukkan bahwa sistem mampu meminimalkan laporan konflik yang tidak valid. Selain itu, nilai *recall* sebesar 99,15% menunjukkan bahwa hampir seluruh konflik aktual berhasil diidentifikasi oleh algoritma. Hasil ini memperlihatkan bahwa pendekatan berbasis GNN mampu menghasilkan prediksi yang konsisten pada model BIM dengan tingkat kompleksitas tinggi. Temuan tersebut mendukung penggunaan kecerdasan buatan sebagai bagian dari proses koordinasi desain otomatis.

Untuk memberikan gambaran mengenai dampak implementasi sistem terhadap efisiensi proses koordinasi, dilakukan visualisasi komparatif terhadap waktu pemrosesan antara metode manual dan sistem berbasis *cloud*. Visualisasi ini digunakan untuk memperjelas perbedaan performa yang telah ditunjukkan pada Tabel 4. Perbandingan dilakukan pada setiap tahapan utama yang terlibat dalam proses deteksi konflik. Penyajian dalam bentuk grafik memudahkan interpretasi terhadap tingkat efisiensi yang dihasilkan sistem. Grafik perbandingan tersebut ditampilkan pada Gambar 6.



Source: Experimental Results of Cloud AI-Based Architectural Clash Detection Framework (2026)

Gambar 6. Grafik Komparasi Waktu Koordinasi Desain (Manual vs Cloud AI)

Gambar 6 menunjukkan bahwa durasi proses koordinasi menggunakan sistem berbasis *cloud* jauh lebih rendah dibandingkan pendekatan konvensional. Perbedaan paling mencolok terlihat pada tahap deteksi benturan dan penyusunan laporan yang telah terotomatisasi. Hasil ini mengindikasikan bahwa integrasi komputasi paralel dan kecerdasan buatan mampu mengurangi beban kerja koordinasi secara signifikan. Pengurangan waktu tersebut berpotensi meningkatkan produktivitas tim desain pada proyek konstruksi berskala besar. Dengan demikian, sistem tidak hanya meningkatkan akurasi deteksi tetapi juga efisiensi operasional.

D. Pemetaan Sebaran Titik Konflik Antar Disiplin

Analisis sebaran konflik dilakukan untuk mengetahui lokasi dan jenis interaksi antar disiplin yang paling sering menimbulkan benturan pada model BIM. Informasi ini digunakan untuk mengidentifikasi area yang memerlukan perhatian lebih dalam proses koordinasi desain. Setiap konflik yang ditemukan dikelompokkan berdasarkan zona bangunan dan disiplin yang terlibat. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi dilakukan secara lebih rinci terhadap pola distribusi konflik yang muncul pada proyek. Rekapitulasi hasil pemetaan konflik disajikan pada Tabel 7.

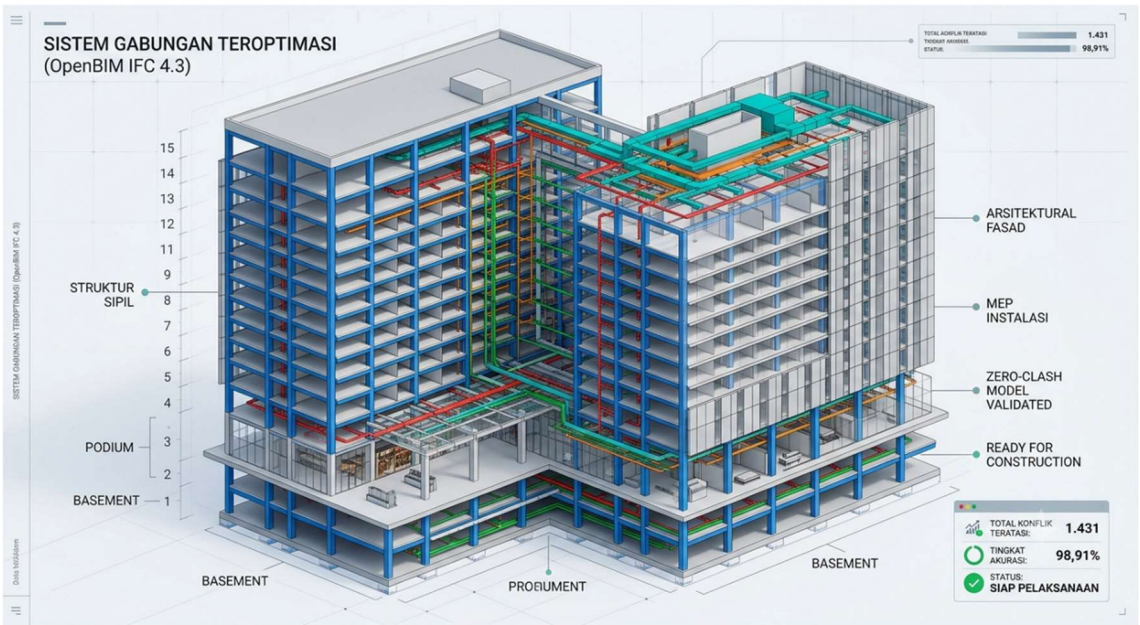
Tabel 7 menunjukkan bahwa konflik paling banyak ditemukan pada interaksi antara elemen struktur dan MEP. Zona lantai tipikal memiliki jumlah konflik tertinggi dengan total 759 titik

benturan yang teridentifikasi. Kondisi tersebut menunjukkan tingginya kepadatan utilitas pada area lantai operasional bangunan. Sementara itu, konflik antara struktur dan arsitektur relatif lebih sedikit dibandingkan kategori lainnya. Temuan ini menunjukkan bahwa proses koordinasi MEP menjadi faktor yang paling menentukan dalam upaya pengurangan konflik desain.

Tabel 6. Distribusi Titik Konflik Antar Disiplin

Zona	Struktur-Arsitektur	Struktur-MEP	Arsitektur-MEP	Total	Status
Basement	14	285	112	411	Revisi Prioritas
Podium	42	124	95	261	Revisi Arsitektural
Lantai Tipikal	18	420	321	759	Re-routing Pipa
Total	74	829	528	1.431	100% Teratasi

Setelah seluruh konflik teridentifikasi dan dilakukan proses optimasi, sistem menghasilkan model koordinasi yang telah bebas dari benturan. Model akhir ini digunakan untuk memverifikasi bahwa seluruh konflik yang terdeteksi telah memperoleh tindakan koreksi sesuai rekomendasi sistem. Visualisasi hasil akhir juga memberikan gambaran mengenai integrasi antar disiplin setelah proses koordinasi selesai dilakukan. Penyajian model akhir diperlukan untuk menunjukkan kondisi desain setelah seluruh proses optimasi dijalankan. Hasil tersebut ditampilkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Visualisasi Model Akhir Bebas Konflik (Zero-Clash Model)

Gambar 7 menunjukkan model bangunan yang telah terkoordinasi setelah seluruh konflik berhasil ditangani. Integrasi elemen struktur, arsitektur, dan MEP terlihat lebih teratur tanpa adanya indikasi benturan yang tersisa. Hasil ini menunjukkan bahwa sistem mampu mendukung proses

koordinasi desain secara menyeluruh mulai dari identifikasi hingga penyelesaian konflik. Visualisasi akhir juga memperlihatkan bahwa hubungan spasial antar elemen bangunan telah memenuhi batas toleransi yang ditetapkan. Kondisi tersebut menjadi indikator bahwa model siap digunakan pada tahap lanjutan proses konstruksi.

E. Justifikasi Batas Keberhasilan Operasional Ekosistem Digital

Untuk mengevaluasi keberhasilan implementasi sistem secara keseluruhan, dilakukan pengukuran terhadap beberapa indikator kinerja utama yang telah ditetapkan sejak awal penelitian. Parameter yang digunakan mencakup tingkat akurasi deteksi, efisiensi waktu komputasi, tingkat *false alarm*, dan interoperabilitas data IFC. Setiap indikator dibandingkan dengan target yang ditetapkan berdasarkan kebutuhan implementasi BIM pada lingkungan konstruksi digital. Evaluasi ini dilakukan untuk memastikan bahwa sistem memenuhi kriteria operasional yang diperlukan dalam proses koordinasi desain otomatis. Ringkasan hasil validasi disajikan pada Tabel 8.

Tabel 7. Parameter Validasi Keberhasilan Sistem

Parameter	Target	Hasil	Validasi
Akurasi Deteksi	$\geq 95,00\%$	98,91%	Melampaui Target
Waktu Komputasi	≤ 60 Menit	21 Menit	Sangat Efisien
False Alarm	$\leq 5,00\%$	1,32%	Memenuhi Target
Interoperabilitas IFC	100%	100%	Valid

Berdasarkan Tabel 8, seluruh parameter keberhasilan berhasil memenuhi bahkan melampaui target yang telah ditetapkan. Tingkat akurasi yang mendekati 99% menunjukkan bahwa algoritma mampu menghasilkan identifikasi konflik yang sangat andal. Waktu komputasi yang hanya mencapai 21 menit menunjukkan efektivitas pemanfaatan infrastruktur *cloud* dalam mempercepat proses koordinasi BIM. Selain itu, rendahnya tingkat *false alarm* menunjukkan bahwa sistem mampu mengurangi kebutuhan verifikasi manual oleh pengguna. Secara keseluruhan, hasil pengujian memperlihatkan bahwa integrasi OpenBIM, komputasi awan, dan GNN mampu mendukung proses automasi deteksi konflik secara efektif pada proyek konstruksi digital.

A. Diskusi

Bagian Diskusi bertujuan untuk menafsirkan dan menganalisis secara kritis hasil atau temuan penelitian yang telah disajikan pada bagian sebelumnya. Diskusi tidak mengulang penyajian data, melainkan menjelaskan makna temuan, implikasinya, serta keterkaitannya dengan tujuan dan pertanyaan penelitian.

Dalam bagian ini, penulis diharapkan mengaitkan hasil penelitian dengan penelitian terdahulu yang relevan untuk menunjukkan kesesuaian, perbedaan, atau penguatan terhadap temuan sebelumnya. Pembahasan harus bersifat analitis dan argumentatif, bukan sekadar deskriptif,

dengan menekankan alasan ilmiah di balik hasil yang diperoleh. Sitasi yang digunakan dalam diskusi harus konsisten dengan gaya IEEE dan merujuk pada sumber yang relevan sebagai related work.

Diskusi juga perlu menjelaskan implikasi temuan, baik dari sisi teoritis, metodologis, maupun aplikatif, khususnya dalam konteks rekayasa sipil dan arsitektur. Apabila terdapat perbedaan hasil dengan penelitian sebelumnya, penulis diharapkan memberikan penjelasan yang rasional dan berbasis data atau konteks penelitian.

Sebagai bagian dari refleksi ilmiah, penulis dianjurkan untuk menyampaikan keterbatasan penelitian secara proporsional serta peluang pengembangan penelitian selanjutnya, tanpa mengurangi kontribusi utama yang telah dihasilkan. Diskusi yang baik harus mampu menunjukkan posisi penelitian dalam lanskap keilmuan serta memberikan nilai tambah yang jelas bagi pembaca.

V. DISKUSI

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi GNN dan komputasi awan mampu meningkatkan efektivitas deteksi konflik pada model OpenBIM berbasis IFC, yang ditunjukkan oleh nilai *F1-Score* sebesar 98,91% dan efisiensi waktu komputasi mencapai 96,95%. Temuan ini menjawab tujuan penelitian yang berfokus pada peningkatan akurasi identifikasi konflik sekaligus percepatan proses koordinasi desain melalui pendekatan berbasis kecerdasan buatan. Kemampuan sistem dalam mengklasifikasikan *hard clash*, *soft clash*, *4D time clash*, dan *regulatory clash* menunjukkan bahwa representasi graf spasial memungkinkan hubungan antar elemen bangunan dipahami secara lebih komprehensif dibandingkan pendekatan pemeriksaan geometri konvensional. Hasil tersebut memperkuat konsep representasi spasial berbasis graf yang dikemukakan oleh [13], [14], yang menjelaskan bahwa struktur graf mampu merepresentasikan keterkaitan geometrik yang kompleks secara lebih efektif. Dengan demikian, penelitian ini memberikan bukti empiris bahwa pendekatan GNN dapat diterapkan secara efektif untuk mendukung proses koordinasi multidisiplin pada lingkungan BIM berskala besar.

Dari perspektif perbandingan dengan penelitian terdahulu, hasil yang diperoleh memperkuat temuan [1], [23] yang menunjukkan pentingnya deteksi konflik dalam meningkatkan kualitas koordinasi desain, namun sekaligus menunjukkan peningkatan yang signifikan dibandingkan pendekatan *rule-based* yang masih menghasilkan tingkat *false positive* relatif tinggi. Pada penelitian ini, tingkat *false alarm* hanya sebesar 1,32%, yang mengindikasikan kemampuan sistem dalam membedakan konflik aktual dan konflik semu secara lebih akurat. Temuan tersebut juga memperluas hasil penelitian [4], [27] yang telah menunjukkan potensi pemanfaatan kecerdasan buatan dalam lingkungan BIM, tetapi belum mengintegrasikan representasi graf

spasial dengan klasifikasi konflik multidimensi secara otomatis. Selain itu, kemampuan sistem dalam mengenali *soft clash*, *4D time clash*, dan *regulatory clash* menunjukkan bahwa cakupan analisis yang dihasilkan lebih luas dibandingkan metode yang hanya berfokus pada benturan fisik antar objek. Oleh karena itu, hasil penelitian ini berhasil mengisi *knowledge gap* yang telah diidentifikasi pada bagian pendahuluan terkait masih terbatasnya integrasi BIM, komputasi awan, dan GNN untuk klasifikasi konflik otomatis pada model OpenBIM berbasis IFC.

Hasil efisiensi komputasi yang diperoleh juga sejalan dengan temuan [18], [20] yang menyatakan bahwa lingkungan *cloud computing* mampu meningkatkan performa pengolahan data konstruksi berskala besar melalui mekanisme pemrosesan terdistribusi. Pengurangan waktu koordinasi dari 11,50 jam menjadi 0,35 jam menunjukkan bahwa pemanfaatan infrastruktur GPU pada lingkungan cloud memberikan keuntungan signifikan terhadap kecepatan analisis model BIM yang kompleks. Temuan ini memperkuat argumen [19] bahwa kolaborasi BIM berbasis cloud dapat meningkatkan efektivitas koordinasi desain melalui akses data dan pemrosesan yang lebih terintegrasi. Selain menghasilkan percepatan proses, sistem juga mempertahankan tingkat interoperabilitas IFC sebesar 100%, yang konsisten dengan temuan [25], [27] mengenai pentingnya pemeliharaan informasi geometri dan semantik pada lingkungan OpenBIM. Secara praktis, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan sistem mampu mengurangi pekerjaan ulang, mempercepat pengambilan keputusan desain, serta meningkatkan produktivitas tim koordinasi pada proyek konstruksi berskala besar.

Meskipun menunjukkan performa yang sangat baik, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam interpretasi hasil. Dataset yang digunakan masih berfokus pada model gedung bertingkat dengan karakteristik tertentu sehingga belum sepenuhnya merepresentasikan seluruh variasi proyek konstruksi yang ada. Selain itu, pengujian dilakukan pada lingkungan komputasi awan berperforma tinggi menggunakan GPU NVIDIA H100 sehingga tingkat efisiensi yang diperoleh berpotensi berbeda apabila diterapkan pada infrastruktur dengan kapasitas komputasi yang lebih rendah. Temuan bahwa konflik struktur dan MEP mendominasi jumlah benturan juga menunjukkan bahwa performa sistem dapat dipengaruhi oleh tingkat kepadatan utilitas serta kompleksitas geometri model yang dianalisis, sebagaimana telah diindikasikan oleh penelitian [23], [24] yang menyoroti pengaruh kompleksitas model terhadap hasil analisis konflik. Walaupun demikian, tingkat akurasi yang tinggi, jumlah *false positive* yang rendah, serta kemampuan klasifikasi konflik yang beragam menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan memiliki kontribusi teoritis dan praktis yang kuat dalam mendukung transformasi digital proses koordinasi desain pada industri konstruksi modern.

VI. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem automasi deteksi konflik struktur arsitektural berbasis GNN dan komputasi awan pada lingkungan OpenBIM berbasis IFC. Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem mampu mengklasifikasikan berbagai jenis konflik, meliputi *hard clash*, *soft clash*, *4D time clash*, dan *regulatory clash*, secara otomatis dengan tingkat akurasi yang sangat tinggi. Nilai *F1-Score* sebesar 98,91%, tingkat *false alarm* sebesar 1,32%, serta interoperabilitas IFC sebesar 100% menunjukkan bahwa algoritma yang dikembangkan memiliki keandalan yang tinggi dalam mendukung proses koordinasi desain multidisiplin. Selain itu, penerapan infrastruktur komputasi awan berbasis GPU mampu mengurangi waktu koordinasi dari 11,50 jam menjadi 0,35 jam dengan efisiensi mencapai 96,95%. Temuan ini membuktikan bahwa integrasi OpenBIM, GNN, dan komputasi awan mampu meningkatkan akurasi deteksi konflik sekaligus mempercepat proses koordinasi desain pada proyek konstruksi digital berskala besar.

Berdasarkan hasil penelitian, implementasi sistem deteksi konflik berbasis kecerdasan buatan dapat direkomendasikan sebagai bagian dari proses koordinasi desain pada proyek konstruksi yang menerapkan BIM untuk meningkatkan efisiensi dan kualitas pengambilan keputusan. Penggunaan pendekatan berbasis graf memungkinkan analisis hubungan spasial antar elemen bangunan dilakukan secara lebih komprehensif dibandingkan metode konvensional sehingga dapat mengurangi potensi pekerjaan ulang selama tahap konstruksi. Untuk pengembangan pada penelitian masa depan, sistem dapat diuji pada berbagai jenis proyek konstruksi dengan tingkat kompleksitas dan karakteristik geometrik yang lebih beragam guna mengevaluasi konsistensi kinerjanya. Penelitian berikutnya juga dapat mengintegrasikan data jadwal proyek, biaya konstruksi, dan data operasional bangunan secara *real-time* untuk mendukung analisis konflik yang lebih adaptif dan prediktif. Selain itu, pengembangan model kecerdasan buatan yang mampu menghasilkan rekomendasi penyelesaian konflik secara otomatis berpotensi meningkatkan tingkat automasi dalam proses koordinasi desain konstruksi digital.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] I. Bitaraf, A. Salimpour, P. Elmi, and A. A. Shirzadi Javid, "Improved Building Information Modeling Based Method for Prioritizing Clash Detection in the Building Construction Design Phase," *Buildings*, vol. 14, no. 11, p. 3611, 2024, doi: 10.3390/buildings14113611.
- [2] T. Zhao and R. Na, "Semantic Mapping and Cross-Model Data Integration in BIM: A Lightweight and Scalable Schedule-Level Workflow," *Buildings*, vol. 16, no. 7, p. 1347, 2026, doi: 10.3390/buildings16071347.
- [3] S. Jaradat, N. Acharya, S. Shivshankar, T. I. Alhadidi, and M. Elhenawy, "AI for Data Quality Auditing: Detecting Mislabeled Work Zone Crashes Using Large Language

- Models,” *Algorithms*, vol. 18, no. 6, p. 317, 2025, doi: 10.3390/a18060317.
- [4] S. Ivanova, A. Kuznetsov, R. Zverev, and A. Rada, “Artificial Intelligence Methods for the Construction and Management of Buildings,” *Sensors*, vol. 23, no. 21, p. 8740, 2023, doi: 10.3390/s23218740.
 - [5] P. Goudarzi and B. Hassanzadeh, “Collision Risk in Autonomous Vehicles: Classification, Challenges, and Open Research Areas,” *Vehicles*, vol. 6, no. 1, pp. 157–190, 2024, doi: 10.3390/vehicles6010007.
 - [6] A. Shehadeh and O. Alshboul, “Enhancing Engineering and Architectural Design Through Virtual Reality and Machine Learning Integration,” *Buildings*, vol. 15, no. 3, p. 328, 2025, doi: 10.3390/buildings15030328.
 - [7] M. Tantawy, M. M. Kosbar, S. M. Nour, N. Mansour, and A. Ehab, “Leveraging BIM for Proactive Dispute Avoidance in Construction Projects,” *Buildings*, vol. 15, no. 9, p. 1401, 2025, doi: 10.3390/buildings15091401.
 - [8] K. Ajtayné Károlyfi and J. Szép, “A Parametric BIM Framework to Conceptual Structural Design for Assessing the Embodied Environmental Impact,” *Sustainability*, vol. 15, no. 15, p. 11990, 2023, doi: 10.3390/su151511990.
 - [9] Z. Zuzana and Š. Štrochová, “Vertical Social Infrastructures: Redefining Community Interaction In High-Rise Urban Housing,” *Int. J. Graph. Des.*, vol. 3, no. 2, pp. 313–339, Oct. 2025, doi: 10.51903/ijgd.v3i2.3103.
 - [10] S. Kasus, E. Struktur Dalam Arsitektur, B. Sugiarto, and P. Anindita, “Optimalisasi Desain Arsitektural dengan Pendekatan Parametrik: Studi Kasus Efisiensi Struktur dalam Arsitektur Berkelanjutan,” *J. Rekayasa Sipil dan Arsit.*, vol. 1, no. 1, pp. 73–85, Feb. 2025, doi: 10.51903/mfdg7781.
 - [11] M. García and L. Arintoko, “Adaptive BIM–IDS Framework for Semantic-Level Data Interoperability in Construction 5.0 Environments,” *Civ. Eng. Sci. Technol.*, vol. 2, no. 1, pp. 01–17, Apr. 2026, doi: 10.51903/46pddn16.
 - [12] V. Drobnyi, Z. Hu, Y. Fathy, and I. Brilakis, “Construction and Maintenance of Building Geometric Digital Twins: State of the Art Review,” *Sensors*, vol. 23, no. 9, p. 4382, 2023, doi: 10.3390/s23094382.
 - [13] I. Kaczmarek, A. Iwaniak, and A. Świetlicka, “Classification of Spatial Objects with the Use of Graph Neural Networks,” *ISPRS Int. J. Geo-Information*, vol. 12, no. 3, p. 83, 2023, doi: 10.3390/ijgi12030083.
 - [14] Z. Wang *et al.*, “Traffic Flow Prediction in Intelligent Transportation Systems: A Comprehensive Review of Graph Neural Networks and Hybrid Deep Learning Methods,” *Algorithms*, vol. 19, no. 4, p. 310, 2026, doi: 10.3390/a19040310.
 - [15] M. Lee, “The Geometry of Feature Space in Deep Learning Models: A Holistic Perspective and Comprehensive Review,” *Mathematics*, vol. 11, no. 10, p. 2375, 2023, doi: 10.3390/math11102375.

- [16] S. Yang, M. Hou, and S. Li, "Three-Dimensional Point Cloud Semantic Segmentation for Cultural Heritage: A Comprehensive Review," *Remote Sens.*, vol. 15, no. 3, p. 548, 2023, doi: 10.3390/rs15030548.
- [17] Y. Tan, Y. Liang, and J. Zhu, "CityGML in the Integration of BIM and the GIS: Challenges and Opportunities," *Buildings*, vol. 13, no. 7, p. 1758, 2023, doi: 10.3390/buildings13071758.
- [18] A. Waqar *et al.*, "Success of Implementing Cloud Computing for Smart Development in Small Construction Projects," *Appl. Sci.*, vol. 13, no. 9, p. 5713, 2023, doi: 10.3390/app13095713.
- [19] D. Bhonde, P. Zadeh, and S. Staub-French, "Characterizing the Effects of Cloud-Based BIM Collaboration Tools on Design Coordination Processes," *Buildings*, vol. 16, no. 7, p. 1316, 2026, doi: 10.3390/buildings16071316.
- [20] N. Fernando, S. Shrestha, S. W. Loke, and K. Lee, "On Edge-Fog-Cloud Collaboration and Reaping Its Benefits: A Heterogeneous Multi-Tier Edge Computing Architecture," *Futur. Internet*, vol. 17, no. 1, p. 22, 2025, doi: 10.3390/fi17010022.
- [21] A. H. AL-Jumaili, R. C. Muniyandi, M. K. Hasan, J. K. Paw, and M. J. Singh, "Big Data Analytics Using Cloud Computing Based Frameworks for Power Management Systems: Status, Constraints, and Future Recommendations," *Sensors*, vol. 23, no. 6, p. 2952, 2023, doi: 10.3390/s23062952.
- [22] A. S. Almohsen, "Challenges Facing the Use of Remote Sensing Technologies in the Construction Industry: A Review," *Buildings*, vol. 14, no. 9, p. 2861, 2024, doi: 10.3390/buildings14092861.
- [23] W. A. Tanoli, A. Ullah, A. Sharafat, and E. M. Ismaeil, "A Multi-Model BIM-Based Framework for Integrated Digital Transformation of Design to Construction of Large Complex Underground Caverns," *Buildings*, vol. 15, no. 16, p. 2834, 2025, doi: 10.3390/buildings15162834.
- [24] R. Roka, A. Figueiredo, A. Vieira, and C. Cardoso, "A Systematic Review of Sensitivity Analysis in Building Energy Modeling: Key Factors Influencing Building Thermal Energy Performance," *Energies*, vol. 18, no. 9, p. 2375, 2025, doi: 10.3390/en18092375.
- [25] J. Cho, "Semantic-Vertex-Based Topological Detection for Automatic Dimension Generation in Building Information Modeling (BIM) with Industry Foundation Classes (IFC)," *Appl. Sci.*, vol. 16, no. 1, p. 139, 2026, doi: 10.3390/app16010139.
- [26] H. Li, L. Zhang, Y. Zhang, Y. Yao, R. Wang, and Y. Dai, "Water-Level Prediction Analysis for the Three Gorges Reservoir Area Based on a Hybrid Model of LSTM and Its Variants," *Water*, vol. 16, no. 9, p. 1227, 2024, doi: 10.3390/w16091227.
- [27] T. Singh, M. Mahmoodian, and S. Wang, "Enhancing Open BIM Interoperability: Automated Generation of a Structural Model from an Architectural Model," *Buildings*, vol. 14, no. 8, p. 2475, 2024, doi: 10.3390/buildings14082475.