



Rancangan Sistem Pemantauan Struktur Terintegrasi Berbasis Sensor Pada Tahap Konstruksi Gedung Bertingkat

Arnold Santoso¹ Yongki Alexander Tanne²

¹ Department of Smart Construction and Civil Engineering, Calvin Institute of Technology
Corresponding: asantoso85@students.calvin.ac.id

SUBMITTED 26 DESEMBER 2025 REVISED 25 FEBRUARI 2026 ACCEPTED 25 FEBRUARI 2026

ABSTRACT

The construction of high-rise buildings involves a high level of structural risk, particularly during the construction phase when structural elements have not yet reached their design capacity and are still subjected to significant temporary loads. Current supervision practices that rely primarily on visual inspections and conventional methods are considered insufficient for detecting changes in structural behavior in an early and objective manner. This study aims to design an integrated structural monitoring system capable of connecting various types of sensors and generating real-time data to support continuous monitoring and an early warning mechanism. The research method employed is a systematic literature review of recent studies related to structural health monitoring, sensor technologies, and Internet of Things (IoT)-based systems. Based on the review results, an integrated monitoring system architecture, system workflow, and sensor placement strategy for major structural elements and critical areas of the building are developed. The results indicate that the proposed IoT-based system is able to comprehensively represent structural behavior, support early detection of potential risks or initial indications of structural failure, and serve as an initial reference for the development of more reliable and applicable structural monitoring systems. The novelty of this study lies in the integration of a monitoring system, sensor placement strategy, and a real-time data-based early warning mechanism during the construction phase. The limitation of this study is that the system has not yet been tested in real field conditions and therefore requires further validation.

Keywords: structural monitoring, integrated sensors, IoT, high-rise buildings, construction

ABSTRAK

Pembangunan gedung bertingkat pada tahap konstruksi memiliki tingkat risiko struktural yang tinggi karena elemen bangunan belum sepenuhnya mencapai kapasitas rencana dan masih menerima beban sementara yang signifikan. Praktik pengawasan yang masih mengandalkan inspeksi visual dan metode konvensional dinilai kurang efektif dalam mendeteksi perubahan perilaku struktur secara dini dan objektif. Penelitian ini bertujuan merancang sistem pemantauan struktur terintegrasi yang mampu menghubungkan berbagai jenis sensor dan menghasilkan data secara *real-time* untuk mendukung pemantauan berkelanjutan dan mekanisme peringatan dini. Metode penelitian yang digunakan adalah studi literatur sistematis terhadap penelitian terkini terkait *structural health monitoring*, teknologi sensor, dan sistem berbasis *Internet of Things* (IoT). Berdasarkan hasil kajian tersebut, disusun arsitektur sistem pemantauan terintegrasi, alur sistem, serta strategi penempatan sensor pada elemen-elemen struktur utama dan area kritis bangunan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa sistem berbasis IoT yang dirancang mampu merepresentasikan perilaku struktur secara komprehensif, mendukung deteksi dini potensi risiko atau indikasi awal kegagalan struktur, serta menjadi rujukan awal bagi pengembangan sistem pemantauan struktur yang lebih andal dan aplikatif. Kebaruan penelitian ini terletak pada integrasi sistem pemantauan, penentuan lokasi sensor, dan peringatan dini berbasis data *real-time* pada tahap konstruksi. Keterbatasannya, sistem ini belum diuji secara langsung di lapangan sehingga masih memerlukan validasi lebih lanjut.

Kata Kunci: pemantauan struktur, sensor terintegrasi, IoT, gedung bertingkat, konstruksi



1. PENDAHULUAN

Indonesia mengalami peningkatan signifikan dalam pembangunan seiring dengan pertumbuhan ekonomi, laju urbanisasi, serta keterbatasan lahan di kawasan perkotaan. Kebutuhan akan ruang fungsional seperti perkantoran, apartemen, pusat komersial, dan fasilitas publik mendorong pengembangan kota secara vertikal, terutama di wilayah Jabodetabek. Hingga tahun 2025, tercatat lebih dari 150 gedung bertingkat (dengan ketinggian di atas 150 meter) telah berdiri dan puluhan proyek lainnya yang berada dalam tahap konstruksi aktif (Groklopedia, 2025). Tren ini menunjukkan pembangunan vertikal telah menjadi strategi utama dalam menjawab tekanan ruang yang padat, sekaligus menandai kompleksitas dan skala proyek konstruksi di Indonesia.

Konstruksi gedung bertingkat membawa risiko kegagalan struktur yang lebih tinggi dibandingkan dengan bangunan sederhana karena kombinasi faktor teknis dan lingkungan kerja. Sistem struktur yang kompleks, interaksi fondasi, serta penggunaan struktur penopang sementara dapat menambah potensi terjadinya deformasi atau kolaps parsial. Selain itu, beberapa aktivitas seperti pemasangan perancah, *bekisting*, maupun pengecoran beton juga mengindikasikan beberapa potensi risiko karena berhubungan langsung dengan stabilitas struktur dan keselamatan pekerja (Deanggi, 2025). Kondisi ini semakin berisiko terutama di kawasan perkotaan, karena setiap kegagalan struktur tidak hanya membahayakan pekerja, tetapi juga dapat menimbulkan efek domino terhadap bangunan itu sendiri maupun infrastruktur di sekitarnya (Wang et al., 2014).

Keruntuhan struktur selama fase konstruksi menimbulkan kerugian finansial yang besar dan bersifat sistemis. Dalam kasus keruntuhan, kerugian ekonomi meningkat secara eksponensial karena mencangkup pembangunan ulang, pembongkaran sisa struktur, tuntutan hukum, dan penanganan dampak lanjutan (Emekoma, 2019). Tingginya risiko tersebut tercermin dari data BPJS Ketenagakerjaan tahun 2022 yang mencatat lebih dari 297.725 kasus kecelakaan kerja, dengan sektor konstruksi sebagai salah satu penyumbangannya (BPJS Ketenagakerjaan, 2022). Namun, angka kecelakaan tersebut hanya menggambarkan dampak langsung terhadap tenaga kerja, sementara konsekuensi sebenarnya mencakup spektrum yang lebih luas, seperti gangguan terhadap utilitas publik, terhambatnya sistem dan jalur transportasi, serta timbulnya dampak sosial dan ekonomi yang signifikan bagi lingkungan di sekitar proyek. Kerugian semacam ini memperlihatkan bahwa kegagalan struktur bukan sekadar persoalan keselamatan kerja, melainkan masalah ekonomi makro yang menuntut pengendalian risiko secara sistematis dan andal sejak tahap pelaksanaan.

Banyak tragedi konstruksi dunia juga turut memperkuat urgensi pemantauan yang lebih modern. Salah satu kasus penting adalah runtuhnya gedung L'Ambiance Plaza di Bridgeport, Connecticut pada tahun 1987, yang menewaskan 28 pekerja akibat kegagalan sistem sementara yang tidak terdeteksi (Martin & Delatte, 2000). Pergeseran kecil pada penopang yang tidak terpantau memicu runtuhnya seluruh elemen lantai dan menunjukkan bahwa inspeksi visual serta laporan manual sering kali tidak cukup mendeteksi gejala awal ketidakstabilan seperti retakan mikro, deformasi kecil, atau peningkatan getaran (Agdas et al., 2016). Kondisi serupa berpotensi untuk dijumpai di proyek gedung bertingkat di Indonesia yang cenderung bergantung pada inspeksi konvensional yang bersifat subjektif.

Selain itu, sistem pemantauan modern menjadi krusial di Indonesia dengan tingkat kerawanan bencana alam yang tinggi, khususnya gempa bumi. Indonesia berada pada pertemuan beberapa lempeng tektonik sehingga aktivitas seismik terjadi secara berulang dan sulit diprediksi. Getaran gempa yang terjadi selama fase konstruksi dapat memicu perubahan perilaku struktur secara tiba-tiba, seperti peningkatan deformasi, pergeseran elemen sementara, atau redistribusi gaya internal yang tidak terantisipasi (Sharma et al., 2025). Tanpa sistem pemantauan struktur secara *real time*, gejala awal ketidakstabilan akibat beban dinamis bencana alam berpotensi terlewatkan hingga berujung pada kegagalan yang lebih serius.

Melihat hal tersebut, banyak negara maju telah menerapkan sistem berbasis IoT dan sensor otomatis dengan tingkat keandalan tinggi, sementara penerapannya di Indonesia masih relatif terbatas (Rahita et al., 2024). Kesenjangan ini tidak hanya mencerminkan perbedaan tingkat adopsi teknologi, tetapi juga menunjukkan kebutuhan mendesak akan pendekatan pemantauan struktur yang lebih sistematis dan berbasis data. Kondisi ini menunjukkan bahwa pengembangan teknologi pemantauan menjadi semakin penting untuk mendorong sistem keselamatan konstruksi yang lebih modern, efisien, dan responsif. Selain itu, hasil penelitian ini juga berpotensi dalam pembentukan standar baru untuk manajemen risiko konstruksi melalui penerapan sistem peringatan dini berbasis sensor terintegrasi yang memungkinkan pemantauan berkelanjutan dan dapat mengurangi risiko keruntuhan sejak tahap awal.

Berdasarkan kebutuhan tersebut, diperlukan suatu sistem pemantauan struktur terintegrasi yang mampu bekerja secara *real time* dengan menggabungkan berbagai jenis sensor seperti *accelerometer*, *strain gauge*, *inclinometer*, dan *crack meter* dalam satu sistem yang saling melengkapi. Integrasi ini memungkinkan data dari berbagai sensor diproses secara otomatis sehingga menghasilkan gambaran kondisi struktural yang lebih menyeluruh dan presisi. Dengan pendekatan ini, deteksi dini terhadap perubahan perilaku struktur dapat dilakukan lebih efektif, memberikan dasar pengambilan keputusan yang lebih tepat selama proses konstruksi, serta meningkatkan keandalan pengawasan lapangan. Pada akhirnya, sistem semacam ini berpotensi untuk memperkuat keselamatan konstruksi dan mendukung tercapainya standar modern yang menuntut respons cepat, akurat, dan berbasis data.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa sistem pemantauan struktur berbasis sensor dan IoT mampu menyediakan data real-time serta membantu mendeteksi potensi kerusakan lebih dini. Namun, sebagian besar penelitian masih berfokus pada akurasi sensor dan sistem komunikasi, tanpa mengaitkan hasilnya dengan kondisi keamanan bangunan di lapangan. Selain itu, penerapan pada tahap konstruksi gedung bertingkat masih terbatas, padahal memiliki risiko yang cukup tinggi. Penentuan lokasi pemasangan sensor juga belum banyak dibahas secara jelas. Lebih lanjut, data yang diperoleh sering kali hanya disimpan tanpa diolah secara otomatis, sehingga tidak dimanfaatkan sebagai dasar pengambilan keputusan untuk keselamatan bangunan.

Dengan demikian, penelitian ini bertujuan merancang sistem pemantauan struktur terintegrasi yang mampu menghubungkan berbagai jenis sensor dan menghasilkan data secara *real-time*. Sistem ini dirancang untuk membangun mekanisme peringatan dini (*early warning system*) dan *monitoring* yang dapat mendeteksi potensi risiko atau kegagalan struktur secara cepat dan tepat. Ruang

lingkup penelitian dibatasi pada perancangan sistem integrasi dalam satu sistem pemantauan, penyusunan alur atau diagram sistem, serta penentuan lokasi penempatan sensor pada elemen-elemen struktur utama dan area kritis bangunan guna memastikan pemantauan yang efektif. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan awal dalam pengembangan sistem pemantauan struktur yang lebih andal dan aplikatif.

2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Komponen Gedung Bertingkat

a. Kolom (*Column*)

Kolom berfungsi sebagai elemen vertikal utama yang memikul beban serta membantu menahan beban lateral untuk menjaga kestabilan struktur. Kolom bekerja dengan menyalurkan beban ke fondasi dan ditempatkan pada titik-titik strategis seperti sudut, tepi, dan area tengah bangunan agar distribusi beban merata (Tampanguma et al., 2023). Bentuk penampang serta proporsi tulangan turut memengaruhi kekakuan dan perilaku kolom saat menerima kombinasi beban (Mirza et al., 2021). Dalam praktik desain, kolom umumnya direncanakan berdasarkan standar struktural seperti SNI 2847:2019 untuk beton bertulang dan SNI 1726:2019 untuk ketahanan gempa yang mengatur persyaratan kekuatan, penulangan, dan kinerja kolom (Mantasa, 2019).

b. Balok (*Beams*)

Balok merupakan elemen struktur horizontal yang berfungsi memindahkan beban dari pelat lantai menuju kolom serta menjaga kekakuan rangka bangunan. Secara umum balok menahan momen lentur dan gaya geser yang timbul dari beban hidup maupun beban mati sehingga perlu diperhatikan kekuatan dan lendutan berada dalam batas aman (Nurliana & Walujodjati, 2024). Selain itu, variasi bentuk penampang dan jumlah tulangan dapat memengaruhi kekakuan balok serta distribusi beban pada struktur secara keseluruhan (Sudarsana et al., 2023). Sambungan balok dan kolom juga menjadi bagian penting dalam gedung bertingkat karena harus dirancang agar tetap mampu menahan gaya lateral tanpa mengalami kerusakan berlebih.

c. Pelat (*Slab*)

Pelat merupakan elemen struktur datar yang berfungsi menahan beban hidup dan beban mati pada lantai kemudian meneruskannya ke balok atau langsung ke kolom tergantung sistem struktur yang digunakan. Pelat bekerja terutama dalam menahan lentur dan dapat dirancang sebagai pelat satu arah atau dua arah sesuai arah distribusi beban serta kondisi tumpuannya (Sudarsana et al., 2023). Penelitian menunjukkan bahwa ketebalan pelat, mutu beton, dan konfigurasi tulangan sangat memengaruhi kekakuan dan kemampuan pelat menahan lendutan sehingga perencanaan harus mengikuti batasan defleksi yang disyaratkan standar (Sudarsana et al., 2023).

d. Fondasi (*Foundation*)

Fondasi pada gedung bertingkat tinggi umumnya menggunakan fondasi dalam seperti tiang pancang atau *bore pile* untuk menyalurkan beban besar ke lapisan tanah yang lebih stabil di kedalaman, karena daya dukung permukaan tanah tidak cukup (Fiendyo et al., 2025). Dalam perencanaan fondasi tersebut, interaksi struktur-tanah (*soil-structure interaction*) sangat diperhitungkan agar bisa menjaga stabilitas gempa sekaligus menghindari penurunan berlebih (Fiendyo et al., 2025).

e. Elemen sementara (*Shoring*)

Shoring berfungsi sebagai elemen sementara yang digunakan untuk menopang struktur yang belum mencapai kekuatan rencana. Sistem ini diperlukan untuk menahan beban konstruksi, termasuk berat sendiri, beban pekerja, serta peralatan yang bekerja di atasnya. Selain itu, *shoring* penting untuk menjaga kestabilan lokal struktur sementara, terutama ketika pelepasan *bekisting* yang dilakukan bertahap sehingga sebagian beban masih dialihkan melalui sistem penopang (Arisyi et al., 2024). Studi menunjukkan bahwa pemilihan sistem *shoring* dilakukan untuk memastikan distribusi beban sementara berlangsung aman dan agar tahapan pengecoran dapat dilakukan tanpa risiko keruntuhan akibat kekuatan beton yang belum mencukupi (Arisyi et al., 2024).

2.2 Komponen Sensor

a. *Accelerometer*

Accelerometer memanfaatkan massa inersia yang menekan elemen piezoelektrik sehingga menghasilkan muatan listrik yang sebanding dengan percepatan yang terjadi (Wu et al., 2023). Sensor ini memiliki keunggulan seperti rentang frekuensi luas, sensitivitas tinggi, ukuran kecil, tidak memiliki komponen bergerak, serta tingkat *cross-sensitivity* rendah, sehingga sangat sesuai untuk memantau kondisi dinamis struktur (Gupalov et al., 2018).

b. *Strain Gauge*

Strain gauge memiliki kemampuan untuk mendeteksi regangan langsung pada elemen bangunan. *Strain gauge* konvensional banyak digunakan karena akurasinya yang tinggi, kemudahan instalasi, serta kestabilannya dalam memonitor perubahan regangan kecil pada beton maupun baja (Clauß et al., 2021). Pada sisi lain, pengembangan *strain gauge* dengan lapisan *film*-tipis dengan material PtRh6 dan struktur isolasi beberapa lapis memungkinkan sensor ini beroperasi pada kondisi konstruksi yang memiliki fluktuasi termal ekstrem (Cui et al., 2022). Selain itu, sensor *strain gauge* yang berbasis *piezoresistif* seperti *carbon black* juga menunjukkan respons regangan yang stabil dan tetap akurat meskipun mengalami pembebanan berulang serta fluktuasi lingkungan (Kimpfbeck et al., 2025).

c. *Inclinometer MEMS*

Inclinometer mendeteksi perubahan orientasi kecil pada elemen struktur sehingga pergeseran lateral yang tidak terlihat dapat dipantau dengan lebih akurat. *Inclinometer* dapat bekerja dengan tetap stabil di lingkungan konstruksi

yang dinamis, termasuk variasi temperatur, getaran, dan perubahan beban (Ha et al., 2013). Sensor ini juga dapat dilengkapi dengan sistem pemantauan modern yang dapat meningkatkan presisi pemantauan jangka panjang dan terintegrasi sehingga memungkinkan deteksi dini terhadap indikasi ketidakstabilan struktural (Zhu et al., 2020)

d. *Crack meter*

Crack meter bekerja dengan menangkap perubahan kecil pada bukaan atau pergeseran retakan melalui elemen pengukurnya, di mana variasi gerakan tersebut kemudian diterjemahkan menjadi perubahan sinyal yang menunjukkan intensitas perkembangan retak pada struktur (Taher et al., 2022). Sensor ini sangat efektif dalam membedakan perubahan retak yang bersifat progresif dari fluktuasi kecil yang terjadi selama aktivitas konstruksi, sehingga memberikan gambaran yang lebih jelas tentang apakah suatu retakan menunjukkan indikasi kerusakan yang perlu diwaspadai (Taher et al., 2022). Studi terkini juga menunjukkan bahwa sensor pemantauan retak modern mampu mendeteksi perubahan skala mikro serta memetakan pola retak secara lebih akurat, sehingga informasi yang dihasilkan dapat digunakan untuk mengidentifikasi potensi kegagalan elemen struktural sebelum mencapai kondisi yang mengancam keselamatan (Ran et al., 2024).

2.3 Penerapan Sensor Terintegrasi Berbasis Teknologi

Dalam perkembangan SHM (*structural health monitoring*), banyak penelitian menekankan penggunaan berbagai sensor terintegrasi untuk mengukur parameter struktural penting seperti getaran, regangan, akselerasi, dan pergerakan. Sistem SHM modern tidak bergantung pada inspeksi manual periodik, tetapi menggunakan sensor yang terhubung secara kontinu untuk mendeteksi perubahan struktur secara *real-time*, yang memungkinkan identifikasi dan prediksi performa struktural dengan akurasi tinggi (Mishra et al., 2022). Sensor-sensor tersebut dihubungkan dalam jaringan *wireless sensor networks* yang mampu menangkap data dari titik-titik strategis struktur dan mengirimkan ke unit pengolahan untuk di analisis. Hal ini membuat sistem ini mengurangi kebutuhan pemeriksaan manual dan meningkatkan efektivitas *monitoring* pada infrastruktur sipil seperti jembatan dan gedung (Mishra et al., 2022).

Integrasi sensor terintegrasi dengan teknologi *Internet of Things* (IoT) telah menjadi tema utama dalam SHM terbaru. Penerapan sensor berbasis IoT memungkinkan pengiriman data nirkabel langsung ke platform cloud atau sistem basis data *real-time*, memfasilitasi pemantauan jarak jauh dan analisis lanjutan tanpa keterbatasan lokasi pengamatan (Bhatta & Dang, 2024). Pendekatan ini memungkinkan penggabungan berbagai jenis sensor dalam satu sistem terpadu yang saling melengkapi untuk menangkap respons struktur secara lebih komprehensif. Hal tersebut juga mampu meningkatkan reliabilitas data karena anomali struktural dapat dikonfirmasi melalui korelasi antar parameter pengukuran (Bhatta & Dang, 2024). Dengan kemampuan akuisisi data otomatis dan respons cepat terhadap perubahan kondisi struktur, sistem berbasis IoT dinilai lebih efektif dalam mendukung pengambilan keputusan teknis selama fase konstruksi maupun operasional.

Selain itu, beberapa literatur juga menunjukkan tren integrasi sensor terintegrasi dengan teknologi komputasi dan algoritma untuk meningkatkan kualitas data dan keputusan. Sensor seperti akselerometer, *strain gauge*, serta sensor khusus lain yang tergabung dalam satu sistem bisa memanfaatkan *machine learning* atau analisis lanjutan untuk mengevaluasi pola getaran dan anomali struktural secara efisien (Maulana et al., 2024). Pemrosesan data secara terpusat memungkinkan identifikasi pola respons struktural dan deteksi anomali sejak tahap awal sebelum berkembang menjadi kerusakan signifikan. Pendekatan ini dinilai efektif dalam meningkatkan akurasi evaluasi kondisi struktur sekaligus mendukung penerapan sistem peringatan dini berbasis data yang lebih andal.

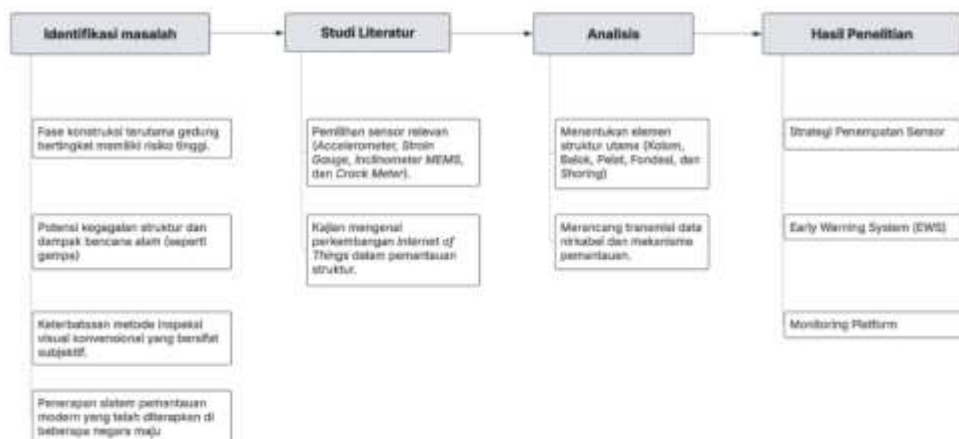
3. METODOLOGI

3.1 Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur yang berfokus pada kajian sistematis terhadap berbagai publikasi ilmiah terkait penerapan sensor terintegrasi dan perkembangan teknologi pemantauan struktur. Literatur yang dianalisis mencakup penelitian terkini mengenai jenis sensor, sistem integrasi, serta pendekatan teknologi yang digunakan dalam pemantauan struktur, sehingga memberikan gambaran komprehensif mengenai arah dan capaian penelitian yang telah dilakukan. Berdasarkan hasil kajian tersebut, dilakukan analisis untuk mengidentifikasi *research gap* yang masih terbatas dibahas atau belum dieksplorasi secara mendalam dalam penelitian sebelumnya (Febrianto et al., 2024). Temuan dari analisis ini kemudian digunakan sebagai landasan konseptual dalam merumuskan kebutuhan sistem, susunan alur sistem, serta kontribusi ilmiah yang diharapkan dari studi ini.

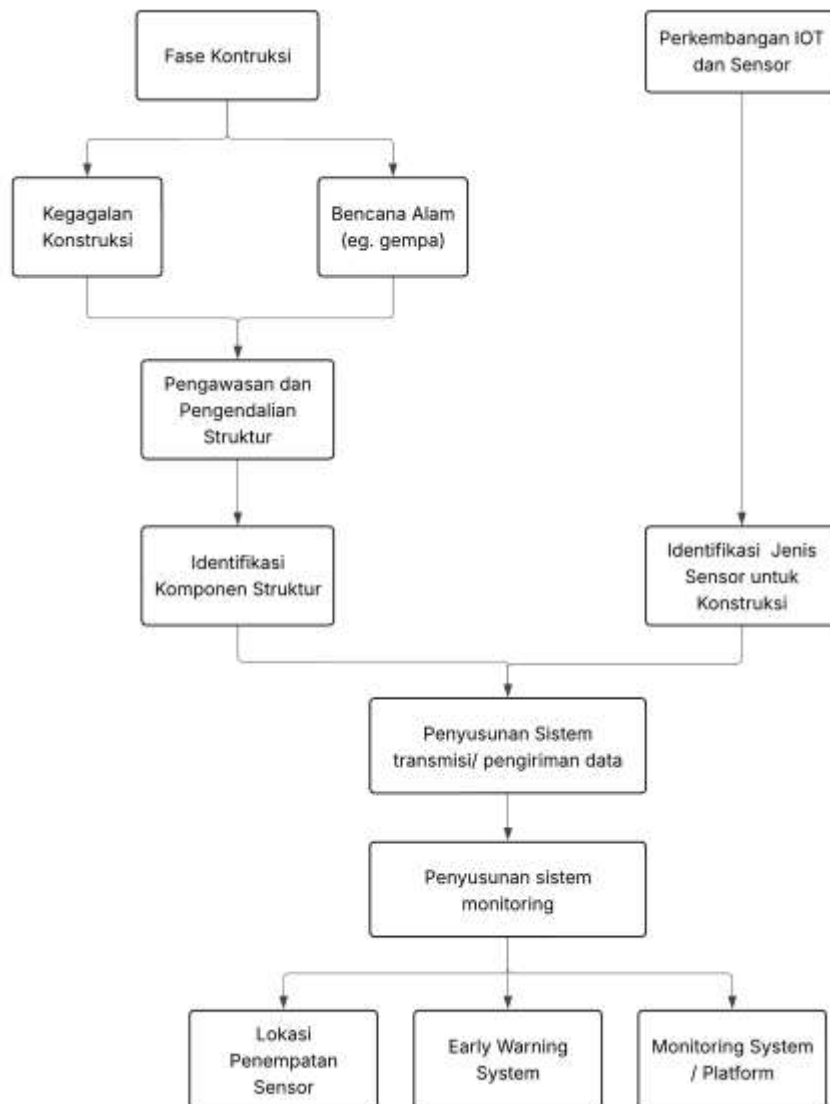
3.2 Alur Penelitian

Berikut adalah diagram yang menjelaskan framework diagram ilmiah dalam penelitian ini:



Gambar 1. *Frame work* diagram ilmiah
 Sumber : Data Penelitian, 2025

Tahapan atau langkah- langkah penelitian dapat ditinjau melalui diagram penelitian berikut.



Gambar 2. Bagan Alur Penelitian

Sumber : Data Penelitian, 2025

3.3 Teknik Analisis

Dalam teknik analisis yang digunakan, fokus pertama diarahkan pada penempatan sensor dalam sistem pemantauan struktur terintegrasi. Analisis ini dilakukan dengan meninjau literatur yang membahas hubungan antara perilaku struktur, komponen kritis bangunan, dan parameter yang perlu dipantau, sehingga penempatan sensor dapat merepresentasikan kondisi struktural secara efektif. Penempatan sensor dianalisis berdasarkan fungsi elemen struktur, potensi konsentrasi tegangan, serta area yang rentan terhadap deformasi, getaran, atau pergeseran selama fase konstruksi. Pendekatan ini bertujuan memastikan bahwa

sistem ini mampu menangkap perubahan perilaku struktur secara akurat tanpa penggunaan sensor yang berlebihan atau tidak efisien.

Aspek kedua adalah *feasibility system*, yang mencakup kelayakan penerapan sistem pemantauan dari berbagai aspek. Analisis kelayakan tidak hanya mempertimbangkan aspek ekonomi, tetapi juga kelayakan teknis, operasional, dan integrasi sistem. Kelayakan teknis dianalisis dari kemampuan sensor dan sistem yang bekerja secara *real-time*, sementara kelayakan operasional meninjau kemudahan pemasangan, pemeliharaan, dan pemanfaatan sistem oleh pengguna di lapangan. Pendekatan ini memastikan bahwa sistem yang dirancang tidak hanya layak secara konsep, tetapi juga realistis untuk proyek konstruksi gedung bertingkat.

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Bagian ini menyajikan analisis dan pembahasan mengenai perancangan sistem pemantauan struktur terintegrasi pada gedung bertingkat selama tahap konstruksi. Uraian mencakup arsitektur sistem berbasis IoT, integrasi berbagai sensor, serta alur pemrosesan data untuk mendukung pemantauan *real-time* dan peringatan dini. Selain itu, dibahas strategi penempatan sensor pada elemen struktur utama dan area kritis bangunan, serta evaluasi kelayakan penerapan sistem ditinjau dari aspek teknis dan operasional untuk memastikan efektivitas pemantauan.

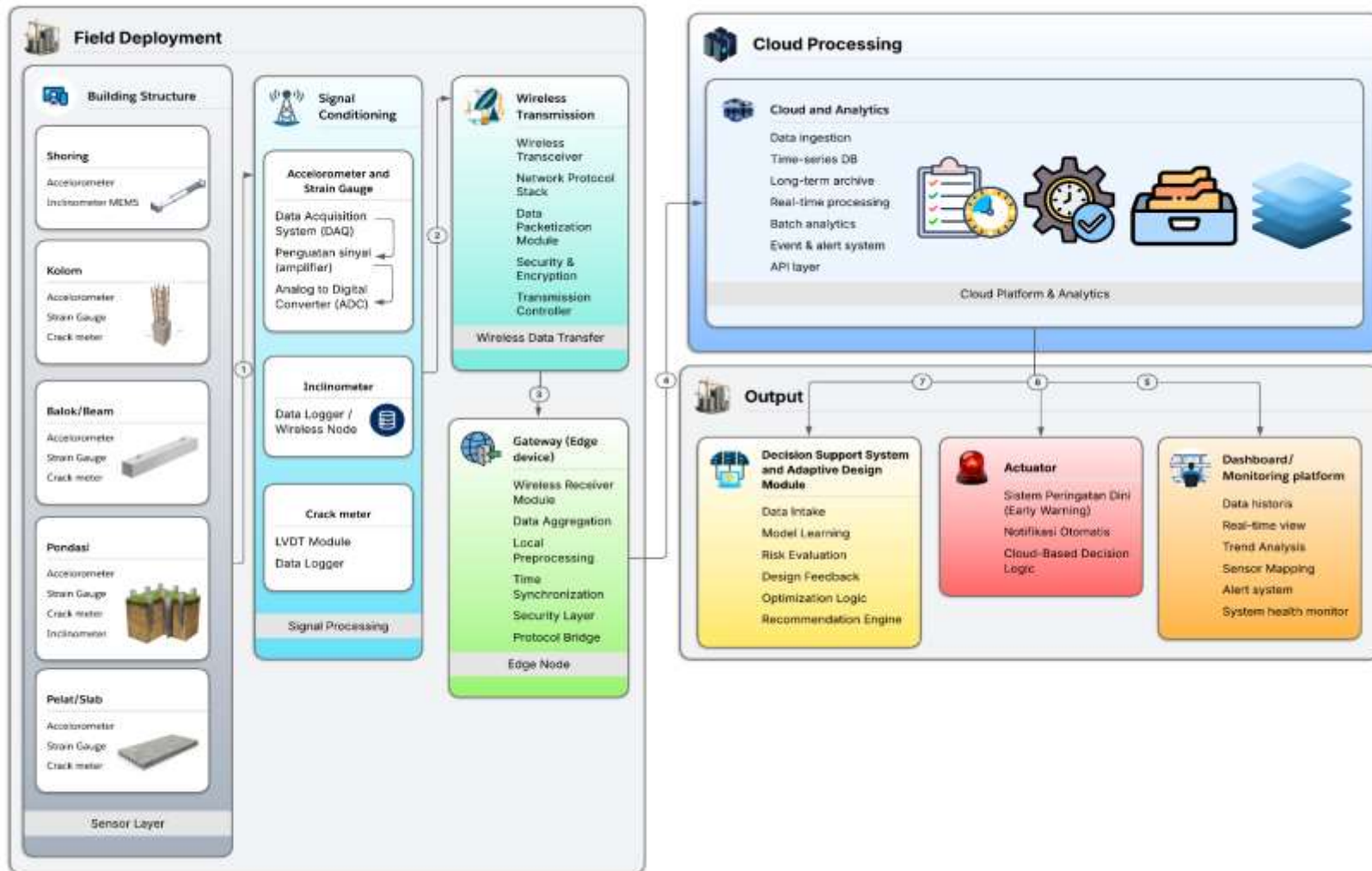
4.1 Sistem Pemantauan Struktur Terintegrasi Berbasis IoT

Tabel 1. Penjelasan Komponen Diagram Arsitektur

Komponen	Fungsi	Input	Output/Data
<i>Accelerometer</i>	Mendeteksi percepatan dengan membaca perubahan deformasi massa internal (Wu et al., 2023).	Percepatan mekanis dalam sumbu tertentu.	Data percepatan (m/s^2 atau g).
<i>Strain gauge</i>	Memantau regangan lokal pada permukaan struktur (Clauß et al., 2021).	Perubahan regangan	Perubahan resistansi dikonversi menjadi regangan.
<i>Inclinometer MEMS</i>	Mendeteksi perubahan sudut, kemiringan, atau rotasi struktur atau tanah (Zhu et al., 2020)	Sudut kemiringan atau gerakan rotasi kecil pada struktur	Data orientasi atau kemiringan dalam satuan derajat atau radian.
<i>Crack meter</i>	Memantau perkembangan retak dengan membaca perubahan jarak antara dua titik (Taher et al., 2022).	Perubahan jarak antar pelat/poin pengukuran pada area retak.	<i>Displacement</i> /lebar retak dalam satuan mm atau μm .
<i>Data Acquisition System (DAS)</i>	Mengumpulkan, mengelola, dan menyinkronkan sinyal dari berbagai sensor (Smith, 2022).	Sinyal analog dari sensor.	Data yang terstruktur dan selaras
<i>Amplifier</i>	Menguatkan sinyal sensor yang rendah agar dapat dibaca oleh ADC atau DAS (S1 Teknik Elektro, 2024).	Sinyal analog beramplitudo rendah	Sinyal analog dengan amplitudo lebih besar



<i>ADC (Analog to Digital Converter)</i>	Mengonversi sinyal analog menjadi data digital sehingga dapat diproses komputer (Smith, 2025).	Sinyal analog yang telah diperkuat	Representasi digital dalam bentuk angka biner
<i>Data Logger</i>	Merekam data sensor secara otomatis dalam jangka panjang untuk memastikan tidak ada data hilang saat tidak ada koneksi jaringan (Pane et al., 2013).	Data digital dari sensor	<i>File</i> log dengan cap waktu
<i>LVDT Module</i>	Memproses sinyal dari sensor <i>inclinometer</i> tipe LVDT (Pane et al., 2013).	Sinyal analog LVDT/ perubahan tegangan induksi.	Tegangan terkalibrasi atau nilai <i>displacement</i> dalam mm.
<i>Wireless Transmission</i>	Mengirim data dari sensor atau DAS ke <i>gateway</i> secara nirkabel melalui berbagai protokol.	Data digital terstruktur dari <i>node</i> sensor.	Paket data nirkabel
<i>Gateway</i>	Menjadi pusat penghubung antara lapangan dan <i>cloud</i> .	Paket data dari jaringan nirkabel.	Data dikirim ke <i>cloud</i> .
<i>Cloud and Analytics</i>	Menyimpan, memproses, dan menganalisis data dalam skala besar.	Data dari <i>gateway</i> dan data historis.	Hasil data analitik.
<i>Monitoring Platform</i>	Memberikan tampilan visual grafis secara <i>real-time</i> melalui <i>dashboard</i> .	Hasil analitik dari <i>cloud</i>	Grafik <i>time series</i> percepatan, regangan, sudut, dan notifikasi kondisi abnormal.
<i>Actuator</i>	Melakukan respons fisik otomatis berdasarkan perintah sistem, misalnya mengaktifkan alarm.	Perintah kontrol dari <i>cloud</i> maupun platform <i>monitoring</i> .	Aksi fisik seperti menyalakan sirene atau penyesuaian perangkat lapangan.
<i>Decision Support System (DSS)</i>	Menganalisis data dan memberikan rekomendasi tindakan berbasis aturan atau model analitik (Saliman, 2015).	Hasil analitik, tren sensor, batas aman, parameter risiko.	Rekomendasi tindakan
<i>Adaptive Design Module (ADM)</i>	Menghasilkan pembelajaran desain adaptif berdasarkan data lapangan jangka panjang, mengolah pola kerusakan, dan respons.	Data historis, pola deformasi, model analitik, dan kondisi lingkungan.	Saran penyesuaian desain, modifikasi struktur, atau strategi perkuatan.



Gambar 3. Diagram Arsitektur Sistem Pemantauan Struktur Berbasis IoT
 Sumber: Data Penelitian, 2025

4.1.1 Penjelasan Diagram Arsitektur

Arsitektur sistem yang diusulkan pada gambar 2 merepresentasikan sistem pemantauan struktur terintegrasi berbasis IoT yang dirancang untuk mendukung pemantauan kondisi struktur secara berkelanjutan dan *real-time* selama fase konstruksi. Sistem ini disusun menggunakan pendekatan arsitektur berlapis (*layered architecture*) untuk memastikan modularitas, skalabilitas, dan kemudahan integrasi antar komponen sistem. Setiap lapisan memiliki fungsi yang spesifik namun saling terhubung, sehingga memungkinkan alur data yang konsisten mulai dari akuisisi di lapangan hingga pengambilan keputusan berbasis data.

Lapisan *field deployment* pada bagian kiri gambar 2 berperan sebagai titik awal akuisisi data dengan mengintegrasikan berbagai jenis sensor yang ditempatkan pada komponen struktur kritis seperti kolom, balok, pelat, fondasi, serta elemen penopang sementara. Sensor-sensor tersebut dirancang untuk menangkap parameter struktural utama, termasuk respons dinamis, perubahan regangan, kemiringan, dan indikasi retakan, yang mencerminkan perilaku struktur selama proses konstruksi. Untuk menjamin kualitas data, sinyal sensor harus melalui tahap *signal conditioning*, sebelum dikirimkan ke lapisan berikutnya. Sebagaimana dirangkum pada gambar 2 dan tabel 1 lapisan *signal conditioning* melibatkan beberapa tahapan utama, antara lain penguatan sinyal menggunakan *amplifier*, penyaringan frekuensi untuk mereduksi *noise*, serta proses konversi analog ke digital (ADC) agar data yang dihasilkan memiliki tingkat keandalan dan konsistensi yang memadai untuk dianalisis lebih lanjut.

Pada bagian tengah gambar 2 terdapat lapisan transmisi data dan *edge computing*, sistem yang memanfaatkan perangkat *gateway* sebagai penghubung antara sensor lapangan dan sistem pusat. Perangkat ini berfungsi melakukan agregasi data dari berbagai sensor, pemrosesan awal (*pre-processing*), serta pengelolaan komunikasi data melalui jaringan nirkabel sebagaimana dijelaskan pada tabel 1. Dengan adanya pemrosesan di sisi *edge*, beban pengiriman data ke *cloud* dapat dikurangi, latensi sistem diminimalkan, dan respons terhadap perubahan kondisi struktur dapat dilakukan lebih cepat. Selain itu, lapisan ini juga berperan dalam menjaga keamanan dan kontinuitas data melalui mekanisme pengelolaan protokol komunikasi dan sistem pengendalian transmisi.

Lapisan *cloud processing* yang ditampilkan pada bagian kanan atas gambar 2 berfungsi sebagai pusat pengolahan dan penyimpanan data dalam sistem pemantauan struktur sebagaimana yang telah dijelaskan pada tabel 1. Pada tahap ini, data yang diterima dari lapangan diproses menggunakan sistem analitik untuk mengevaluasi kondisi struktur secara *real-time* serta mengidentifikasi tren perubahan perilaku struktur berdasarkan data historis. Penyimpanan data jangka panjang memungkinkan analisis lanjutan terkait performa struktur selama fase konstruksi dan menjadi basis untuk evaluasi risiko serta pengambilan keputusan yang lebih terinformasi. Pemanfaatan *cloud* juga mendukung akses data secara fleksibel dan terpusat oleh berbagai pemangku kepentingan.

Lapisan *output* dan pengambilan keputusan pada bagian kanan bawah gambar 2 dirancang untuk menerjemahkan hasil analisis menjadi informasi yang dapat digunakan untuk operasional. Sistem *monitoring* menyediakan visualisasi kondisi struktur melalui *dashboard* yang menampilkan status sensor, parameter pemantauan, serta tren perubahan struktur. Selain itu, sistem ini dilengkapi dengan

Early Warning System (EWS) yang bekerja berdasarkan ambang batas atau pola anomali tertentu untuk memberikan peringatan dini berupa notifikasi atau alarm apabila terdeteksi potensi ketidakstabilan struktur. Integrasi dengan *decision support system* memungkinkan sistem tidak hanya berfungsi sebagai alat pemantauan pasif, tetapi juga sebagai pendukung pengambilan keputusan teknis dalam pengelolaan keselamatan konstruksi. Adapun peran masing-masing modul beserta karakteristik fungsi, *input*, dan *output* yang dihasilkannya dirangkum dalam tabel 1.

4.2 Penempatan Sensor pada Gedung Bertingkat



Gambar 4. Ilustrasi Gedung Bertingkat

Sumber: OpenAI,2025

Pada bagian ini akan membahas mengenai penempatan sensor pada gedung bertingkat yang difokuskan pada tahap konstruksi, dengan mempertimbangkan elemen struktur yang paling rentan terhadap beban sementara dan perubahan kondisi selama proses pembangunan. Penjelasan diarahkan pada identifikasi lokasi-lokasi struktural yang berpotensi mengalami peningkatan deformasi, redistribusi beban, atau ketidakstabilan akibat konstruksi bertahap. Selain itu, bagian ini menjelaskan elemen-elemen bangunan yang perlu dipantau secara prioritas beserta titik penempatan sensor yang paling representatif. Jenis sensor yang sesuai untuk masing-masing elemen juga akan diuraikan untuk mendukung sistem *monitoring* yang efektif untuk masing-masing elemen struktural selama fase konstruksi.

a. Kolom

Penempatan sensor pada kolom diprioritaskan pada kolom lantai terbawah yang khususnya berada tepat di atas fondasi dan satu dua lantai di atasnya. Hal ini karena respons gaya aksial dan momen lentur pada zona ini menunjukkan akumulasi beban paling besar (Sadhu & Goli, 2017). Untuk memperoleh distribusi respons vertikal yang representatif, sensor tambahan bisa dipasang pada kolom setiap 2 – 3 lantai, dengan fokus pada kolom inti dan kolom sudut yang mengalami kombinasi gaya paling kompleks. Pola interval ini diharapkan dapat mengevaluasi perubahan kekakuan dan redistribusi gaya di sepanjang titik bangunan secara efisien. Pendekatan tersebut juga dinilai memadai untuk mendukung sistem *monitoring* tanpa meningkatkan kompleksitas dan instalasi secara berlebihan (Sadhu & Goli, 2017).

Dengan mempertimbangkan kebutuhan pemantauan pada zona kolom, terdapat tiga jenis sensor utama yang dapat digunakan, yaitu *accelerometer*, *strain gauge*, dan *crack meter*. *Accelerometer* berperan menangkap respons getaran kolom secara global sehingga perubahan perilaku struktur akibat redistribusi gaya antar lantai dapat teridentifikasi. Selain itu, *strain gauge* juga dipasang untuk merekam regangan aktual yang merepresentasikan kondisi kerja kolom terhadap gaya aksial dan momen lentur dominan pada lokasi kritis. Sebagai pelengkap, *crack meter* digunakan untuk memantau inisiasi dan perkembangan retak yang mencerminkan penurunan kekakuan lokal elemen kolom. Ketiga sensor ini pada dasarnya saling melengkapi untuk memenuhi kebutuhan pemantauan kolom secara menyeluruh, namun dalam penerapan tertentu satu atau dua jenis sensor masih dapat digunakan secara selektif sesuai tujuan *monitoring* dan keterbatasan sistem yang diterapkan.

b. Balok

Balok pada lantai atas merupakan lokasi paling kritis karena respon percepatan dan simpangan lateral akibat beban angin dan gempa cenderung meningkat seiring ketinggian bangunan (Enkhsaikhan & Bayarsaikhan, 2024). Elemen ini berperan langsung dalam mentransfer gaya inersia lateral ke sistem rangka, sehingga perubahan respons dinamis lebih cepat pada balok teratas dibandingkan dengan elemen di bawahnya. Untuk menjaga efisiensi sistem *monitoring*, pemasangan sensor dapat dilakukan pada interval 3-4 lantai dengan fokus pada balok perimeter yang paling dipengaruhi oleh efek torsi dan *drift* antar lantai (Enkhsaikhan & Bayarsaikhan, 2024). Hal ini diharapkan menghasilkan hasil yang baik tanpa redundansi data yang berlebihan.

Respons balok pada lantai atas yang cenderung lebih menonjol menjadi dasar pemilihan instrumen pemantauan berupa *accelerometer*, *strain gauge*, dan *crack meter*. Pemasangan *accelerometer* diarahkan untuk merekam perilaku dinamis balok akibat pengaruh beban angin dan gempa yang semakin dominan pada ketinggian bangunan. Selain itu, *strain gauge* dimanfaatkan untuk mengukur regangan lentur yang berkaitan langsung dengan mekanisme penyaluran gaya inersia lateral serta dampak *drift* antar lantai. Pemantauan kondisi retak dilakukan melalui *crack meter* guna mengamati inisiasi dan perkembangan retak lentur yang dapat timbul akibat kombinasi beban dinamis dan deformasi berulang. Penggunaan ketiga sensor secara terpadu memberikan pemahaman yang menyeluruh terhadap respons balok, meskipun dalam kondisi tertentu pemantauan tetap dapat dilakukan secara efektif dengan membatasi jenis sensor sesuai fokus evaluasi yang diinginkan.

c. Pelat Lantai

Penempatan sensor pada pelat lantai berada pada area tengah bentang yang berada jauh dari garis dukungan gaya karena zona ini memiliki sensitivitas tertinggi terhadap perubahan lendutan selama tahap awal pembebanan. (Nguyen & Nguyen, 2025). Pemasangan sensor tidak harus dilakukan pada seluruh lantai, tetapi dapat difokuskan pada lantai yang menerima beban konstruksi besar atau dipilih secara periodik (Nguyen & Nguyen, 2025). Penentuan lantai yang dimonitor juga diselaraskan dengan tahapan pengecoran serta urutan pembebanan aktual di lapangan. Data hasil pemantauan ini dapat mengidentifikasi kecenderungan deformasi, sehingga mendukung pengambilan keputusan selama fase konstruksi.

Tingginya tingkat kepekaan pelat lantai terhadap perubahan perilaku struktural menjadi dasar pemilihan sensor berupa *strain gauge*, *accelerometer*, dan *crack meter*. Penggunaan *strain gauge* diarahkan untuk menangkap regangan lentur yang terjadi pada pelat, sehingga respons lendutan dapat teridentifikasi secara langsung. Di sisi lain, *accelerometer* dimanfaatkan untuk mengamati karakteristik getaran yang mencerminkan perubahan kekakuan keseluruhan pelat serta pola distribusi beban sementara. Pemantauan kondisi retak dilakukan melalui pemasangan *crack meter* guna mendeteksi kemunculan awal hingga perkembangan retakan pada permukaan pelat yang berpotensi menurunkan kinerja layan. Kombinasi ketiga jenis sensor tersebut memberikan pemahaman perilaku pelat secara menyeluruh, meskipun dalam kondisi tertentu, pemantauan tetap dapat dilakukan secara efektif dengan membatasi penggunaan sensor sesuai fokus evaluasi yang diinginkan.

d. Shoring

Shoring yang paling krusial berada pada area tengah bentang serta pada shoring yang secara langsung menopang pelat yang baru di cor. Hal ini karena pada kondisi tersebut, elemen ini harus memikul beban sementara terbesar sebelum struktur permanen mencapai kapasitas rencana (Nilimaa et al., 2023). Pemasangan sensor dapat dilakukan pada *shoring* di lantai konstruksi yang sedang aktif pada beberapa titik *shoring* dan satu atau lantai di bawahnya. Pola pemantauan ini berperan penting dalam mengidentifikasi peningkatan deformasi lokal sejak dini, sehingga mencegah kegagalan progresif.

Melihat hal tersebut, terdapat kebutuhan akan sistem pemantauan dengan memanfaatkan *accelerometer* dan *MEMS inclinometer*. *Accelerometer* diaplikasikan untuk mencatat respons getaran yang muncul akibat aktivitas konstruksi dan perubahan pola distribusi beban sementara, sehingga indikasi penurunan kekakuan atau ketidakstabilan elemen penyangga dapat dikenali lebih awal. Sementara itu, *MEMS inclinometer* digunakan untuk memantau variasi sudut kemiringan *shoring* secara kontinu sebagai penanda awal terjadinya deformasi berlebih atau pergeseran posisi. Integrasi kedua sensor tersebut dinilai mampu merepresentasikan respons dinamis sekaligus perubahan geometri *shoring* secara langsung, sehingga mendukung upaya deteksi dini terhadap potensi kegagalan selama fase konstruksi.

e. Fondasi

Sensor pada fondasi difokuskan pada kelompok tiang pancang utama di area inti bangunan (Wu et al., 2025). Sensor tambahan dapat ditempatkan pada beberapa tiang tepi atau perimeter untuk menangkap beberapa respons yang dipengaruhi oleh beban lateral serta heterogenitas kondisi tanah. Distribusi ini memungkinkan identifikasi perilaku antara zona inti dan tepi sistem fondasi. Selain itu, penempatan sensor pada fondasi tiang dengan kedalaman dan posisi berbeda memungkinkan perekaman respons fondasi pada kondisi pembebanan yang tidak seragam selama tahap konstruksi dan pembebanan awal (Wu et al., 2025).

Perbedaan karakter respons fondasi tiang menjadi landasan penentuan sistem pemantauan yang mengandalkan *strain gauge*, *inclinometer*, dan *accelerometer* sebagai instrumen utama, dengan *crack meter* sebagai perangkat tambahan yang tidak wajib. Penggunaan *strain gauge* ditujukan untuk mengidentifikasi gaya aksial serta perubahan regangan pada tiang pancang, sehingga mekanisme penyaluran beban ke tanah dapat terwakili secara langsung. Pemantauan rotasi dan pergeseran lateral akibat beban samping maupun variasi kondisi tanah dilakukan melalui pemasangan *inclinometer*. Untuk melengkapi pengamatan tersebut, *accelerometer* dimanfaatkan dalam merekam respons dinamis fondasi yang timbul akibat aktivitas konstruksi dan eksitasi sementara, khususnya pada fase awal pembebanan. Sementara itu *crack meter* dapat ditiadakan atau dipasang secara terbatas pada *pile cap* atau elemen beton fondasi di area tertentu yang dianggap kritis, mengingat aspek deformasi dan potensi ketidakstabilan global telah terakomodasi oleh kombinasi *strain gauge* dan *inclinometer*.

4.3 Kelayakan/*Feasibility*

Penerapan sistem pemantauan struktur terintegrasi berbasis IoT sebagaimana diuraikan pada penempatan sensor dan arsitektur sistem di atas pada dasarnya realistis untuk diterapkan di dunia nyata, khususnya pada proyek gedung bertingkat menengah hingga tinggi yang memiliki kompleksitas konstruksi dan tingkat risiko yang signifikan. Ditinjau dari sisi konseptual, pendekatan berlapis yang memisahkan fungsi akuisisi data, transmisi dan pemrosesan awal, pengolahan terpusat, serta pengambilan keputusan mencerminkan praktik terbaik yang telah banyak diadopsi dalam *Structural Health Monitoring* (SHM) modern (Bhatta & Dang, 2024). Namun demikian, tingkat realisme penerapannya sangat bergantung pada bagaimana desain sistem tersebut disesuaikan dengan skala proyek, sumber daya yang tersedia, serta kapasitas teknis dan organisasi pelaksana konstruksi.

Ditinjau dari sisi kelayakan teknis, penerapan sistem pemantauan yang mengombinasikan beberapa sensor pada elemen-elemen struktural dinilai relevan. Berbagai jenis sensor tersebut telah teruji dalam merekam data secara *real-time* serta mampu merepresentasikan respons struktur akibat beban sementara maupun perubahan kondisi yang muncul seiring dengan tahapan pembangunan. Selain itu, penggabungan sensor dengan komponen pendukung seperti *signal conditioning*, *gateway*, dan mekanisme *edge computing* merupakan pendekatan yang realistis, sejalan dengan perkembangan teknologi IoT dengan tingkat latensi yang rendah. Tantangan teknis utama bukan terletak pada ketersediaan teknologi, melainkan pada kalibrasi sensor, ketahanan perangkat terhadap lingkungan konstruksi yang

keras (debu, getaran, cuaca), serta konsistensi kualitas data dalam jangka waktu yang relatif panjang selama proyek berlangsung (Liu et al., 2025).

Selain itu apabila dicermati dari aspek operasional, sistem ini relatif menantang tetapi masih cukup realistis dengan perencanaan yang baik. Pemasangan sensor pada kolom, balok, pelat, *shoring*, dan fondasi selama fase konstruksi memerlukan koordinasi yang erat antara tim struktur, kontraktor lapangan, dan tim *monitoring*. Risiko kerusakan sensor akibat aktivitas konstruksi, perubahan jadwal kerja, atau relokasi elemen sementara harus diantisipasi melalui desain pemasangan yang fleksibel dan modular (Mardanshahi et al., 2025). Di sisi lain, pemanfaatan *dashboard* visualisasi dan sistem peringatan dini dapat membantu personel lapangan yang tidak memiliki latar belakang teknis mendalam untuk memahami kondisi struktur secara intuitif. Dengan pelatihan yang memadai, sistem ini berpotensi meningkatkan budaya keselamatan dan pengambilan keputusan berbasis data di lapangan, meskipun tetap membutuhkan komitmen dan keterampilan operasional yang lebih tinggi dibandingkan metode inspeksi konvensional.

Jika dilihat dari aspek ekonomi, penerapan penuh sistem *monitoring* ini mungkin belum sepenuhnya efisien untuk proyek skala kecil atau bangunan bertingkat rendah dengan risiko terbatas (Jacoski & Saugo, 2018). Namun, untuk proyek gedung bertingkat tinggi, proyek dengan metode konstruksi bertahap yang kompleks, atau proyek di wilayah dengan tingkat bahaya gempa dan angin yang tinggi, investasi pada sistem ini dapat dianggap sepadan. Biaya awal yang relatif besar untuk pengadaan sensor, infrastruktur IoT, dan pengelolaan data berpotensi *terkompensasi* oleh pengurangan risiko kegagalan struktural, keterlambatan proyek, serta biaya perbaikan akibat kesalahan konstruksi yang tidak terdeteksi sejak dini. Dengan kata lain, kelayakan ekonomi sistem ini lebih tepat dinilai dalam kerangka manajemen risiko jangka menengah dan panjang, bukan semata-mata efisiensi biaya langsung.

Dari sudut pandang integrasi sistem dan kesiapan organisasi, arsitektur yang diusulkan menimbulkan tantangan dari sisi kedewasaan sistem manajemen proyek dan teknologi informasi terutama di Indonesia. Integrasi antara data lapangan, analitik berbasis *cloud*, serta sistem pendukung keputusan hanya akan efektif apabila alur kerja dan tanggung jawab antar pemangku kepentingan didefinisikan secara jelas. Tanpa prosedur yang matang, sistem *monitoring* berisiko menjadi sekadar penyedia data tanpa dampak nyata terhadap keputusan teknis. Oleh karena itu, secara keseluruhan, sistem ini realistis untuk diterapkan di dunia nyata, terutama pada proyek konstruksi berisiko tinggi, dengan catatan bahwa penerapannya dilakukan secara bertahap, adaptif, dan disesuaikan dengan kapasitas teknis, operasional, serta tujuan pengelolaan keselamatan dan kinerja struktur selama fase konstruksi.

5. Kesimpulan dan Saran

Penelitian ini menyimpulkan bahwa perancangan sistem pemantauan struktur terintegrasi berbasis sensor dan teknologi IoT mampu menjawab kebutuhan pemantauan kondisi struktur gedung bertingkat secara *real-time* pada tahap konstruksi. Integrasi berbagai jenis sensor, yaitu *accelerometer*, *strain gauge*, *inclinometer MEMS*, dan *crack meter*, dalam satu sistem terpadu memungkinkan pengukuran berbagai parameter struktural secara bersamaan. Pendekatan ini



memberikan gambaran kondisi struktur yang lebih komprehensif dibandingkan metode inspeksi konvensional yang bersifat periodik dan subjektif. Dengan demikian, perubahan perilaku struktur akibat beban sementara, aktivitas konstruksi, maupun pengaruh lingkungan dapat teridentifikasi secara lebih cepat dan akurat.

Perancangan alur dan diagram arsitektur sistem yang diusulkan menunjukkan bahwa sistem pemantauan dapat dibangun secara sistematis dan terstruktur. Alur sistem mencakup tahapan akuisisi data lapangan, pengondisian dan konversi sinyal, transmisi data nirkabel, pemrosesan berbasis *cloud*, hingga penyajian informasi dalam platform *monitoring*. Rangkaian proses tersebut memastikan bahwa data sensor dapat diolah secara *real-time* dan berkelanjutan tanpa kehilangan kontinuitas informasi. Selain itu, arsitektur ini mendukung pembentukan mekanisme peringatan dini (*early warning system*) yang mampu mendeteksi indikasi awal ketidakstabilan atau potensi kegagalan struktur secara tepat waktu.

Penentuan lokasi penempatan sensor pada elemen-elemen struktural utama dan area kritis, seperti kolom, balok, pelat lantai, *shoring*, dan fondasi, merupakan bagian penting dalam memastikan efektivitas sistem pemantauan. Penempatan sensor didasarkan pada fungsi elemen struktur, konsentrasi beban, serta potensi deformasi dan pergeseran selama tahap konstruksi. Pendekatan ini memungkinkan data yang diperoleh lebih representatif terhadap kondisi struktural yang sebenarnya. Dengan penempatan yang selektif dan terencana, sistem *monitoring* dapat bekerja secara efisien tanpa menghasilkan redundansi data yang berlebihan.

Selain itu, dari aspek kelayakan, sistem pemantauan struktur terintegrasi yang dirancang dinilai realistis untuk diterapkan pada proyek gedung bertingkat menengah hingga tinggi dengan tingkat kompleksitas dan risiko yang signifikan. Ketersediaan teknologi sensor dan infrastruktur IoT saat ini mendukung penerapan sistem pemantauan secara *real-time*. Meskipun diperlukan investasi awal serta kesiapan teknis dan operasional, manfaat yang diperoleh dalam bentuk peningkatan keselamatan bangunan dan pengurangan risiko kegagalan struktur dinilai sepadan. Oleh karena itu, sistem ini relevan untuk dijadikan bagian dari strategi manajemen risiko konstruksi modern.

Sebagai rujukan awal, penelitian ini memberikan landasan konseptual bagi pengembangan sistem pemantauan struktur yang lebih andal dan aplikatif. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengimplementasikan sistem ini pada proyek nyata guna mengevaluasi kinerja sensor, keandalan sistem transmisi data, serta efektivitas mekanisme peringatan dini. Selain itu, integrasi metode analisis lanjutan seperti pemodelan prediktif atau *machine learning* dapat dipertimbangkan untuk meningkatkan kemampuan deteksi anomali. Dukungan standar teknis dan peningkatan kapasitas sumber daya manusia juga diperlukan agar sistem pemantauan struktur terintegrasi dapat diterapkan secara berkelanjutan dalam praktik konstruksi gedung bertingkat di Indonesia.

Daftar Pustaka

- Agdas, D., Rice, J. A., Martinez, J. R., & Lasa, I. R. (2016). Comparison of Visual Inspection and Structural-Health Monitoring As Bridge Condition Assessment Methods. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 30(3), 04015049. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)cf.1943-5509.0000802](https://doi.org/10.1061/(asce)cf.1943-5509.0000802)

- Arisyi, L., Dewita, H., & Sembiring, K. (2024). Analisis Struktur Beton Pelat Lantai dan Balok dengan Metode Bekisting Sistem Fix Shoring. *Jurnal Komposit*, 8(2), 399–410. <https://doi.org/10.32832/komposit.v8i2.15598>
- Bhatta, S., & Dang, J. (2024). Use of IoT for structural health monitoring of civil engineering structures: a state-of-the-art review. *Urban Lifeline*, 2(1). <https://doi.org/10.1007/s44285-024-00031-2>
- BPJS Ketenagakerjaan. (2022). *Adaptif dan Inovatif untuk pertumbuhan yang impresif*. [https://www.bpjsketenagakerjaan.go.id/assets/uploads/laporan_tahunan/BPJS_2022_LO19-\(1\).pdf](https://www.bpjsketenagakerjaan.go.id/assets/uploads/laporan_tahunan/BPJS_2022_LO19-(1).pdf)
- Clauß, F., Ahrens, M. A., & Mark, P. (2021). A comparative evaluation of strain measurement techniques in reinforced concrete structures—A discussion of assembly, application, and accuracy. *Structural Concrete*, 22(5), 2992–3007. <https://doi.org/10.1002/suco.202000706>
- Cui, Y., Li, X., Zhang, T., Ding, W., & Yin, J. (2022). Development of High-Temperature Wire-Grid Thin Film Strain Gauges. *Sensors*, 22(19), 7595. <https://doi.org/10.3390/s22197595>
- Deanggi, V. L. (2025). Risiko K3 Pada Pelaksanaan Konstruksi Bangunan Gedung Bertingkat. *KERN : Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 11(1), 27–36. <https://doi.org/10.33005/kern.v11i1.69>
- Emekoma, C. C. (2019). Assessment of Building Collapse Impact on Socio Economic Development in Port Harcourt Metropolis of Rivers State. *Journal of Geography, Environment and Earth Science International*, 1–13. <https://doi.org/10.9734/jgeesi/2019/v23i230163>
- Enkhsaikhan, N., & Bayarsaikhan, T. (2024). Analysis of high-rise building dynamics under wind and earthquake loads. *International Journal of Civil Engineering and Architecture Engineering*, 5(2), 43–48. <https://doi.org/10.22271/27078361.2024.v5.i2a.57>
- Febrianto, A., Siroj, R. A., & Hartatiana. (2024). Studi Literatur: Landasan Dalam Memilih Metode Penelitian Yang Tepat. *Journal Educational Research and Development | E-ISSN : 3063-9158*, 1(2), 259–263. <https://doi.org/10.62379/jerd.v1i2.142>
- Fiendyo, M. H., Priyono, P., & Alihudien, A. (2025). Perencanaan Struktur Gedung Tahan Gempa Menggunakan Metode Interaksi Struktur-Tanah Pada Jenis Pondasi Tiang Pancang. *Jurnal Smart Teknologi*, 6(4), 490–504. <https://jurnal.unmuhjember.ac.id/index.php/JST/article/view/22636118?utm>
- Grokipedia. (2025). *List of tallest buildings in Indonesia*. Grokipedia.com. https://grokipedia.com/page/List_of_tallest_buildings_in_Indonesia?utm
- Gupalov, V., Kukaev, A., Shevchenko, S., Shalymov, E., & Venediktov, V. (2018). Physical Principles of a Piezo Accelerometer Sensitive to a Nearly Constant Signal. *Sensors*, 18(10), 3258. <https://doi.org/10.3390/s18103258>
- Ha, D., Park, H., Choi, S., & Kim, Y. (2013). A Wireless MEMS-Based Inclinometer Sensor Node for Structural Health Monitoring. *Sensors*, 13(12), 16090–16104. <https://doi.org/10.3390/s131216090>
- Jacoski, C. A., & Saugo, L. (2018). Perception about the use of monitoring systems in civil construction structures. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 90, 28–33. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n90a05>
- Kimpfbeck, D., Enser, H., Wagner, J., Heinzlmeier, L., Buchroithner, B., Kulha, P., Heise, B., Hanneschläger, G., Kralovec, C., & Schagerl, M. (2025). Assessing the Adhesiveness and Long-Term Behaviour of Piezoresistive Strain Sensor



- Materials for Application in Structural Health Monitored Structures. *Sensors*, 25(6), 1659. <https://doi.org/10.3390/s25061659>
- Liu, Q., Wang, Y., Zhao, F., Zheng, C., & Xie, J. (2025). A Review of the Research Progress of Sensor Monitoring Technology in Harsh Engineering Environments. *Sensors*, 25(20), 6308–6308. <https://doi.org/10.3390/s25206308>
- Mantasa, R. (2019). *SNI 2847-2019 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung SNI 1726-2019 Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung* – tekonsipil.sv.ugm.ac.id. Ugm.ac.id. <https://tekonsipil.sv.ugm.ac.id/file/sni-2847-2019-persyaratan-beton-struktural-untuk-bangunan-gedung-sni-1726-2019-persyaratan-beton-struktural-untuk-bangunan-gedung/?utm>
- Mardanshahi, A., Sreekumar, A., Yang, X., Barman, S. K., & Chronopoulos, D. (2025). Sensing Techniques for Structural Health Monitoring: A State-of-the-Art Review on Performance Criteria and New-Generation Technologies. *Sensors*, 25(5), 1424. <https://doi.org/10.3390/s25051424>
- Martin, R., & Delatte, N. (2000). *Another Look at the L’Ambiance Plaza Collapse*. https://engagedscholarship.csuohio.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1037&context=enec_facpub
- Maulana, Y., Wibowo, E., & Marlina, L. (2024). Optimization of structural health monitoring for steel bridges using wireless sensor networks and machine learning algorithms. *International Journal of Mechanical, Electrical and Civil Engineering*, 1(2), 11–16. <https://doi.org/10.61132/ijmecie.v1i2.65>
- Mirza, F., Thamrin, R., & Zaidir, Z. (2021). Kinerja Struktur Gedung Beton Bertulang dengan Variasi Arah Penampang dan Rasio Tulangan Kolom. *Siklus : Jurnal Teknik Sipil*, 7(2), 93–105. <https://doi.org/10.31849/siklus.v7i2.6926>
- Mishra, M., Lourenço, P. B., & Ramana, G. V. (2022). Structural health monitoring of civil engineering structures by using the internet of things: A review. *Journal of Building Engineering*, 48, 103954. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.103954>
- Nguyen, Q.-B., & Nguyen, H.-H. (2025). An Efficient Approach for Damage Identification of Beams Using Mid-Span Static Deflection Changes. *Eng*, 5(2), 895–917. <https://doi.org/10.3390/eng5020048>
- Nilimaa, J., Gamil, Y., & Zhaka, V. (2023). Formwork Engineering for Sustainable Concrete Construction. *CivilEng*, 4(4), 1098–1120. <https://doi.org/10.3390/civileng4040060>
- Nurliana, A. L., & Walujodjati, E. (2024). Analisis Kuat Lentur dan Geser Balok Beton dengan Bundel Tulangan. *Jurnal Konstruksi*, 22(1), 101–108. <https://doi.org/10.33364/konstruksi/v.22-1.1532>
- Pane, M., Arianto, S., Perangin-Angin, B., & Tamba, T. (2013). *Perancangan Signal Conditioning untuk Sensor LVDT (Linear Variable Differential Transformer)*. <https://media.neliti.com/media/publications/221345-none.pdf>
- Rahita, A. C., Zaki, A., Nugroho, G., & Yadi, S. (2024). Internet of Things (IoT) in Structural Health Monitoring: A Decade of Research Trends. *Instrumentation Measure Métrologie*, 23(2), 123–139. <https://doi.org/10.18280/i2m.230205>
- Ran, S.-C., Wang, Q.-A., Wang, J.-F., Ni, Y.-Q., Guo, Z.-X., & Luo, Y. (2024). A Concise State-of-the-Art Review of Crack Monitoring Enabled by RFID Technology. *Applied Sciences*, 14(8), 3213–3213. <https://doi.org/10.3390/app14083213>

- Rifzan. (2022, November 12). *Pengertian Sensors, Gateway, Network, Application Dalam IoT - PT Laser Teknologi Indonesia (LTI)*. PT Laser Teknologi Indonesia (LTI). <https://lasernet.co.id/pengertian-sensors-gateway-network-application-dalam-iot.html>
- S1 Teknik Elektro. (2024). *Analog-to-Digital Converter*. S1 Teknik Elektro. <https://teknikelektro.ft.unesa.ac.id/post/analog-to-digital-converter>
- Sadhu, A., & Goli, G. (2017). Blind source separation-based optimum sensor placement strategy for structures. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 7(4), 445–458. <https://doi.org/10.1007/s13349-017-0235-6>
- Saliman, S. (2015). Mengenal DEcision Support System (DSS). *Efisiensi – Kajian Ilmu Administrasi*, 10(1). <https://doi.org/10.21831/efisiensi.v10i1.3971>
- Sharma, K. K., Imam, A., Kumar, P., & Olaiya, B. C. (2025). Displacement-based seismic fragility assessment of a high-rise reinforced concrete building. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-22256-z>
- Smith, G. M. (2022, June 28). *Data Acquisition (DAQ) - The Ultimate Guide [Updated 2025]*. Data Acquisition | Test and Measurement Solutions; Dewesoft. <https://dewesoft.com/blog/what-is-data-acquisition?utm>
- Smith, G. M. (2025, April 6). *Difference Between Data Logger vs. DAQ System*. Data Acquisition | Test and Measurement Solutions. <https://dewesoft.com/blog/data-logger-vs-daq-system>
- Sudarsana, I. K., Susila, G. A., Widiantera, I. W. P., & Wiryadi, I. G. G. (2023). EVALUASI KINERJA STRUKTUR RANGKA BETON BERTULANG BALOK LEBAR DENGAN DISTRIBUSI BEBAN PELAT SATU DAN DUA ARAH. *Jurnal Ilmiah Teknik Sipil*, 27(1), 131–131. <https://doi.org/10.24843/jits.2023.v27.i01.p15>
- Taher, S. A., Li, J., Jeong, J.-H., Laflamme, S., Jo, H., Bennett, C., Collins, W. N., & Downey, A. R. J. (2022). Structural Health Monitoring of Fatigue Cracks for Steel Bridges with Wireless Large-Area Strain Sensors. *Sensors*, 22(14), 5076. <https://doi.org/10.3390/s22145076>
- Tampanguma, K., Windah, R., & Mondoringin, M. (2023). Desain Dan Analisa Struktur Kolom Beton Bertulang Gedung Bertingkat Berdasarkan SNI 2847-2019. *TEKNO*, 21(86). <https://doi.org/10.35793/jts.v21i86.53493>
- Wang, H., Zhang, A., Li, Y., & Yan, W. (2014). A Review on Progressive Collapse of Building Structures. *The Open Civil Engineering Journal*, 8(1), 183–192. <https://doi.org/10.2174/1874149501408010183>
- Wu, K., Zhang, P., Yuan, J., Qian, X., & Qi, R. (2025). IoT Monitoring and Evaluating System for the Construction Quality of Foundation Pile. *Buildings*, 15(15), 2660–2660. <https://doi.org/10.3390/buildings15152660>
- Wu, T., You, D., Gao, H., Lian, P., Ma, W., Zhou, X., Wang, C., Luo, J., Zhang, H., & Tan, H. (2023). Research Status and Development Trend of Piezoelectric Accelerometer. *Crystals*, 13(9), 1363. <https://doi.org/10.3390/cryst13091363>
- Zhu, J., Wang, W., Huang, S., & Ding, W. (2020). An Improved Calibration Technique for MEMS Accelerometer-Based Inclinometers. *Sensors*, 20(2), 452. <https://doi.org/10.3390/s20020452>