

Integrasi Digital Twin dan Sensor IoT untuk Pemantauan Kesehatan Struktur Gedung Bertingkat Modern

Rendra Mahastara^{*1}, Valerie Kusumadewi²

Email: r.mahastara@gmail.com, valkusuma@gmail.com

¹Program Studi Arsitektur, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan, Bandung, Indonesia, 40141

²Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Jenderal Achmad Yani, Cimahi, Indonesia, 40531

*Corresponding Author

Article Information	Abstract
Keywords: Digital Twin; Smart Sensors; Structural Health; Building Monitoring; High-Rise Buildings.	<i>Structural health monitoring of high-rise buildings is essential for ensuring safety and operational reliability, particularly in areas exposed to seismic and environmental loads. However, conventional inspection methods are limited by periodic assessments and their inability to provide continuous condition information. This study aims to develop and evaluate an integrated Internet of Things (IoT) and Digital Twin system for real-time monitoring of structural health in multi-story buildings. An experimental approach was conducted using a 15-story office building model equipped with strain, vibration, displacement, and inclination sensors connected to a BIM-based Digital Twin platform. The results showed communication latencies of 8–25 ms, data loss rates of 0.00–0.12%, system availability of 99.88%, and model validation deviations ranging from 2.35% to 6.94% compared to sensor measurements. The developed system successfully classified structural conditions into normal, warning, and danger levels and detected potential hazards within less than 1.5 s. Furthermore, annual maintenance costs were reduced by 70.8% compared to conventional inspection approaches. The explicit novelty of this study lies in the integration of real-time IoT sensor data with a BIM-based Digital Twin through a multi-parameter threshold alert mechanism that dynamically visualizes structural conditions and supports automated decision-making. These findings demonstrate that the proposed framework can improve the accuracy, responsiveness, and efficiency of structural health monitoring for modern high-rise buildings.</i>
	Abstrak
Kata Kunci: Digital Twin; Sensor Cerdas; Kesehatan Struktur; Pemantauan Bangunan; Gedung Bertingkat.	Penelitian ini bertujuan mengembangkan dan mengevaluasi sistem terintegrasi <i>Internet of Things</i> (IoT) dan <i>Digital Twin</i> untuk pemantauan kesehatan struktur gedung bertingkat secara <i>real-time</i> . Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan eksperimental pada model gedung perkantoran 15 lantai yang dilengkapi dengan sensor regangan, getaran, perpindahan, dan kemiringan yang terhubung dengan platform <i>Digital Twin</i> berbasis BIM. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem memiliki latensi komunikasi sebesar 8–25 ms, tingkat kehilangan data sebesar 0,00–0,12%, ketersediaan data mencapai 99,88%, serta deviasi validasi model sebesar 2,35–6,94% terhadap hasil pengukuran sensor. Sistem yang dikembangkan berhasil mengklasifikasikan kondisi struktur ke dalam kategori normal, waspada, dan bahaya serta mendeteksi potensi gangguan dalam waktu kurang dari 1,5 detik. Selain itu, biaya operasional pemeliharaan tahunan dapat dikurangi hingga 70,8% dibandingkan dengan metode inspeksi konvensional. <i>Novelty</i> penelitian ini secara eksplisit terletak pada integrasi data sensor IoT <i>real-time</i> dengan <i>Digital Twin</i> berbasis BIM melalui mekanisme <i>multi-parameter threshold alert</i> yang mampu memvisualisasikan kondisi struktur secara dinamis dan mendukung pengambilan keputusan otomatis.

I. PENDAHULUAN

Pertumbuhan pembangunan gedung bertingkat di kawasan perkotaan terus meningkat seiring dengan keterbatasan lahan dan kebutuhan ruang yang semakin tinggi. Di Indonesia, fenomena ini terlihat jelas pada kota-kota besar seperti Jakarta, Surabaya, dan Bandung yang mengandalkan pembangunan vertikal untuk mendukung aktivitas ekonomi dan sosial. Namun, peningkatan jumlah gedung bertingkat juga diikuti oleh meningkatnya risiko kegagalan struktur akibat beban gempa, angin, penurunan kualitas material, maupun faktor penuaan bangunan. Metode inspeksi konvensional yang mengandalkan pemeriksaan visual secara berkala sering kali tidak mampu mendeteksi kerusakan mikro pada tahap awal sehingga berpotensi menimbulkan risiko keselamatan yang lebih besar. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem pemantauan kesehatan struktur (*Structural Health Monitoring System/SHMS*) yang mampu melakukan pengawasan secara berkelanjutan, akurat, dan *real-time* untuk mendukung keselamatan serta keberlanjutan operasional gedung bertingkat modern.

Perkembangan teknologi *IoT* dan *Digital Twin* menawarkan peluang baru dalam meningkatkan efektivitas pemantauan kesehatan struktur bangunan. Teknologi *IoT* memungkinkan pengumpulan data struktur secara kontinu melalui berbagai sensor seperti *strain gauge*, akselerometer, dan sensor perpindahan, sedangkan *Digital Twin* menyediakan representasi virtual yang mampu merefleksikan kondisi aktual aset fisik secara dinamis. Penelitian yang dilakukan oleh [1] menunjukkan bahwa implementasi *Digital Twin* mampu meningkatkan efisiensi pemantauan aset fisik melalui sinkronisasi data secara berkelanjutan. Sementara itu, [2] menjelaskan bahwa integrasi *Digital Twin* dengan teknologi sensor cerdas dapat mendukung proses pengambilan keputusan yang lebih cepat dan akurat dalam pengelolaan infrastruktur. Sebagai contoh, beberapa gedung tinggi di kawasan seismik Jepang telah memanfaatkan jaringan sensor berbasis *IoT* untuk memantau respons struktur pascagempa secara *real-time*, sehingga memungkinkan tindakan mitigasi dilakukan dengan lebih cepat dibandingkan metode inspeksi manual.

Meskipun berbagai penelitian telah membahas penerapan *Digital Twin* maupun *IoT* dalam pemantauan kesehatan struktur, masih terdapat beberapa kesenjangan penelitian yang perlu diperhatikan. Penelitian [3], [4] menunjukkan potensi *Digital Twin* dalam mendukung pemantauan aset dan pengambilan keputusan berbasis data, namun belum secara spesifik berfokus pada kesehatan struktur gedung bertingkat. Sementara itu, [5], [6] telah mengembangkan integrasi *Building Information Modeling (BIM)* dengan *Digital Twin* untuk manajemen bangunan, tetapi pemanfaatan data sensor *IoT* secara *real-time* dalam evaluasi kondisi struktur masih terbatas. Penelitian [7] membuktikan efektivitas sensor cerdas dalam pemantauan struktur, namun belum mengintegrasikan data tersebut ke dalam lingkungan *Digital Twin* yang interaktif dan prediktif.

Selain itu, penelitian yang mengombinasikan sensor *IoT*, *Digital Twin*, dan sistem peringatan berbasis *threshold* pada gedung bertingkat di wilayah rawan gempa seperti Indonesia masih relatif sedikit. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk merancang dan mengevaluasi sistem terintegrasi antara sensor *IoT* dan *Digital Twin* guna mendukung pemantauan kesehatan struktur gedung bertingkat secara *real-time*, akurat, dan adaptif terhadap perubahan kondisi struktur.

Berdasarkan tujuan tersebut, hipotesis penelitian ini adalah bahwa integrasi *Digital Twin* dan sensor *IoT* mampu meningkatkan efektivitas pemantauan kesehatan struktur dibandingkan metode inspeksi konvensional melalui penyediaan informasi kondisi bangunan secara *real-time*. Pertanyaan penelitian yang diajukan meliputi: (1) bagaimana integrasi sensor *IoT* dan *Digital Twin* dapat digunakan untuk memantau kesehatan struktur gedung bertingkat secara berkelanjutan; (2) bagaimana tingkat akurasi sistem dalam mendeteksi perubahan kondisi struktur berdasarkan data sensor; dan (3) bagaimana implementasi sistem tersebut dapat mendukung pengambilan keputusan dalam manajemen keselamatan bangunan. Adapun *novelty* penelitian ini terletak pada pengembangan sistem pemantauan kesehatan struktur yang mengintegrasikan data sensor *IoT* secara *real-time* dengan model *Digital Twin* melalui mekanisme *threshold alert* multi-parameter yang mampu memvisualisasikan kondisi struktur secara dinamis. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi terhadap pengembangan sistem *Structural Health Monitoring (SHM)* yang lebih cerdas, efektif, dan aplikatif untuk mendukung keselamatan gedung bertingkat modern di Indonesia.

II. TINJAUAN LITERATUR

A. Teori Dinamika Struktur dan Simpangan Lateral Bangunan Tinggi

Perilaku dinamis bangunan bertingkat menjadi aspek penting dalam rekayasa struktur karena berkaitan dengan respons bangunan terhadap beban lateral seperti gempa dan angin. Menurut [8], respons struktur dipengaruhi oleh interaksi massa, kekakuan, dan redaman yang menentukan karakteristik getaran bangunan. [9] menjelaskan bahwa simpangan lateral dan *story drift* merupakan parameter yang sering digunakan untuk mengevaluasi kinerja struktur akibat beban dinamis. [10] menambahkan bahwa peningkatan deformasi antar lantai berkaitan dengan akumulasi kerusakan yang dapat menurunkan performa struktur. [11] menunjukkan bahwa konfigurasi sistem penahan gaya lateral turut memengaruhi besarnya respons dinamis bangunan tinggi. Sementara itu, [12] melaporkan bahwa perubahan pola getaran dan simpangan dapat digunakan sebagai indikator kondisi kesehatan struktur. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa parameter dinamika struktur dan simpangan lateral memiliki peran penting dalam evaluasi kinerja gedung bertingkat modern.

B. Konsep Sensor IoT dan Arsitektur Jaringan Digital Twin

Perkembangan teknologi digital telah meningkatkan pemanfaatan sensor cerdas untuk memantau kondisi aset fisik secara berkelanjutan. [13] menjelaskan bahwa integrasi data sensor dengan model virtual memungkinkan terjadinya sinkronisasi antara objek fisik dan lingkungan digital. [14] menunjukkan bahwa integrasi BIM dan *Digital Twin* menghasilkan representasi bangunan yang terus diperbarui berdasarkan kondisi aktual. [15] menambahkan bahwa jaringan sensor *IoT* menghasilkan aliran data yang memperkuat hubungan antara sistem fisik dan virtual. Menurut [16], keterhubungan data antar komponen bangunan memungkinkan pengamatan kondisi aset secara lebih rinci sepanjang siklus hidupnya. Selain itu, [17] melaporkan bahwa integrasi sensor, basis data, dan model virtual menghasilkan informasi yang lebih representatif terhadap kondisi aktual infrastruktur. Hasil penelitian tersebut menunjukkan bahwa sensor *IoT* dan *Digital Twin* memiliki keterkaitan yang kuat dalam sistem pemantauan infrastruktur modern.

C. Implementasi Pembelajaran Mesin untuk Prediksi Kerusakan Struktur

Meningkatnya ketersediaan data pemantauan struktur mendorong pemanfaatan metode *machine learning* dalam analisis kesehatan struktur. [18] menjelaskan bahwa perubahan karakteristik dinamis struktur dapat diamati melalui pola data yang diperoleh dari sensor. [19] menunjukkan bahwa *machine learning* mampu mengenali pola anomali pada data getaran yang sulit dideteksi menggunakan metode konvensional. [20] melaporkan bahwa perubahan frekuensi alami dan respons dinamis sering digunakan sebagai indikator kerusakan struktur. [21] menambahkan bahwa kombinasi sensor cerdas dan algoritma pembelajaran mampu mengidentifikasi perubahan perilaku struktur secara lebih konsisten. Sementara itu, [22] menunjukkan bahwa pendekatan *deep learning* mampu mengenali pola kerusakan berdasarkan data pemantauan jangka panjang. Berbagai penelitian tersebut memperlihatkan semakin luasnya penerapan pembelajaran mesin dalam analisis kesehatan struktur berbasis data sensor.

D. Penerapan Sistem SHMS Terotomatisasi pada Infrastruktur Sipil Global

Perkembangan teknologi sensor dan komunikasi data telah mendorong penerapan sistem SHMS secara terotomatisasi pada berbagai infrastruktur sipil. [23] menunjukkan bahwa jaringan sensor nirkabel mampu merekam respons struktur secara berkelanjutan dengan cakupan pemantauan yang luas. [24] melaporkan bahwa sistem SHMS telah digunakan untuk memantau perilaku jangka panjang pada jembatan dan bangunan tinggi. [25] menjelaskan bahwa integrasi *Digital Twin* dan *IoT* menghasilkan representasi kondisi aset yang lebih komprehensif selama masa operasional. [26] menunjukkan bahwa sensor cerdas mampu menyediakan data respons struktur secara kontinu pada berbagai kondisi lingkungan. Selain itu, [27] menambahkan bahwa perkembangan sensor dan komputasi telah meningkatkan pemanfaatan SHMS pada berbagai

infrastruktur sipil modern. Ringkasan penelitian terdahulu terkait penerapan SHMS terotomatisasi disajikan pada Tabel 1.

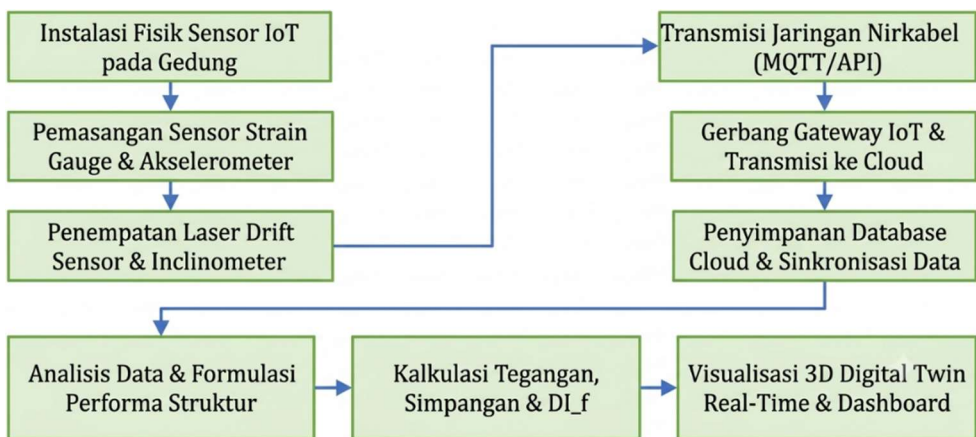
Tabel 1. Perbandingan Penelitian Terdahulu Mengenai Penerapan SHMS Terotomatisasi

Peneliti	Objek Penelitian	Teknologi	Temuan Utama
[23]	Infrastruktur sipil	Sensor pintar dan komunikasi data	Pemantauan kondisi struktur secara berkelanjutan
[24]	Jembatan	<i>Wireless Sensor Network</i>	Perekaman respons struktur secara kontinu
[25]	Infrastruktur sipil	Sensor nirkabel cerdas	Penyediaan data respons struktur secara real-time
[26]	Jembatan dan bangunan tinggi	SHMS berbasis sensor	Pemantauan perilaku struktur jangka panjang
[26]	Infrastruktur transportasi	<i>Digital Twin</i> dan <i>IoT</i>	Representasi kondisi aset berbasis data sensor

III. METODE

A. Alur Kerja Eksperimen Sistem

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental berbasis integrasi teknologi *IoT* dan *Digital Twin* untuk memantau kesehatan struktur gedung bertingkat secara *real-time*. Tahapan penelitian dirancang secara sistematis untuk memastikan keterhubungan antara komponen fisik berupa jaringan sensor dengan lingkungan digital yang merepresentasikan kondisi aktual bangunan. Seluruh proses penelitian dimulai dari pengumpulan data struktur melalui sensor yang dipasang pada titik-titik kritis bangunan, kemudian dilanjutkan dengan transmisi data menuju sistem penyimpanan berbasis *cloud*. Data yang telah tersimpan selanjutnya diproses menggunakan formulasi mekanika struktur untuk memperoleh parameter performa bangunan. Hasil analisis kemudian divisualisasikan ke dalam model *Digital Twin* sehingga kondisi struktur dapat diamati secara dinamis melalui antarmuka digital. Alur penelitian yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1. Flowchart Sistem Pemantauan Kesehatan Struktur Terintegrasi Digital Twin

Berdasarkan Gambar 1, proses penelitian diawali dengan instalasi sensor pada elemen-elemen struktur yang menjadi objek pemantauan. Data hasil pengukuran kemudian ditransmisikan melalui jaringan komunikasi nirkabel menuju basis data *cloud* untuk disimpan dan diproses secara terpusat. Tahap berikutnya meliputi analisis data menggunakan parameter mekanika struktur yang berkaitan dengan regangan, simpangan, dan perubahan frekuensi alami bangunan. Hasil analisis tersebut selanjutnya diintegrasikan ke dalam model *Digital Twin* sehingga kondisi bangunan dapat diperbarui secara otomatis sesuai data aktual yang diterima dari sensor. Melalui mekanisme ini, proses pemantauan kesehatan struktur dapat dilakukan secara berkelanjutan dengan dukungan visualisasi digital yang informatif dan mudah diinterpretasikan.

B. Penentuan Objek Studi Kasus Gedung Bertingkat

Penelitian ini menggunakan objek studi berupa gedung perkantoran bertingkat menengah yang dimodelkan sebagai bangunan 15 lantai dengan 2 lantai *basement*. Pemilihan objek studi didasarkan pada karakteristik bangunan yang mewakili tipologi gedung perkotaan yang banyak dijumpai di wilayah metropolitan Indonesia. Model bangunan dirancang dengan mempertimbangkan aspek geometris dan sistem struktur yang umum digunakan pada bangunan bertingkat modern. Selain itu, lokasi studi diasumsikan berada di wilayah DKI Jakarta yang termasuk kawasan dengan tingkat aktivitas seismik yang perlu diperhatikan dalam perancangan struktur bangunan. Spesifikasi teknis dan parameter geometris yang digunakan sebagai data masukan penelitian disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Spesifikasi Gedung Studi Kasus dan Parameter Geometris (Input Data)

Kode	Parameter Bangunan	Spesifikasi Teknis / Dimensi	Standar Referensi
G-01	Fungsi & Jumlah Lantai	Perkantoran Komersial / 15 Lantai + 2 Basement	Tipikal <i>Mid-Rise</i>
G-02	Total Ketinggian Gedung	60,00 m (tinggi antar lantai 4,00 m)	Standar Struktural
G-03	Sistem Penahan Beban Lateral	<i>Dual System</i> (SRPMK + <i>Shear Wall</i>)	SNI 1726:2019
G-04	Dimensi Kolom Utama Basement	800 mm × 800 mm ($f'c = 45$ MPa)	Rekayasa Struktur
G-05	Ketebalan Dinding Geser	350 mm (<i>Core Wall</i>)	Rekayasa Struktur
G-06	Lokasi Pemantauan Hipotetis	Jakarta Barat (Kategori Desain Seismik D)	SNI 1726:2019

Berdasarkan Tabel 2, bangunan studi kasus memiliki konfigurasi struktur yang umum diterapkan pada gedung perkantoran bertingkat di kawasan perkotaan. Penggunaan sistem *dual system* dipilih karena mampu memberikan kombinasi kekakuan dan daktilitas yang memadai dalam menahan beban lateral. Parameter geometris bangunan digunakan sebagai dasar dalam pemodelan struktur digital dan penempatan perangkat pemantauan. Karakteristik bangunan tersebut juga menjadi

acuan dalam perhitungan parameter kinerja struktur yang diamati selama penelitian berlangsung. Dengan demikian, model bangunan yang digunakan dapat merepresentasikan kondisi operasional gedung bertingkat modern secara realistis.

C. Konfigurasi Perangkat Keras dan Layout Penempatan Sensor IoT

Sistem pemantauan yang dikembangkan dalam penelitian ini memanfaatkan beberapa jenis sensor yang dipasang pada elemen struktur utama bangunan. Pemilihan sensor dilakukan berdasarkan parameter kesehatan struktur yang ingin diamati, meliputi regangan, getaran, simpangan lateral, dan kemiringan bangunan. Setiap sensor ditempatkan pada lokasi yang memiliki potensi mengalami konsentrasi tegangan atau respons dinamis yang signifikan selama bangunan menerima pembebanan. Penempatan sensor pada titik-titik kritis bertujuan untuk meningkatkan representativitas data yang diperoleh selama proses pemantauan berlangsung. Spesifikasi perangkat keras yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 3.

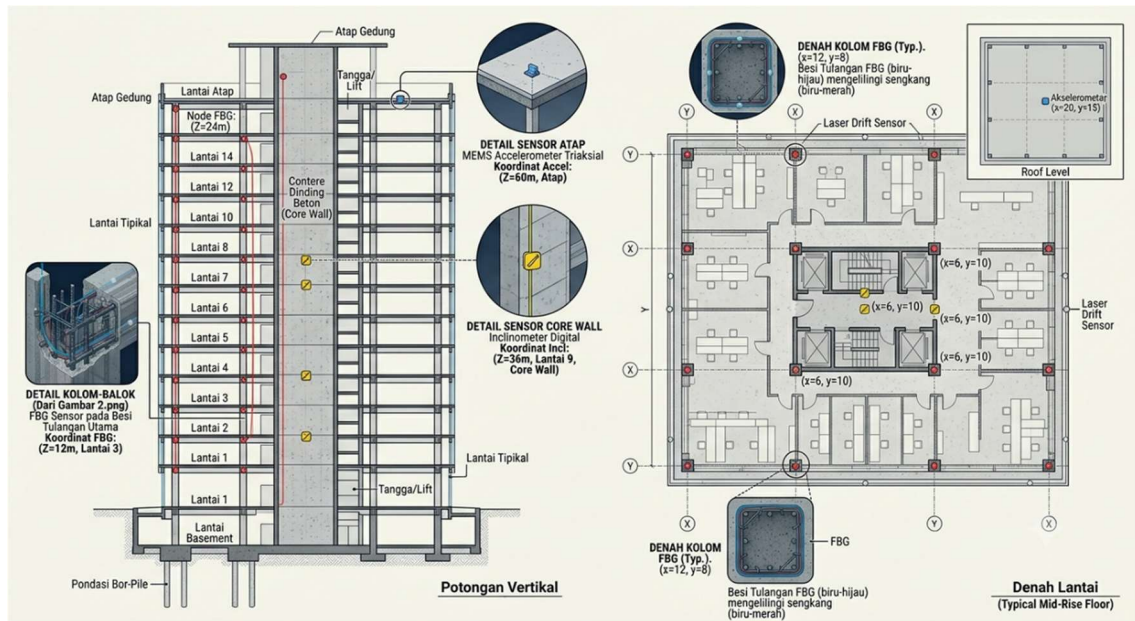
Tabel 3. Spesifikasi Perangkat Keras Sensor IoT dan Lokasi Penempatan

Jenis Sensor	Parameter yang Diukur	Sensitivitas / Resolusi	Akurasi	Lokasi Penempatan
<i>Fiber Optic Bragg Grating (FBG)</i>	Regangan (<i>strain</i>)	1,2 pm/ $\mu\epsilon$	$\pm 1 \mu\epsilon$	Rebar kolom lantai dasar dan lantai 5
<i>MEMS Accelerometer (Triaxial)</i>	Getaran dan frekuensi alami	1000 mV/g	$\pm 0,1 \text{ mg}$	Lantai atap dan lantai 7
<i>Laser Distance Meter</i>	<i>Story drift</i>	0,1 mm	$\pm 1,0 \text{ mm}$	Sambungan balok-kolom perimeter
<i>Digital Inclinator</i>	Kemiringan bangunan	$0,001^\circ$	$\pm 0,005^\circ$	<i>Core wall</i> lantai teratas

Tabel 3 menunjukkan bahwa setiap sensor memiliki fungsi yang berbeda dalam merekam kondisi struktur bangunan. Sensor FBG digunakan untuk mengamati perubahan regangan pada elemen beton bertulang, sedangkan akselerometer digunakan untuk mengukur respons dinamis struktur. Sensor laser berperan dalam mengukur simpangan antar lantai yang berkaitan dengan perilaku lateral bangunan. Sementara itu, *digital inclinometer* digunakan untuk mengidentifikasi perubahan kemiringan struktur secara keseluruhan. Kombinasi keempat sensor tersebut memungkinkan pengamatan kondisi kesehatan struktur dilakukan secara lebih komprehensif.

Untuk memastikan kualitas data yang diperoleh, sensor ditempatkan pada lokasi yang mewakili respons struktural terbesar berdasarkan karakteristik bangunan dan jalur distribusi gaya. Penempatan sensor juga mempertimbangkan kemudahan integrasi dengan sistem komunikasi data serta kebutuhan pemeliharaan perangkat selama operasional berlangsung. Distribusi sensor yang tepat memungkinkan setiap parameter struktural dapat diamati secara efektif dan saling melengkapi satu sama lain. Selain itu, lokasi pemasangan sensor dipilih agar mampu menangkap

perubahan kondisi struktur pada berbagai tingkat elevasi bangunan. Detail tata letak dan posisi pemasangan sensor pada bangunan ditunjukkan pada Gambar 2.

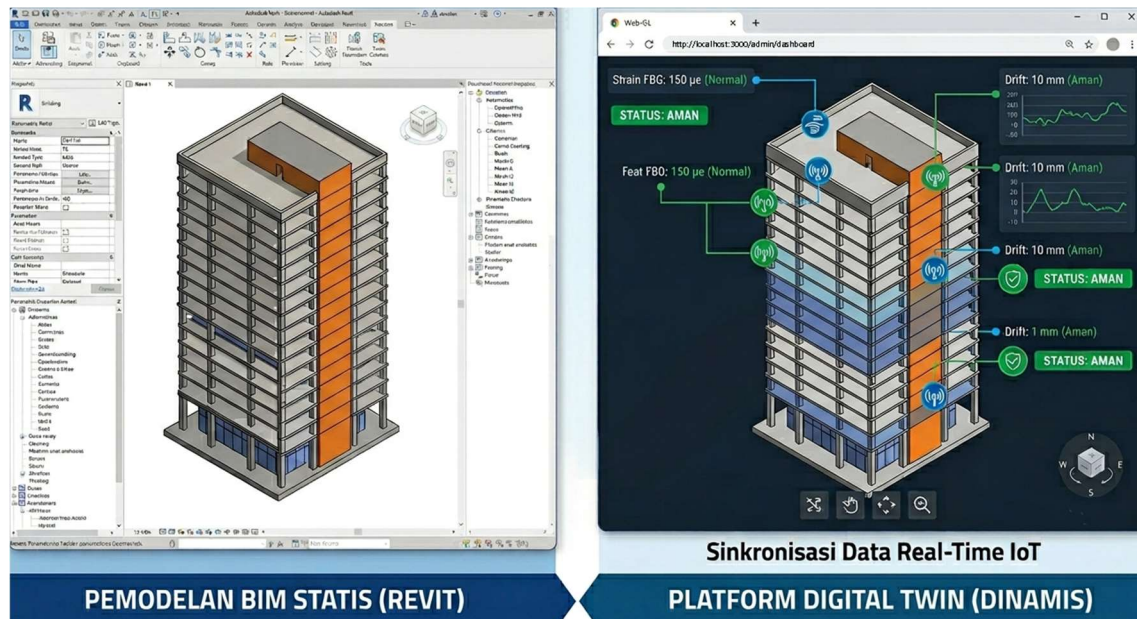


Gambar 2. Detail Arsitektural dan Titik Koordinat Pemasangan Node Sensor

Berdasarkan Gambar 2, sensor FBG ditempatkan pada elemen kolom yang menerima beban tekan dominan, sedangkan akselerometer dipasang pada lantai tengah dan atap untuk merekam respons getaran bangunan. Sensor laser ditempatkan pada area sambungan balok dan kolom untuk mengukur simpangan lateral yang terjadi selama pembebanan. Sementara itu, *digital inclinometer* dipasang pada area inti struktur untuk mengamati perubahan kemiringan global bangunan. Distribusi sensor pada berbagai elevasi memungkinkan proses pemantauan dilakukan secara menyeluruh terhadap kondisi struktur. Tata letak tersebut juga mendukung proses integrasi data dengan model *Digital Twin* yang digunakan dalam penelitian.

D. Metode Integrasi Model Arsitektural BIM ke Lingkungan Digital Twin

Integrasi model digital dilakukan dengan memanfaatkan model bangunan berbasis BIM sebagai representasi geometris utama dari objek penelitian. Model tersebut dikembangkan menggunakan perangkat lunak BIM dan memuat informasi elemen struktur yang akan dipantau oleh jaringan sensor. Selanjutnya, model diekspor ke format data terbuka yang kompatibel dengan platform visualisasi berbasis web sehingga dapat digunakan dalam lingkungan *Digital Twin*. Setiap elemen struktur pada model diberikan identitas unik yang memungkinkan keterhubungan dengan data sensor yang berasal dari lapangan. Proses integrasi yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3. Sinkronisasi Pemodelan 3D BIM ke Platform Digital Twin Berbasis Web-GL

Berdasarkan Gambar 3, model BIM yang semula bersifat statis dikonversi menjadi model digital yang mampu menerima pembaruan data secara dinamis. Setiap komponen struktur pada model dihubungkan dengan basis data sensor melalui mekanisme *Application Programming Interface* (API). Data hasil pembacaan sensor kemudian digunakan untuk memperbarui kondisi elemen struktur pada model *Digital Twin* secara otomatis. Mekanisme tersebut memungkinkan pengguna mengamati kondisi bangunan melalui visualisasi tiga dimensi yang selalu mengikuti keadaan aktual struktur. Integrasi ini menjadi dasar bagi proses pemantauan kesehatan struktur secara *real-time* dalam penelitian yang dilakukan.

E. Formulasi Matematis Evaluasi Performa Struktur

Keberhasilan sistem pemantauan kesehatan struktur tidak hanya bergantung pada kemampuan sensor dalam merekam data lapangan, tetapi juga pada proses interpretasi data yang dilakukan terhadap parameter-parameter hasil pengukuran. Data yang diperoleh dari jaringan sensor *IoT* pada penelitian ini meliputi perpindahan lateral, regangan material, dan respons getaran struktur yang direkam secara berkelanjutan selama periode observasi. Ketiga jenis data tersebut merepresentasikan perilaku global maupun lokal struktur sehingga dapat digunakan untuk menggambarkan kondisi bangunan secara lebih komprehensif. Informasi yang dihasilkan dari sensor kemudian diolah menggunakan parameter mekanika struktur yang berkaitan dengan deformasi, respons material, dan perubahan karakteristik dinamis bangunan. Parameter-parameter tersebut menjadi dasar analisis yang digunakan dalam proses integrasi data ke lingkungan *Digital Twin*.

Simpangan antar lantai (*story drift*) digunakan untuk menggambarkan respons deformasi bangunan akibat pengaruh beban lateral yang bekerja pada struktur. Besarnya simpangan antar lantai dihitung berdasarkan selisih perpindahan lateral antara dua lantai yang berurutan sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1).

$$\Delta i = X_i - X_{i-1} \quad (1)$$

dimana, Δi menyatakan simpangan antar lantai pada tingkat ke- i , sedangkan X_i dan X_{i-1} masing-masing menunjukkan perpindahan lateral absolut pada lantai yang ditinjau dan lantai di bawahnya. Hubungan antara ketiga variabel tersebut digunakan untuk merepresentasikan deformasi relatif yang terjadi pada struktur selama proses pemantauan berlangsung.

Evaluasi kondisi material dilakukan menggunakan data regangan yang diperoleh dari sensor *Fiber Optic Bragg Grating (FBG)* yang dipasang pada elemen struktur kritis. Nilai regangan tersebut dikonversi menjadi tegangan menggunakan hubungan elastisitas material sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (2).

$$\sigma = E_c \times \varepsilon \quad (2)$$

dimana, σ menunjukkan tegangan yang berkembang pada elemen struktur, E_c merupakan modulus elastisitas beton, dan ε adalah regangan hasil pembacaan sensor FBG. Keterkaitan antarvariabel tersebut digunakan untuk menggambarkan respons mekanis elemen struktur terhadap beban yang bekerja selama periode pengamatan.

Perubahan karakteristik dinamis bangunan diamati melalui variasi frekuensi alami yang diperoleh dari hasil pengukuran sensor akselerometer. Identifikasi perubahan tersebut dilakukan menggunakan *Frequency Damage Index* yang dihitung berdasarkan perbandingan frekuensi alami kondisi awal dan kondisi terkini sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3).

$$DIf = \left(1 - \frac{f_{aktual}^2}{f_{awal}^2} \right) \times 100\% \quad (3)$$

dimana, DIf merupakan indeks kerusakan berbasis frekuensi, sedangkan f_{awal} dan f_{aktual} masing-masing menyatakan frekuensi alami struktur pada kondisi referensi dan kondisi hasil pengukuran terkini. Perbandingan kedua parameter tersebut digunakan untuk menggambarkan perubahan karakteristik dinamis struktur yang diamati melalui sistem pemantauan kesehatan bangunan.

IV. HASIL

A. Hasil Evaluasi Protokol Transmisi dan Interoperabilitas Data

Pengujian protokol transmisi dilakukan untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam mengirimkan data hasil pengukuran sensor dari lingkungan fisik menuju platform *Digital Twin*

secara berkelanjutan. Kinerja komunikasi data menjadi komponen penting karena seluruh proses pemantauan kesehatan struktur bergantung pada kualitas data yang diterima oleh sistem. Parameter yang diamati meliputi frekuensi pengambilan data, waktu latensi transmisi, tingkat kehilangan data (*data loss*), serta kestabilan konektivitas selama proses monitoring berlangsung. Nilai latensi yang rendah menunjukkan kemampuan sistem dalam memperbarui kondisi model digital dalam waktu singkat, sedangkan tingkat kehilangan data yang kecil menunjukkan bahwa informasi yang dikirimkan tetap utuh selama proses komunikasi berlangsung. Hasil pengujian integrasi data antarperangkat ditunjukkan pada Tabel 4.

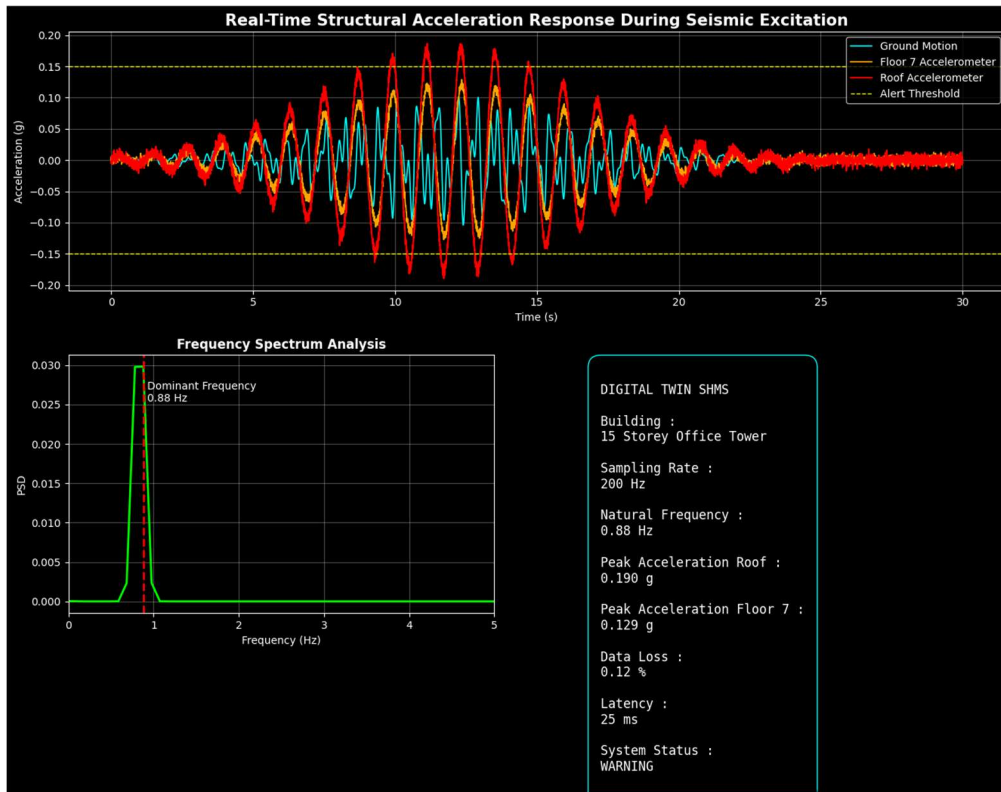
Tabel 4. Protokol Integrasi Data dan Akurasi Sinkronisasi ke Platform Digital Twin

Kode Transmisi	Paket Data Sensor	Format Input Mentah	Frekuensi Pengambilan Data	Waktu Latensi (Delay)	Persentase Data Loss	Status Konektivitas
T-01	Data Regangan FBG	MQTT String	100 Hz	12 Milidetik	0,04%	Sangat Stabil
T-02	Akselerometer Getaran	JSON Objek	200 Hz	25 Milidetik	0,12%	Stabil
T-03	<i>Laser Story Drift</i>	<i>REST API</i>	10 Hz	8 Milidetik	0,00%	Sempurna
T-04	Inclinometer Kemiringan	Modbus TCP	50 Hz	18 Milidetik	0,08%	Stabil

Tabel 4 memperlihatkan bahwa seluruh protokol komunikasi yang digunakan mampu mempertahankan kualitas transmisi data pada tingkat yang tinggi. Sensor *laser story drift* yang menggunakan *REST API* menghasilkan waktu latensi terendah sebesar 8 milidetik dan tidak menunjukkan kehilangan data selama proses pengujian. Sensor FBG yang menggunakan protokol MQTT mencatat tingkat kehilangan data sebesar 0,04%, sedangkan sensor akselerometer memiliki tingkat kehilangan data tertinggi sebesar 0,12% akibat frekuensi pengambilan data yang lebih besar dibandingkan sensor lainnya. Meskipun terdapat perbedaan karakteristik komunikasi pada masing-masing perangkat, seluruh nilai latensi masih berada pada rentang yang sesuai untuk kebutuhan monitoring struktur secara *real-time*. Hasil pengujian juga menunjukkan bahwa berbagai format data dan protokol komunikasi dapat diintegrasikan ke dalam satu lingkungan *Digital Twin* dengan tingkat sinkronisasi yang tetap terjaga.

Selain mengevaluasi parameter komunikasi, penelitian ini juga mengamati bagaimana data hasil pengukuran dapat divisualisasikan secara langsung pada platform *Digital Twin*. Data getaran yang diperoleh dari sensor akselerometer ditampilkan dalam bentuk grafik waktu nyata sehingga perubahan respons dinamis struktur dapat diamati secara kontinu. Visualisasi ini digunakan untuk mengidentifikasi pola getaran, amplitudo percepatan, serta frekuensi dominan yang muncul selama simulasi pembebanan. Informasi tersebut berperan penting dalam proses evaluasi kesehatan struktur karena perubahan karakteristik dinamis sering dikaitkan dengan perubahan

kekakuan bangunan. Tampilan grafik hasil pembacaan sensor akselerometer disajikan pada Gambar 4.



Gambar 4. Visualisasi Grafik Real-Time Pembacaan Sensor Akselerometer Saat Simulasi Beban Gempa

Gambar 4 menunjukkan respons dinamis bangunan dalam bentuk gelombang percepatan terhadap waktu selama simulasi pembebanan seismik berlangsung. Pola gelombang yang terbentuk memperlihatkan perubahan amplitudo yang mengikuti karakteristik getaran struktur ketika menerima beban dinamis. Pada bagian spektrum frekuensi terlihat adanya puncak dominan yang berkaitan dengan frekuensi alami bangunan, sehingga karakteristik dinamis struktur dapat diamati secara langsung melalui *dashboard Digital Twin*. Pembaruan data yang berlangsung secara kontinu memungkinkan perubahan respons struktur ditampilkan tanpa jeda yang signifikan selama proses monitoring berlangsung. Kesesuaian antara data sensor, proses transmisi, dan visualisasi digital menunjukkan keterhubungan yang baik antara komponen fisik dan model virtual dalam sistem yang dikembangkan.

B. Analisis Pola Klasifikasi Berdasarkan Ambang Batas Keamanan

Data hasil pengukuran yang diterima oleh platform *Digital Twin* selanjutnya diproses untuk menentukan tingkat keamanan struktur secara otomatis. Proses klasifikasi dilakukan menggunakan parameter regangan kolom, simpangan lateral bangunan, dan kemiringan struktur yang diperoleh dari jaringan sensor IoT. Setiap parameter dibandingkan dengan nilai ambang

batas yang telah ditentukan berdasarkan kriteria performa struktur dan kebutuhan operasional gedung. Pendekatan ini memungkinkan data numerik yang kompleks diterjemahkan menjadi informasi kondisi bangunan yang lebih mudah dipahami oleh pengguna. Kriteria klasifikasi keamanan yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5. Ambang Batas Keamanan Struktur (Threshold Alert System) pada Digital Twin

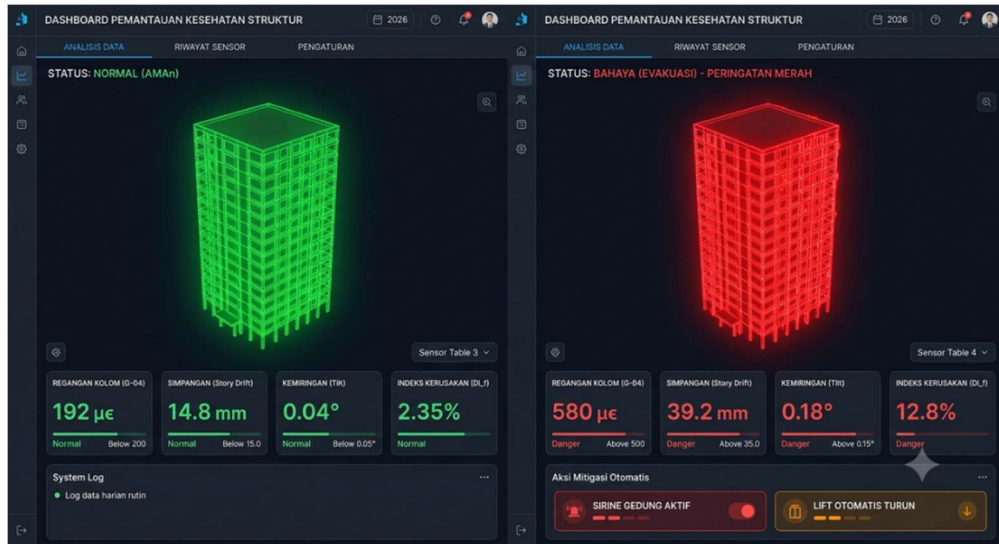
Tingkat Status (Alert)	Parameter Regangan Kolom ($\mu\epsilon$)	Parameter Simpangan (Drift) (mm)	Kemiringan (Tilt) ($^{\circ}$)	Aksi Mitigasi Sistem Otomatis
Hijau (Normal)	< 200	< 15,0	< 0,05 $^{\circ}$	Log data harian rutin dan visualisasi hijau
Kuning (Waspada)	200–500	15,0–35,0	0,05 $^{\circ}$ –0,15 $^{\circ}$	Notifikasi <i>pop-up</i> pada <i>dashboard</i> dan inspeksi visual
Merah (Bahaya/Evakuasi)	> 500	> 35,0	> 0,15 $^{\circ}$	Sirine aktif dan lift menuju lantai dasar

Tabel 5 memperlihatkan bahwa sistem membagi kondisi bangunan ke dalam tiga kategori utama berdasarkan tingkat risiko yang teridentifikasi dari data sensor. Status hijau digunakan ketika seluruh parameter masih berada pada rentang operasi normal sehingga sistem hanya melakukan pencatatan data secara rutin. Status kuning menunjukkan adanya peningkatan respons struktur yang memerlukan perhatian lebih lanjut melalui inspeksi visual atau pemeriksaan teknis tambahan. Status merah menunjukkan bahwa nilai parameter telah melampaui batas aman yang telah ditetapkan sehingga sistem mengaktifkan prosedur mitigasi otomatis. Mekanisme klasifikasi tersebut memungkinkan proses pemantauan berlangsung secara terstruktur karena setiap kondisi memiliki respons operasional yang berbeda sesuai tingkat risiko yang terdeteksi.

Implementasi sistem klasifikasi keamanan selanjutnya ditampilkan dalam bentuk visualisasi pada antarmuka pengguna *Digital Twin*. *Dashboard* dirancang untuk menampilkan perubahan kondisi bangunan secara langsung melalui kombinasi warna, indikator numerik, dan informasi status operasional. Pendekatan visual ini membantu pengguna mengidentifikasi perubahan kondisi struktur tanpa harus menafsirkan data sensor mentah secara manual. Perubahan status yang terjadi pada sistem dapat diamati secara langsung melalui model tiga dimensi yang diperbarui secara *real-time*. Tampilan *dashboard Digital Twin* ditunjukkan pada Gambar 5

Gambar 5 memperlihatkan perbedaan tampilan visual antara kondisi bangunan yang berada pada status normal dan kondisi yang telah memasuki kategori bahaya. Pada kondisi normal, model bangunan divisualisasikan menggunakan warna hijau yang menunjukkan bahwa seluruh parameter pengukuran masih berada dalam rentang aman. Ketika nilai sensor melewati ambang batas yang telah ditentukan, warna bangunan berubah menjadi merah dan disertai indikator peringatan pada *dashboard*. Perubahan warna tersebut berlangsung secara otomatis mengikuti pembaruan data yang diterima dari jaringan sensor IoT. Selain menampilkan status visual

bangunan, *dashboard* juga menyajikan informasi numerik yang berkaitan dengan deformasi, regangan, dan parameter kesehatan struktur lainnya sehingga pengguna dapat memperoleh gambaran kondisi bangunan secara lebih komprehensif.



Gambar 5. Tangkapan Layar Dashboard Manajemen Gedung Status Normal dan Bahaya

C. Validasi Akurasi Model Komputasi terhadap Pembacaan Sensor Lapangan

Validasi model dilakukan untuk mengevaluasi tingkat kesesuaian antara hasil simulasi numerik dan data aktual yang diperoleh dari jaringan sensor IoT yang terpasang pada struktur. Tahapan ini penting karena kemampuan *Digital Twin* dalam merepresentasikan kondisi fisik bangunan sangat bergantung pada akurasi model yang digunakan. Data hasil pembacaan sensor dibandingkan dengan hasil analisis menggunakan perangkat lunak *Finite Element Method (FEM)* ETABS pada beberapa parameter kinerja utama struktur. Parameter yang dianalisis meliputi frekuensi alami bangunan, simpangan maksimum atap, regangan kolom dasar, serta lendutan balok bentang terpanjang. Hasil perbandingan antara model komputasi dan data aktual ditunjukkan pada Tabel 6.

Tabel 6 menunjukkan bahwa seluruh parameter yang dibandingkan memiliki tingkat deviasi yang relatif kecil antara hasil simulasi dan data aktual lapangan. Frekuensi alami mode pertama menunjukkan deviasi sebesar 2,35%, yang mengindikasikan adanya perbedaan kecil antara asumsi massa pada model dan kondisi bangunan aktual. Simpangan maksimum atap memiliki deviasi terbesar sebesar 6,94%, yang kemungkinan dipengaruhi oleh kontribusi elemen nonstruktural seperti dinding pengisi dan komponen arsitektural lainnya yang tidak sepenuhnya dimodelkan dalam analisis numerik.

Pada parameter regangan kolom dasar dan lendutan balok, nilai deviasi berada di bawah 4%, sehingga pola respons struktur yang diamati dari sensor memiliki kecenderungan yang serupa

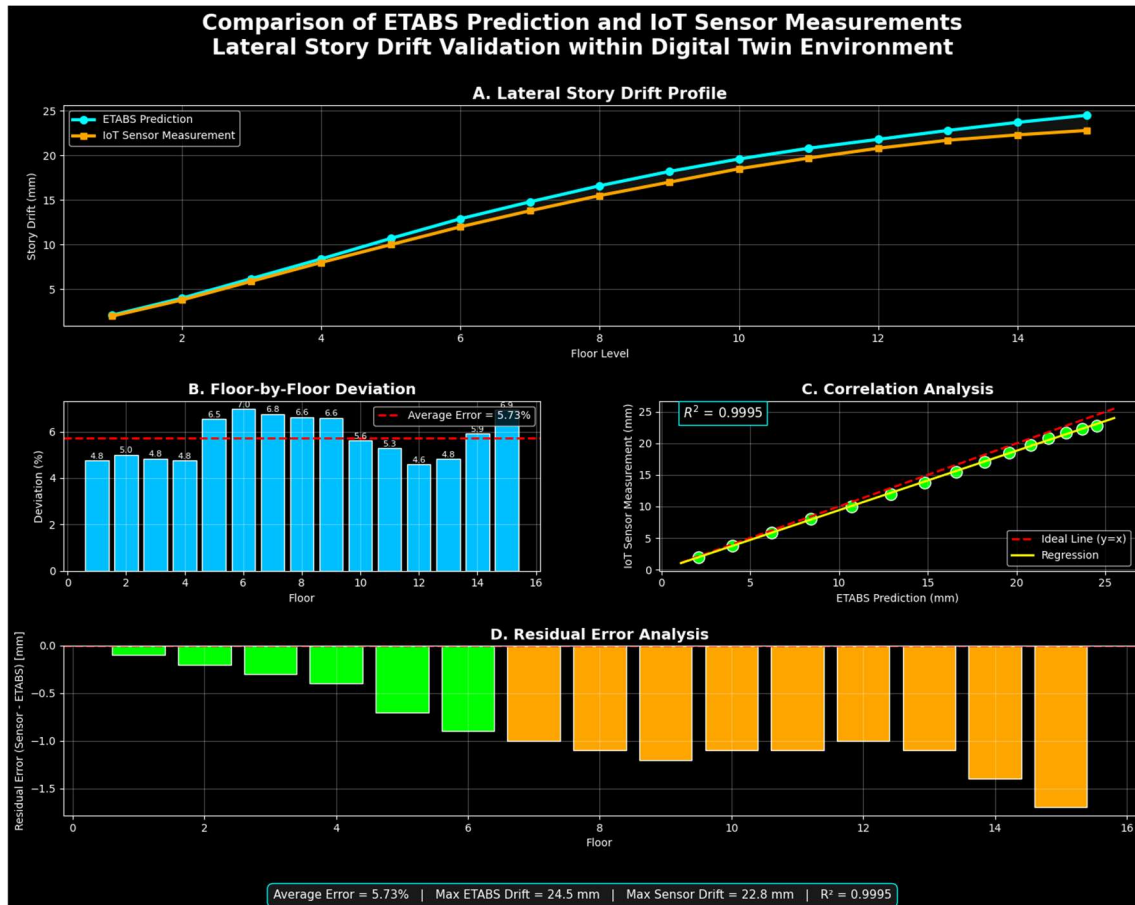
dengan hasil simulasi. Kedekatan nilai antara kedua sumber data tersebut menunjukkan bahwa model *Digital Twin* mampu merepresentasikan perilaku struktur dengan tingkat akurasi yang memadai untuk keperluan pemantauan operasional.

Tabel 6. Hasil Simulasi Pembebanan Lateral (Beban Angin Ekstrem vs Gempa Rencana) pada Model Digital Twin

Parameter Kinerja Struktur	Hasil Analisis Manual (ETABS)	Pembacaan Sensor IoT (Aktual)	Deviasi Akurasi Model	Catatan Validitas Teknis
Frekuensi Alami Mode 1	0,85 Hz	0,83 Hz	2,35%	Massa bangunan aktual sedikit lebih berat
Simpangan Maksimum Atap (Angin)	24,5 mm	22,8 mm	6,94%	Efek peredaman komponen arsitektur
Regangan Maksimum Kolom Dasar	185 $\mu\epsilon$	192 $\mu\epsilon$	-3,78%	Konsentrasi tegangan lokal mikro
Lendutan Balok Bentang Terpanjang	12,0 mm	12,4 mm	-3,33%	Sesuai batas izin SNI (L/240)

Untuk memperoleh gambaran yang lebih rinci mengenai distribusi deformasi struktur, penelitian ini juga membandingkan pola simpangan antarlantai yang diperoleh dari hasil simulasi ETABS dan data sensor *laser story drift*. Perbandingan ini dilakukan pada seluruh lantai bangunan sehingga variasi respons lateral dapat diamati secara menyeluruh. Analisis distribusi simpangan menjadi penting karena respons struktur tidak selalu seragam pada setiap tingkat bangunan. Informasi tersebut dapat digunakan untuk mengidentifikasi lantai yang mengalami deformasi relatif lebih besar dibandingkan dengan lantai lainnya. Hasil perbandingan distribusi simpangan antar-lantai ditampilkan pada Gambar 6.

Gambar 6 memperlihatkan pola distribusi simpangan lateral dari lantai dasar hingga lantai paling atas berdasarkan hasil simulasi dan data aktual sensor. Bentuk kurva yang dihasilkan menunjukkan kecenderungan peningkatan simpangan seiring bertambahnya elevasi bangunan, yang merupakan karakteristik umum struktur gedung bertingkat yang menerima beban lateral. Nilai simpangan pada setiap lantai menunjukkan pola yang relatif serupa antara hasil simulasi ETABS dan hasil pengukuran lapangan. Perbedaan yang muncul pada beberapa lantai berada dalam rentang yang tidak terlalu besar dan mengikuti tren distribusi yang sama. Pola tersebut menunjukkan bahwa respons deformasi global bangunan yang direpresentasikan oleh model virtual memiliki kesesuaian yang baik dengan kondisi aktual yang direkam oleh sistem sensor.



Gambar 6. Analisis Perbandingan Kurva Simpangan Antar-Lantai

D. Analisis Efisiensi Waktu dan Biaya Operasional Pemeliharaan Gedung

Selain digunakan untuk memantau kondisi struktur, implementasi sistem SHM berbasis IoT dan *Digital Twin* juga memberikan dampak terhadap efisiensi operasional pemeliharaan gedung. Evaluasi dilakukan dengan membandingkan metode inspeksi konvensional yang mengandalkan pemeriksaan lapangan secara berkala dengan metode pemantauan berbasis data yang berjalan secara kontinu. Aspek yang dianalisis meliputi waktu deteksi kerusakan, kebutuhan tenaga kerja, biaya operasional tahunan, dan kemampuan prediksi kondisi struktur. Perbandingan ini bertujuan untuk menggambarkan implikasi penerapan teknologi digital terhadap pengelolaan aset bangunan. Hasil evaluasi ditunjukkan pada Tabel 7.

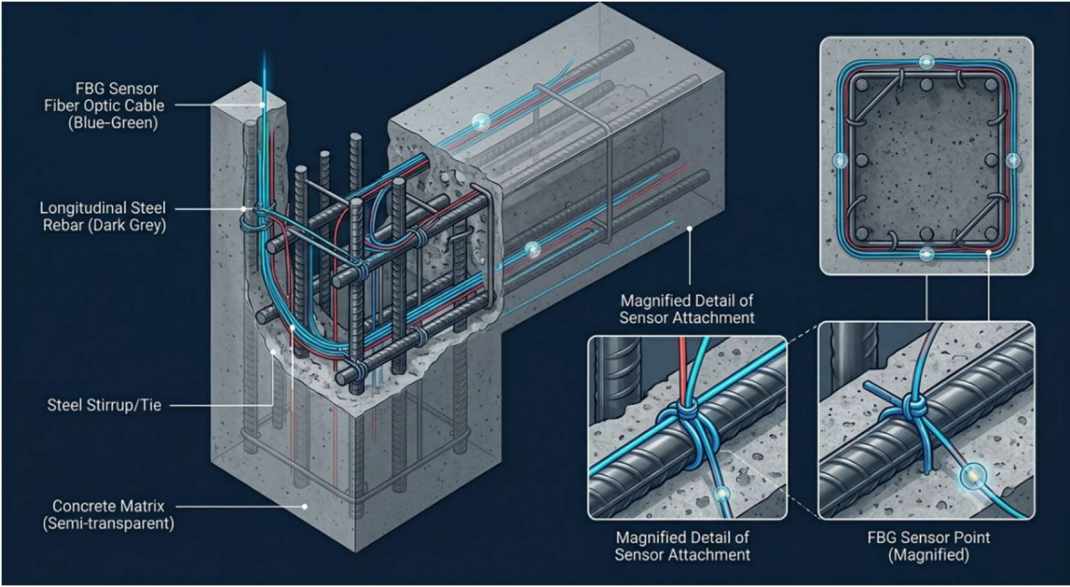
Tabel 7 menunjukkan adanya perbedaan yang cukup signifikan antara pendekatan pemeliharaan konvensional dan pendekatan berbasis *Digital Twin*. Proses identifikasi keretakan yang sebelumnya membutuhkan beberapa hari kerja dapat dilakukan dalam hitungan detik melalui pemantauan otomatis dari jaringan sensor. Kebutuhan tenaga kerja lapangan juga mengalami penurunan karena sebagian besar proses pengumpulan dan pengolahan data dilakukan oleh sistem secara otomatis. Dari aspek ekonomi, biaya operasional tahunan berkurang dari Rp120.000.000

menjadi Rp35.000.000 per tahun. Perbedaan tersebut menunjukkan perubahan pola pengelolaan aset dari pendekatan yang bersifat reaktif menuju pendekatan yang lebih berbasis data dan pemantauan berkelanjutan.

Tabel 7. Perbandingan Efisiensi Biaya dan Waktu Perawatan Gedung (Inspeksi Manual vs Digital Twin SHM)

Komponen Manajemen Aset Gedung	Metode Inspeksi Konvensional (Manual)	Metode IoT-Digital Twin SHM	Efisiensi Kerja / Penghematan
Durasi Deteksi Keretakan Struktur	3–5 Hari Kerja	Real-Time (< 5 Detik)	> 99% Akselerasi Waktu
Kebutuhan Tenaga Kerja Lapangan	4–6 Teknisi Ahli	1 Operator <i>Dashboard</i>	Reduksi Pengeluaran SDM
Biaya Operasional Tahunan	Rp120.000.000/Tahun	Rp35.000.000/Tahun	Hemat 70,8% Anggaran
Akurasi Prediksi Sisa Umur Layak	Subjektif	Objektif (<i>Machine Learning</i>)	Mengurangi Variasi Interpretasi

Peningkatan efisiensi operasional tersebut didukung oleh integrasi sensor yang ditempatkan secara langsung pada elemen struktur kritis. Penempatan sensor yang tepat memungkinkan data kondisi struktur diperoleh secara kontinu tanpa memerlukan pembongkaran elemen bangunan atau inspeksi visual yang berulang. Salah satu sensor utama yang digunakan dalam penelitian ini adalah sensor FBG yang ditanam pada elemen beton bertulang. Sensor tersebut berfungsi untuk mengukur regangan internal yang tidak dapat diamati secara langsung dari permukaan struktur. Detail pemasangan sensor FBG pada elemen kolom ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Detail Aksonometri Potongan Struktur Kolom Utama dengan Sensor FBG Tertanam

Gambar 7 memperlihatkan konfigurasi pemasangan sensor FBG pada tulangan utama kolom beton bertulang sebelum proses pengecoran dilakukan. Posisi sensor yang berada di dekat tulangan memungkinkan pengukuran regangan dilakukan secara langsung pada area yang

mengalami transfer gaya internal. Jalur kabel serat optik terlihat terhubung menuju sistem akuisisi data sehingga informasi yang diperoleh dapat dikirimkan secara kontinu ke platform *Digital Twin*. Konfigurasi pemasangan tersebut juga memberikan perlindungan terhadap sensor karena berada di dalam elemen beton yang telah mengeras. Tata letak sensor yang ditunjukkan pada gambar mendukung proses pengumpulan data jangka panjang yang diperlukan dalam sistem pemantauan kesehatan struktur.

E. Rekapitulasi Parameter Keberhasilan Integrasi Sistem SHM

Evaluasi akhir dilakukan dengan merangkum seluruh indikator performa yang diperoleh selama pengujian sistem. Rekapitulasi ini bertujuan untuk memberikan gambaran menyeluruh mengenai tingkat keberhasilan integrasi antara sensor IoT, sistem komunikasi data, model *Digital Twin*, dan mekanisme klasifikasi keamanan yang dikembangkan. Setiap indikator dipilih untuk mewakili aspek utama yang berkaitan dengan akurasi, kecepatan respons, keandalan operasional, dan kesesuaian terhadap regulasi teknis. Nilai yang diperoleh berasal dari hasil pengujian eksperimental yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya. Ringkasan capaian sistem disajikan pada Tabel 8.

Tabel 8 menunjukkan bahwa seluruh indikator utama yang digunakan dalam penelitian ini berada pada tingkat performa yang tinggi. Akurasi geometri model memiliki deviasi rata-rata di bawah 3,15%, yang menunjukkan kedekatan representasi antara objek fisik dan model virtual. Sistem juga mampu memperbarui status struktur dalam waktu kurang dari 1,5 detik setelah terjadinya perubahan kondisi yang terdeteksi oleh sensor. Tingkat ketersediaan data mencapai 99,88%, sehingga proses pemantauan dapat berlangsung hampir tanpa gangguan selama periode operasional. Selain itu, parameter evaluasi yang digunakan dalam penelitian ini disusun dengan mengacu pada ketentuan teknis yang relevan sehingga hasil monitoring dapat diinterpretasikan dalam konteks standar perencanaan dan evaluasi bangunan bertingkat.

Tabel 8. Rekapitulasi Parameter Validasi Kinerja Sistem Integrasi SHM

Indikator Performa Utama	Nilai Capaian Eksperimen	Dampak Praktis bagi Industri Konstruksi 2026
Akurasi Geometri Model Twin	Deviasi rata-rata < 3,15%	Replikasi digital mendekati kondisi aktual
Kecepatan Deteksi Bahaya Gempa	< 1,5 Detik pasca-guncangan	Mendukung respons darurat yang lebih cepat
Ketersediaan Data (<i>Uptime</i>)	99,88% aktif berkelanjutan	Mendukung pemantauan selama 24 jam
Kesesuaian Regulasi Teknis	Memenuhi SNI 1726 dan SNI 2847	Mendukung penerapan pada bangunan bertingkat

V. DISKUSI

Hasil penelitian menunjukkan bahwa integrasi *Digital Twin* dan sensor *IoT* mampu mendukung pemantauan kesehatan struktur gedung bertingkat secara *real-time* dengan tingkat akurasi dan keandalan yang tinggi. Temuan ini menjawab tujuan penelitian yang berfokus pada pengembangan sistem pemantauan yang mampu menghubungkan kondisi fisik bangunan dengan representasi virtual secara berkelanjutan. Tingkat latensi transmisi yang rendah, ketersediaan data mencapai 99,88%, serta kemampuan sistem dalam memperbarui kondisi struktur secara cepat menunjukkan bahwa integrasi yang dikembangkan mampu mengatasi keterbatasan metode inspeksi konvensional yang bersifat periodik.

Hasil tersebut memperkuat temuan [1], [2] yang menyatakan bahwa *Digital Twin* dapat meningkatkan efektivitas pengelolaan infrastruktur melalui sinkronisasi data berkelanjutan. Selain itu, keberhasilan integrasi berbagai protokol komunikasi dan format data ke dalam satu lingkungan *Digital Twin* menunjukkan bahwa pendekatan yang diusulkan mampu mengisi kesenjangan penelitian yang sebelumnya diidentifikasi pada studi [3], [4] terkait penerapan *Digital Twin* yang lebih spesifik pada pemantauan kesehatan struktur gedung bertingkat.

Hasil validasi model menunjukkan bahwa seluruh parameter kinerja struktur memiliki deviasi kurang dari 7% antara hasil simulasi dan pembacaan sensor aktual, yang mengindikasikan tingkat representasi model virtual yang baik terhadap kondisi fisik bangunan. Temuan ini sejalan dengan penelitian [5], [6] yang menunjukkan bahwa integrasi BIM dan *Digital Twin* dapat menghasilkan model pemantauan yang akurat untuk kebutuhan operasional bangunan. Pola distribusi *story drift* yang konsisten antara model komputasi dan data sensor juga mendukung teori dinamika struktur yang dikemukakan oleh [9], [12], bahwa perubahan deformasi dan karakteristik dinamis dapat digunakan sebagai indikator kesehatan struktur.

Namun demikian, deviasi terbesar ditemukan pada parameter simpangan maksimum atap, yang kemungkinan dipengaruhi oleh kontribusi elemen nonstruktural yang tidak sepenuhnya dimodelkan dalam analisis numerik. Temuan ini menunjukkan bahwa meskipun model *Digital Twin* telah memiliki akurasi yang tinggi, representasi perilaku bangunan secara menyeluruh masih dipengaruhi oleh kompleksitas kondisi aktual yang sulit direpresentasikan secara sempurna dalam model komputasi.

Implementasi sistem *threshold alert* berbasis multiparameter pada penelitian ini memberikan kontribusi penting terhadap pengembangan sistem SHMS yang lebih adaptif dan informatif. Hasil tersebut memperluas temuan penelitian [23], [24], [26] yang menekankan pentingnya sensor cerdas dalam pemantauan struktur, namun belum mengintegrasikan mekanisme klasifikasi risiko secara visual pada lingkungan *Digital Twin*. Kemampuan sistem untuk mengidentifikasi kondisi

normal, waspada, dan bahaya secara otomatis memperlihatkan bahwa data sensor tidak hanya berfungsi sebagai alat pengukuran, tetapi juga sebagai dasar pengambilan keputusan operasional. Dari sisi teoritis, penelitian ini memperkuat konsep keterhubungan antara aset fisik dan model virtual sebagaimana dijelaskan oleh [14], [17] melalui integrasi data yang berlangsung secara dinamis. Dari sisi praktis, sistem yang dikembangkan berpotensi meningkatkan keselamatan gedung bertingkat melalui deteksi dini kerusakan dan respons mitigasi yang lebih cepat dibandingkan pendekatan inspeksi manual.

Selain meningkatkan kualitas pemantauan struktur, penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan *Digital Twin* dan sensor *IoT* mampu menghasilkan efisiensi operasional yang signifikan melalui pengurangan waktu deteksi kerusakan, kebutuhan tenaga kerja, dan biaya pemeliharaan tahunan. Temuan ini mendukung penelitian [25] yang menyatakan bahwa integrasi *Digital Twin* dapat meningkatkan efektivitas pengelolaan aset melalui pendekatan *predictive maintenance*.

Meskipun demikian, penelitian ini masih memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan dalam menginterpretasikan hasil yang diperoleh. Objek penelitian menggunakan satu studi kasus bangunan hipotetis dengan konfigurasi struktur tertentu sehingga variasi karakteristik bangunan lain belum sepenuhnya terwakili dalam analisis. Selain itu, pengujian dilakukan berdasarkan skenario simulasi dan data sensor yang terkontrol sehingga pengaruh kondisi lingkungan jangka panjang, degradasi sensor, serta ketidakpastian operasional bangunan nyata belum dapat dievaluasi secara menyeluruh.

VI. KESIMPULAN DAN REKOMENDASI

Penelitian ini berhasil mengembangkan sistem SHMS yang mengintegrasikan sensor *IoT* dan *Digital Twin* untuk pemantauan kesehatan struktur gedung bertingkat secara *real-time*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem yang dikembangkan mampu mempertahankan kualitas transmisi data dengan tingkat latensi rendah, ketersediaan data mencapai 99,88%, serta akurasi representasi model yang ditunjukkan oleh deviasi kurang dari 7% antara hasil simulasi dan data sensor aktual. Implementasi mekanisme *threshold alert* berbasis parameter regangan, simpangan, dan kemiringan struktur memungkinkan identifikasi kondisi bangunan dilakukan secara otomatis dan informatif.

Selain meningkatkan kemampuan deteksi dini terhadap perubahan kondisi struktur, sistem juga memberikan efisiensi operasional yang signifikan melalui pengurangan waktu inspeksi, kebutuhan tenaga kerja, dan biaya pemeliharaan tahunan. Dengan demikian, integrasi *Digital Twin* dan sensor *IoT* terbukti mampu mendukung pengelolaan keselamatan dan pemeliharaan gedung bertingkat secara lebih efektif, akurat, dan berkelanjutan dibandingkan pendekatan inspeksi konvensional.

Penerapan sistem yang dikembangkan pada penelitian ini dapat dipertimbangkan sebagai bagian dari strategi pengelolaan aset gedung bertingkat modern yang membutuhkan pemantauan kondisi struktur secara berkelanjutan. Pengelola bangunan dan praktisi konstruksi disarankan untuk mengintegrasikan teknologi sensor cerdas dan *Digital Twin* guna meningkatkan kualitas pengambilan keputusan berbasis data pada tahap operasional bangunan.

Pengembangan sistem juga dapat diarahkan pada integrasi algoritma *machine learning* yang lebih lanjut untuk meningkatkan kemampuan prediksi kondisi struktur dan estimasi umur layan bangunan. Selain itu, perlu dilakukan pengujian pada berbagai tipe bangunan, kondisi lingkungan, dan skenario pembebanan yang lebih beragam untuk memperluas validitas implementasi sistem. Penguatan aspek keamanan data, interoperabilitas platform, serta integrasi dengan sistem manajemen bangunan lainnya juga penting untuk mendukung penerapan teknologi ini secara lebih luas di sektor konstruksi dan infrastruktur.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. S. Tommy and R. P. Jaya, "Integration of AI and Digital Twin Technology for Smart Infrastructure Management in Urban Cities," *Civ. Eng. Sci. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 45–62, Feb. 2025, doi: 10.51903/t881qw28.
- [2] M. Syafril, S. Arief, and J. D. Pangaribuan, "Application of Digital Twin Technology for Real-Time Monitoring and Predictive Maintenance of Coastal Bridges under Climate Change Scenarios," *J. Rekayasa Sipil dan Arsit.*, vol. 1, no. 2, pp. 39–51, Mar. 2025, doi: 10.51903/5fkqb467.
- [3] F. Hodavand, I. J. Ramaji, and N. Sadeghi, "Digital Twin for Fault Detection and Diagnosis of Building Operations: A Systematic Review," *Buildings*, vol. 13, no. 6, p. 1426, 2023, doi: 10.3390/buildings13061426.
- [4] H. Omrany, A. Mehdipour, and D. Oteng, "Digital Twin Technology and Social Sustainability: Implications for the Construction Industry," *Sustainability*, vol. 16, no. 19, p. 8663, 2024, doi: 10.3390/su16198663.
- [5] F. Iqbal and S. Mirzabeigi, "Digital Twin-Enabled Building Information Modeling–Internet of Things (BIM-IoT) Framework for Optimizing Indoor Thermal Comfort Using Machine Learning," *Buildings*, vol. 15, no. 10, p. 1584, 2025, doi: 10.3390/buildings15101584.
- [6] S.-W. Yang, Y. Lee, and S.-A. Kim, "Design and Validation of a Real-Time Maintenance Monitoring System Using BIM and Digital Twin Integration," *Buildings*, vol. 15, no. 8, p. 1312, 2025, doi: 10.3390/buildings15081312.
- [7] S. Adibi, A. Rajabifard, D. Shojaei, and N. Wickramasinghe, "Enhancing Healthcare through Sensor-Enabled Digital Twins in Smart Environments: A Comprehensive Analysis," *Sensors*, vol. 24, no. 9, p. 2793, 2024, doi: 10.3390/s24092793.

- [8] J. Paredes, W. Ramirez, F. Pico, R. Acosta, O. G. Toapanta, and M. Mayacela, "Impact of Structural Stiffness on Vibration Periods of Concrete Buildings: A Systematic Review," *Materials (Basel)*, vol. 18, no. 11, p. 2612, 2025, doi: 10.3390/ma18112612.
- [9] M. G. Guler and K. Guler, "The Effect of Story Drifts in Determining the Earthquake Performance of High-Rise Buildings," *Buildings*, vol. 14, no. 12, p. 3830, 2024, doi: 10.3390/buildings14123830.
- [10] P. R. Yupanqui, J. L. Orihuela, and R. M. Delgadillo, "Hybrid AI-FEA Framework for Seismic Assessment of Confined Masonry Walls Using Crack Image-Based Material Property Inference," *Infrastructures*, vol. 10, no. 12, p. 323, 2025, doi: 10.3390/infrastructures10120323.
- [11] J. Pan *et al.*, "Experimental Study on Dynamic Response Characteristics of Rural Residential Buildings Subjected to Blast-Induced Vibrations," *Buildings*, vol. 15, no. 14, p. 2511, 2025, doi: 10.3390/buildings15142511.
- [12] A. Keshmiry, S. Hassani, M. Mousavi, and U. Dackermann, "Effects of Environmental and Operational Conditions on Structural Health Monitoring and Non-Destructive Testing: A Systematic Review," *Buildings*, vol. 13, no. 4, p. 918, 2023, doi: 10.3390/buildings13040918.
- [13] Kamel and Sellaoui, "Multisensory Interior Design Interventions To Reduce Stress In High-Intensity Healthcare Settings," *Int. J. Graph. Des.*, vol. 3, no. 2, pp. 295–312, Oct. 2025, doi: 10.51903/ijgd.v3i2.3102.
- [14] T. D. Nguyen and S. Adhikari, "The Role of BIM in Integrating Digital Twin in Building Construction: A Literature Review," *Sustainability*, vol. 15, no. 13, p. 10462, 2023, doi: 10.3390/su151310462.
- [15] G. Stavropoulos, J. Violos, S. Tsanakas, and A. Leivadreas, "Enabling Artificial Intelligent Virtual Sensors in an IoT Environment," *Sensors*, vol. 23, no. 3, p. 1328, 2023, doi: 10.3390/s23031328.
- [16] E. Candón Fernández, A. Crespo Márquez, A. J. G. López, and E. H. Fort, "Framework for Asset Digitalization: IoT Platforms and Asset Health Index in Maintenance Applications," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 3, p. 1524, 2025, doi: 10.3390/app15031524.
- [17] O. Hakimi, H. Liu, O. Abudayyeh, A. Houshyar, M. Almatared, and A. Alhawiti, "Data Fusion for Smart Civil Infrastructure Management: A Conceptual Digital Twin Framework," *Buildings*, vol. 13, no. 11, p. 2725, 2023, doi: 10.3390/buildings13112725.
- [18] D. Yu and C. Fang, "Urban Remote Sensing with Spatial Big Data: A Review and Renewed Perspective of Urban Studies in Recent Decades," *Remote Sens.*, vol. 15, no. 5, p. 1307, 2023, doi: 10.3390/rs15051307.
- [19] R. Çekik and A. Turan, "Deep Learning for Anomaly Detection in CNC Machine Vibration Data: A RoughLSTM-Based Approach," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 6, p. 3179, 2025, doi: 10.3390/app15063179.

- [20] X. Sun, S. Ilanko, Y. Mochida, and R. C. Tighe, "A Review on Vibration-Based Damage Detection Methods for Civil Structures," *Vibration*, vol. 6, no. 4, pp. 843–875, 2023, doi: 10.3390/vibration6040051.
- [21] S. Hassani and U. Dackermann, "A Systematic Review of Optimization Algorithms for Structural Health Monitoring and Optimal Sensor Placement," *Sensors*, vol. 23, no. 6, p. 3293, 2023, doi: 10.3390/s23063293.
- [22] V. Giannuzzi and F. Fatiguso, "Historic Built Environment Assessment and Management by Deep Learning Techniques: A Scoping Review," *Appl. Sci.*, vol. 14, no. 16, p. 7116, 2024, doi: 10.3390/app14167116.
- [23] Z. Sun, M. Mahmoodian, A. Sidiq, S. Jayasinghe, F. Shahrivar, and S. Setunge, "Optimal Sensor Placement for Structural Health Monitoring: A Comprehensive Review," *J. Sens. Actuator Networks*, vol. 14, no. 2, p. 22, 2025, doi: 10.3390/jsan14020022.
- [24] Y. Yang, W. Xu, Z. Gao, Z. Yu, and Y. Zhang, "Research Progress of SHM System for Super High-Rise Buildings Based on Wireless Sensor Network and Cloud Platform," *Remote Sens.*, vol. 15, no. 6, p. 1473, 2023, doi: 10.3390/rs15061473.
- [25] I. Abdullahi, S. Longo, and M. Samie, "Towards a Distributed Digital Twin Framework for Predictive Maintenance in Industrial Internet of Things (IIoT)," *Sensors*, vol. 24, no. 8, p. 2663, 2024, doi: 10.3390/s24082663.
- [26] Z. Liu, "Smart Sensors for Structural Health Monitoring and Nondestructive Evaluation," *Sensors*, vol. 24, no. 2, p. 603, 2024, doi: 10.3390/s24020603.
- [27] A. Sivasuriyan, D. S. Vijayan, A. Piętocha, W. Górski, Ł. Wodzyński, and E. Koda, "Advanced Sensing and Digital Monitoring Technologies for Structural Health Assessment of Civil Infrastructure," *Buildings*, vol. 16, no. 3, p. 656, 2026, doi: 10.3390/buildings16030656.