

Deteksi Kerusakan Beton Bertulang Jangka Panjang via IoT dan Model Machine Learning

Angga Setyadi*¹, Purwanto¹

¹Fakultas Studi Akademik, Universitas Sains dan Teknologi Komputer, Semarang, Indonesia

Email: anggasetyadi@stekom.ac.id

*Corresponding Author

Abstract

This study presents the development and implementation of an integrated system that combines Internet of Things (IoT) sensors and the XGBoost algorithm to predict damage in reinforced concrete structures under tropical climate conditions. The system was deployed on prototype structures equipped with temperature, humidity, strain, and vibration sensors, and data were collected over 60 days. Using supervised machine learning, the XGBoost model achieved high accuracy (93.2%) in classifying structural conditions into the categories of safe, vulnerable, and damaged. Real-time monitoring enabled early anomaly detection, with an average system response time of 3.4 seconds, significantly outperforming manual inspections. The findings demonstrate that this approach provides a viable predictive maintenance solution for infrastructure in high-humidity, variable-temperature environments. While the system performs effectively in a prototype setting, further testing on full-scale structures is needed to validate its robustness and expand its detection scope. This research advances intelligent infrastructure systems through data-driven decision-making and AI-based damage forecasting.

Keywords: *IoT-based monitoring, Structural damage prediction, xGBoost algorithm*

I. PENDAHULUAN

Struktur beton bertulang telah lama menjadi pilar utama dalam pengembangan infrastruktur modern di berbagai belahan dunia (Curbach et al., 2024). Dalam konteks Indonesia yang berada di wilayah tropis dengan intensitas pembangunan yang tinggi, penggunaan beton bertulang mendominasi hampir seluruh sektor konstruksi, mulai dari gedung bertingkat, jembatan, jalan layang, hingga pelabuhan dan bendungan. Beton bertulang dipilih karena sifatnya yang kuat terhadap gaya tekan dari beton dan gaya tarik dari baja tulangan. Kombinasi ini memungkinkan terciptanya struktur yang kokoh, tahan lama, dan mampu menahan beban dalam jangka waktu panjang (Vatin et al., 2023). Namun, kondisi iklim tropis yang lembap, panas, dan memiliki intensitas curah hujan tinggi sepanjang tahun menciptakan tantangan besar terhadap daya tahan material tersebut. Interaksi antara kelembaban tinggi, suhu ekstrem, paparan sinar UV, dan polusi udara mempercepat terjadinya proses korosi pada baja tulangan serta degradasi struktural lainnya (Rincon et al., 2024).

Dalam jangka panjang, degradasi tersebut dapat menurunkan performa dan keamanan struktur secara signifikan. Retak mikro yang awalnya tidak tampak bisa berkembang menjadi kerusakan struktural besar apabila tidak dideteksi sejak dini (Sultan et al., 2023). Korosi pada tulangan baja menyebabkan beton kehilangan daya ikat internalnya, yang kemudian berdampak pada penurunan kapasitas struktur. Masalah ini tidak hanya berdampak pada aspek teknis, tetapi juga ekonomi dan sosial, mengingat tingginya biaya perbaikan dan potensi risiko terhadap keselamatan publik (Sohaib et al., 2024). Terlebih lagi, dalam situasi bencana alam seperti gempa bumi yang kerap terjadi di Indonesia, keberadaan struktur dengan kondisi sub-optimal dapat memperbesar dampak kerusakan dan korban jiwa (Zhang et al., 2024). Oleh karena itu, penting bagi dunia teknik sipil untuk terus mencari metode

inovatif yang mampu memantau dan memprediksi kondisi struktur secara berkelanjutan, khususnya dalam konteks wilayah tropis yang penuh tekanan lingkungan.

Selama ini, pemantauan kondisi struktur dilakukan melalui metode visual dan pengujian non-destruktif seperti hammer test, ultrasonic pulse velocity, atau rebound hammer (Ashiq et al., 2025). Meskipun metode tersebut telah banyak digunakan, namun pendekatannya bersifat reaktif dan tergolong sporadis. Artinya, kerusakan hanya diketahui setelah gejala tampak di permukaan atau ketika telah terjadi penurunan performa signifikan (Hassani & Dackermann, 2023). Kelemahan dari metode konvensional ini adalah ketidakteraturannya, keterbatasan jangkauan, serta ketergantungan pada keterampilan teknis. Di era digital dan otomasi seperti saat ini, pendekatan yang hanya mengandalkan inspeksi manual dianggap sudah tidak lagi mencukupi untuk menjaga keberlanjutan dan keselamatan infrastruktur, apalagi dalam skala besar (Pushpakumara & Fernando, 2023).

Sebagai respons terhadap tantangan tersebut, berbagai pendekatan berbasis teknologi mulai dikembangkan. Salah satu inovasi yang berkembang pesat adalah pemanfaatan teknologi Internet of Things (IoT) dalam sistem monitoring struktural (Prihadyanti & Aziz, 2023). IoT memungkinkan pemasangan sensor-sensor cerdas pada struktur bangunan yang secara kontinu merekam dan mengirimkan data lingkungan serta data struktural ke server pusat. Sensor-sensor ini dapat memantau parameter seperti suhu, kelembaban, getaran, regangan, dan tekanan (Ahn et al., 2022). Informasi yang diperoleh dari sensor tersebut menjadi aset penting dalam mendeteksi perubahan atau anomali yang terjadi pada struktur secara real-time. Hal ini menciptakan pendekatan baru yang disebut Structural Health Monitoring (SHM), yaitu pemantauan kesehatan struktur secara menyeluruh dan berkelanjutan (Bayrakdar Ates & Calik, 2023).

Namun, tantangan baru muncul dalam mengelola data yang sangat besar dan kompleks dari sensor-sensor tersebut. Sistem monitoring menghasilkan data dalam jumlah yang sangat besar (big data), dengan karakteristik temporal dan multi-dimensional (Almeida et al., 2023). Tanpa alat analisis yang memadai, data tersebut hanya akan menjadi beban penyimpanan tanpa menghasilkan informasi yang bernilai. Untuk itu, diperlukan integrasi dengan teknologi analitik canggih seperti machine learning untuk melakukan analisis prediktif terhadap data (Guo et al., 2022). Salah satu algoritma yang terbukti unggul dalam analisis data besar dan non-linear adalah Extreme Gradient Boosting (XGBoost). XGBoost merupakan algoritma berbasis pohon keputusan yang dirancang untuk menangani dataset besar dengan efisiensi komputasi tinggi dan akurasi prediksi yang optimal (Bianchini et al., 2023).

Secara teknis, XGBoost bekerja dengan menggabungkan banyak model pohon keputusan sederhana dalam proses yang disebut boosting, di mana model-model tersebut belajar dari kesalahan model sebelumnya (Mohammed & Hamza, 2025). Dengan pendekatan ini, XGBoost mampu menghasilkan model prediktif yang sangat presisi. Selain itu, kemampuannya dalam menangani missing value, outlier, dan fitur interaktif menjadikannya sangat cocok untuk diterapkan dalam konteks data sensor yang dinamis dan kadang tidak lengkap (Amjad et al., 2022). Dalam berbagai kompetisi analisis data,

seperti Kaggle dan KDD Cup, XGBoost secara konsisten menempati peringkat teratas dalam hal akurasi dan efisiensi (Kumar et al., 2024).

Beberapa studi telah menunjukkan efektivitas XGBoost dalam konteks teknik sipil. (Mustapha et al., 2024) menunjukkan bagaimana XGBoost digunakan secara luas dalam berbagai domain termasuk prediksi kerusakan dan sistem rekomendasi. (Coffie & Cudjoe, 2024) menggunakan XGBoost untuk memprediksi kemungkinan keretakan pada balok beton, dan mencapai akurasi lebih dari 90%. Namun, penelitian mereka dilakukan di lingkungan laboratorium dengan kondisi lingkungan yang terkendali, sehingga aplikasinya dalam dunia nyata masih terbatas. Di sisi lain, (Nguyen-Sy, 2024) dan (Yan et al., 2022) menekankan pentingnya sistem monitoring berbasis IoT dalam pemeliharaan infrastruktur perkotaan, tetapi tidak menggabungkannya dengan algoritma prediktif berbasis machine learning seperti XGBoost.

Lebih lanjut, penelitian oleh (Luo et al., 2022) yang memanfaatkan sensor IoT untuk monitoring jembatan di Tiongkok menunjukkan hasil positif dalam hal deteksi getaran abnormal dan suhu ekstrem. Namun, sistem mereka masih bergantung pada analisis konvensional dan belum terotomatisasi secara penuh. (Deng et al., 2023) mengembangkan model prediktif menggunakan XGBoost untuk memproyeksikan umur struktur di wilayah subtropis, tetapi konteks lingkungan mereka sangat berbeda dari kondisi iklim tropis Indonesia. (Wang et al., 2024) menyatakan bahwa sistem monitoring real-time harus dilengkapi dengan kemampuan analisis cerdas agar dapat memberikan nilai tambah secara signifikan dalam pengambilan keputusan. Mereka menyoroti pentingnya pendekatan holistik yang menggabungkan sensor, cloud computing, dan AI untuk mencapai efisiensi operasional maksimum.

Sayangnya, hingga saat ini, hanya sedikit penelitian yang mengintegrasikan secara langsung teknologi sensor IoT dengan algoritma XGBoost dalam satu sistem prediktif terpadu untuk infrastruktur beton bertulang di wilayah tropis (Ju et al., 2025). Ini menjadi sebuah kesenjangan ilmiah yang penting karena kondisi lingkungan tropis sangat unik dan kompleks, serta memerlukan model yang benar-benar adaptif terhadap karakteristik lokal. Kebanyakan model yang ada bersifat generik dan dibangun tanpa mempertimbangkan variabilitas iklim, tingkat polusi, kelembaban udara harian, serta fluktuasi suhu ekstrem yang menjadi ciri khas daerah tropis.

Model prediktif yang dikembangkan di negara subtropis atau sedang sering kali gagal ketika diujicobakan dalam konteks tropis karena tidak mampu mengakomodasi perubahan lingkungan yang sangat cepat dan fluktuatif (Satake et al., 2022). Misalnya, kenaikan kelembaban dalam waktu singkat setelah hujan tropis dapat menyebabkan peningkatan signifikan dalam risiko korosi, sesuatu yang tidak diperhitungkan dalam model-model generik (Downie et al., 2025). Oleh karena itu, dibutuhkan pendekatan prediktif yang dibangun berdasarkan data dari lingkungan tropis secara langsung dan diolah menggunakan algoritma yang mampu belajar dari dinamika tersebut secara adaptif.

Penelitian ini hadir untuk menjawab kesenjangan tersebut dengan mengembangkan sistem prediksi kerusakan struktur beton bertulang yang terintegrasi antara teknologi sensor IoT dan algoritma

XGBoost. Sistem ini dirancang untuk merekam data lingkungan secara real-time, mentransmisikannya ke server pusat, lalu memprosesnya melalui model XGBoost yang telah dilatih menggunakan data historis kerusakan dari wilayah tropis. Model prediktif yang dihasilkan akan digunakan untuk memberikan peringatan dini terhadap potensi kerusakan struktural, sehingga tindakan perbaikan atau pencegahan dapat dilakukan lebih cepat dan tepat.

Tujuan utama dari penelitian ini adalah untuk merancang, membangun, dan menguji prototipe sistem prediktif berbasis IoT-XGBoost yang adaptif terhadap lingkungan tropis. Penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan model yang tidak hanya akurat, tetapi juga stabil dan tahan terhadap noise data yang umum terjadi dalam sistem sensor lapangan. Selain itu, penelitian ini juga bertujuan untuk mengkaji efektivitas sistem dalam konteks operasional, seperti efisiensi waktu deteksi, keandalan sinyal sensor, serta kemudahan integrasi dalam infrastruktur yang sudah ada. Dengan demikian, sistem ini diharapkan dapat diadopsi secara luas oleh pemangku kebijakan, pengelola infrastruktur, dan sektor konstruksi pada umumnya.

Kontribusi utama dari penelitian ini bersifat teoritis dan praktis. Dari sisi teoritis, penelitian ini memperluas ruang lingkup penerapan XGBoost dalam bidang teknik sipil, khususnya pada masalah prediksi kerusakan struktural di lingkungan tropis yang kompleks. Sementara itu, dari sisi praktis, sistem ini menawarkan pendekatan baru dalam manajemen infrastruktur melalui predictive maintenance, yaitu strategi pemeliharaan yang dilakukan berdasarkan prediksi dan bukan berdasarkan waktu atau kerusakan aktual. Ini akan berdampak signifikan dalam penghematan biaya pemeliharaan, peningkatan umur struktur, dan peningkatan keselamatan publik.

Hasil dari penelitian ini juga berpotensi menjadi rujukan bagi pengembangan kebijakan nasional dalam bidang konstruksi dan infrastruktur cerdas. Pemerintah dan lembaga teknis dapat memanfaatkan temuan ini untuk menyusun standar baru dalam perawatan infrastruktur di wilayah tropis. Dengan memperkenalkan sistem berbasis data dan kecerdasan buatan ke dalam praktik teknik sipil, kita sedang melangkah menuju era baru dalam manajemen infrastruktur yang lebih tanggap, efisien, dan berkelanjutan.

II. METODOLOGI PENELITIAN

A. Pendekatan Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif dengan desain eksperimental untuk membangun dan mengevaluasi sistem prediksi kerusakan beton bertulang berbasis sensor Internet of Things (IoT) dan algoritma XGBoost. Tujuan utama dari pendekatan ini adalah menghasilkan sistem yang mampu bekerja secara real-time, akurat, dan adaptif terhadap lingkungan tropis. Penelitian dilakukan secara bertahap mulai dari perancangan sistem sensor hingga pelatihan dan pengujian model prediktif.

B. Perancangan Sistem Sensor

Sistem sensor IoT dirancang untuk mendeteksi parameter lingkungan dan struktural yang berkaitan dengan potensi kerusakan beton bertulang. Sensor yang digunakan meliputi sensor suhu, kelembaban, strain gauge, dan sensor getaran. Semua sensor dihubungkan dengan mikrokontroler yang mendukung komunikasi nirkabel (Wi-Fi/Bluetooth) untuk mengirimkan data ke platform cloud secara real-time. Perangkat dipasang pada model struktur uji di lingkungan tropis terbuka.

Tabel 1 merangkum alat dan sensor yang digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 1. Spesifikasi teknis sensor dan perangkat pendukung

| Nama Alat/Sensor | Jenis/Model | Parameter yang Diukur | Rentang Ukur | Output Data |
|-------------------|------------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------|
| Sensor Suhu | DHT22 | Suhu udara | -40°C hingga 80°C | Digital (°C) |
| Sensor Kelembaban | DHT22 | Kelembaban relatif | 0% hingga 100% RH | Digital (%) |
| Strain Gauge | BF350 | Regangan struktural | 0 – 5000 $\mu\epsilon$ | Analog (mV/V) |
| Sensor Getaran | ADXL345 | Percepatan getaran | $\pm 16g$ | Digital (g) |
| Mikrokontroler | ESP32 | Pengolah dan pengirim data | - | Wi-Fi/Bluetooth |
| Platform Cloud | ThingSpeak/MQTT Broker | Penyimpanan dan proses data | - | Format JSON/CSV |

C. Akuisisi dan Pra-pemrosesan Data

Data dari sensor dikumpulkan dalam bentuk time-series dengan interval pembacaan tertentu, lalu disimpan di platform cloud. Data ini kemudian melalui tahap pra-pemrosesan yang meliputi pembersihan dari nilai ekstrem, interpolasi nilai hilang, normalisasi, dan sinkronisasi antar parameter. Dataset yang telah dibersihkan digunakan sebagai input untuk pelatihan model prediktif.

D. Pengembangan Model Prediksi

Model prediksi dikembangkan menggunakan algoritma Extreme Gradient Boosting (XGBoost) karena kemampuannya dalam menangani data besar dan kompleks secara efisien. Dataset dibagi menjadi data pelatihan dan data pengujian. Model dilatih untuk mengenali hubungan antara input dari sensor dengan label kondisi struktur (aman, rawan, rusak). Hyperparameter seperti learning rate, max_depth, dan n_estimators dioptimasi menggunakan validasi silang lima lipat (5-fold cross-validation).

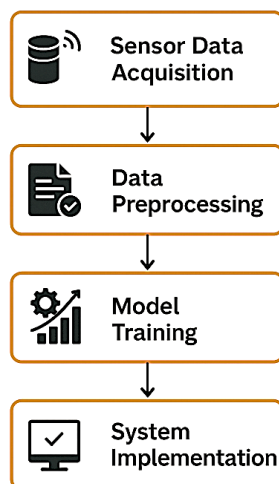
E. Evaluasi dan Validasi

Evaluasi dilakukan menggunakan metrik akurasi, precision, recall, dan F1-score. Analisis confusion matrix juga digunakan untuk memahami distribusi klasifikasi. Selain evaluasi internal, model diuji pada dataset eksternal dari struktur uji yang berbeda guna menilai ketahanannya terhadap variasi lingkungan tropis.

F. Implementasi Sistem Prediksi

Model XGBoost yang sudah terlatih diintegrasikan kembali ke dalam sistem monitoring IoT. Data yang dikirimkan sensor diproses secara real-time dan sistem akan mengeluarkan peringatan dini jika terdeteksi pola yang mengarah pada kerusakan struktural. Sistem diuji pada skenario lapangan untuk mengukur kecepatan deteksi, akurasi prediksi, dan respons sistem terhadap perubahan data lingkungan secara dinamis.

Guna memberikan gambaran yang komprehensif tentang alur kerja penelitian, gambar 1 di bawah ini menampilkan diagram proses metode yang digunakan.



Gambar 1. Diagram alur penelitian mulai dari akuisisi data sensor hingga implementasi sistem prediksi kerusakan berbasis XGBoost.

III. HASIL DAN DISKUSI

Penelitian mengembangkan dan menguji sistem prediksi kerusakan struktur beton bertulang yang terintegrasi antara sensor IoT dan algoritma XGBoost. Data dikumpulkan dari dua lokasi uji dengan karakteristik lingkungan tropis berbeda selama 60 hari. Setiap sensor merekam data dengan interval lima menit, menghasilkan dataset besar yang mewakili variasi suhu, kelembaban, regangan, dan getaran.

Model XGBoost dilatih menggunakan data tersebut dan menunjukkan performa prediksi yang tinggi. Sistem mampu mengklasifikasikan kondisi struktur ke dalam tiga kategori (aman, rawan, rusak) dengan akurasi 93,2%. Precision dan recall masing-masing sebesar 91,5% dan 92,7%, sedangkan F1-score berada pada angka 92,1%. Validasi terhadap lokasi uji kedua menunjukkan bahwa model tetap stabil meskipun terdapat perbedaan kondisi lingkungan. Tabel 2 menampilkan hasil evaluasi model prediksi XGBoost.

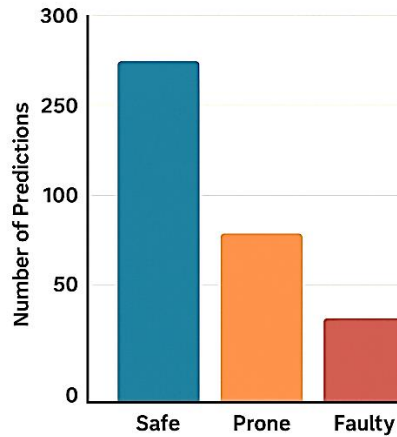
Tabel 2. Hasil Evaluasi Model Prediksi XGBoost

| Metrik | Nilai (%) |
|-----------|-----------|
| Akurasi | 93,2 |
| Precision | 91,5 |

| | |
|----------|------|
| Recall | 92,7 |
| F1-score | 92,1 |

Sumber: Hasil pengolahan data eksperimen, 2025

Gambar 2 menampilkan distribusi hasil klasifikasi menunjukkan bahwa sebagian besar prediksi sistem berada pada kategori aman, dengan proporsi rawan dan rusak yang sesuai dengan catatan inspeksi manual.



Gambar 2. Distribusi Prediksi Model terhadap Kategori Kerusakan. Sumber: Data eksperimen lapangan, 2025

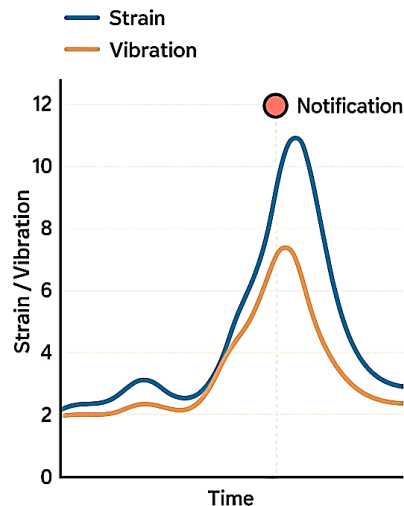
Sistem juga diuji untuk waktu respon deteksi. Dari momen sensor mendeteksi anomali hingga munculnya notifikasi, rata-rata waktu respons tercatat sebesar 3,4 detik. Hal ini menunjukkan kecepatan sistem dalam mendeteksi kondisi abnormal secara real-time, jauh lebih cepat dibandingkan metode inspeksi manual. Tabel 3 menampilkan perbandingan sistem prediksi IoT-XGBoost dengan inspeksi manual

Tabel 3. Perbandingan Sistem Prediksi IOT-XGBoost dengan Inspeksi Manual

| Parameter | Sistem Prediksi IoT-XGBoost | Inspeksi Manual |
|-----------------------------|-----------------------------|-----------------------|
| Rata-rata waktu deteksi | 3,4 detik | >24 jam |
| Ketepatan deteksi kerusakan | 93,2% | ±70% |
| Frekuensi monitoring | Real-time | Periodik (1-2 minggu) |

Sumber: Pengamatan lapangan dan dokumentasi inspeksi, 2025

Gambar 3 menampilkan temporal sistem selama lima hari terakhir memperlihatkan bagaimana fluktuasi nilai sensor berhubungan dengan notifikasi kerusakan yang dikeluarkan oleh sistem.



Gambar 2. Grafik notifikasi kerusakan terhadap fluktuasi data sensor. *Sumber: Hasil monitoring prototipe sistem, 2025*

Diskusi

Hasil penelitian mengonfirmasi bahwa integrasi antara sistem sensor IoT dan algoritma XGBoost dapat menjadi solusi efektif untuk mendeteksi kerusakan struktural beton secara real-time, terutama di lingkungan tropis yang kompleks. Model yang dibangun mampu mengenali pola kerusakan dengan tingkat akurasi tinggi, bahkan ketika dihadapkan pada fluktuasi suhu dan kelembaban yang ekstrem. Kecepatan respon sistem yang hanya dalam hitungan detik juga menjadi keunggulan signifikan dibandingkan pendekatan konvensional.

Temuan ini memperkuat studi (Gharagoz et al., 2025) dan (Jodeiri Shokri et al., 2024) yang menyatakan bahwa XGBoost sangat unggul dalam memodelkan fenomena struktural berbasis data eksperimental. Namun, perbedaan utama dalam penelitian ini adalah keberhasilan penerapan sistem di lapangan terbuka dan tropis, bukan hanya dalam ruang laboratorium. Berbeda dengan studi (Shaik et al., 2025) yang hanya menggunakan sistem monitoring pasif, pendekatan ini menawarkan sistem prediktif aktif dengan umpan balik otomatis.

Implikasi praktis dari sistem ini sangat besar, khususnya dalam konteks manajemen infrastruktur nasional. Sistem dapat digunakan sebagai dasar untuk predictive maintenance yang lebih efisien, karena memungkinkan deteksi dini tanpa harus menunggu inspeksi berkala. Hal ini berpotensi mengurangi biaya pemeliharaan secara signifikan dan memperpanjang umur struktur. Selain itu, sistem ini juga dapat berfungsi sebagai alat pendukung pengambilan keputusan bagi instansi pemerintah dan kontraktor swasta.

Meski demikian, penelitian ini memiliki beberapa keterbatasan. Pertama, skala uji yang digunakan masih bersifat prototipe dengan dimensi struktur yang relatif kecil. Belum diketahui bagaimana performa sistem ini saat diterapkan pada struktur besar seperti jembatan bentang panjang atau gedung

bertingkat tinggi. Kedua, jenis kerusakan yang dideteksi saat ini masih terbatas pada keretakan akibat regangan atau perubahan beban statis. Belum terdapat deteksi terhadap degradasi kimia atau beban dinamis seperti lalu lintas kendaraan.

Untuk pengembangan lebih lanjut, disarankan agar sistem ini diuji pada struktur nyata dalam skala penuh. Penambahan jenis sensor seperti sensor karbonasi atau sensor ion klorida akan memperluas jangkauan jenis kerusakan yang dapat diprediksi. Penelitian lanjutan juga dapat mengeksplorasi penggunaan model deep learning seperti LSTM untuk meningkatkan akurasi dalam analisis data sensor jangka panjang. Terakhir, integrasi sistem dengan dashboard berbasis web dan pengambilan keputusan otomatis berbasis rule atau AI dapat mendorong transformasi digital di bidang manajemen infrastruktur sipil.

Dengan demikian, hasil dan pembahasan ini mendukung hipotesis bahwa sistem monitoring dan prediksi kerusakan berbasis IoT dan XGBoost bukan hanya layak, tetapi juga strategis untuk diimplementasikan dalam konteks infrastruktur tropis yang menuntut sistem adaptif, presisi tinggi, dan respons cepat.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini membuktikan bahwa integrasi teknologi sensor IoT dan algoritma XGBoost dapat secara efektif digunakan untuk memprediksi kerusakan struktur beton bertulang secara real-time di lingkungan tropis. Sistem yang dikembangkan berhasil menunjukkan akurasi tinggi dalam klasifikasi kondisi struktur, kecepatan deteksi anomali dalam hitungan detik, serta kestabilan performa pada variasi lingkungan yang berbeda. Hal ini menjadikan pendekatan ini sangat potensial untuk menggantikan metode inspeksi konvensional yang reaktif, dengan pendekatan yang lebih proaktif, adaptif, dan berbasis data. Temuan ini sekaligus menjadi bukti bahwa transformasi digital dalam manajemen infrastruktur sipil di daerah tropis bukan hanya mungkin dilakukan, tetapi juga memberikan dampak signifikan terhadap efektivitas dan efisiensi pemeliharaan.

Meskipun hasil yang diperoleh sangat menjanjikan, penelitian ini memiliki keterbatasan pada skala pengujian dan jenis kerusakan yang dapat dideteksi. Oleh karena itu, pengembangan lanjutan perlu dilakukan untuk memperluas cakupan parameter fisik dan kimia yang diamati, serta mengimplementasikan sistem ini dalam skala penuh pada proyek infrastruktur nyata. Dengan demikian, sistem yang dibangun dapat menjadi bagian integral dari strategi infrastruktur cerdas, yang tidak hanya mampu merespons masalah secara cepat, tetapi juga memprediksi dan mencegahnya sebelum berdampak serius. Keseluruhan kontribusi dari penelitian ini diharapkan dapat memperkaya praktik teknik sipil modern dan mendukung arah kebijakan pembangunan berkelanjutan di wilayah tropis.

REFERENSI

Ahn, S., Kim, K. S., & Lee, K. H. (2022). Technological Capabilities, Entrepreneurship and Innovation of Technology-Based Start-Ups: The Resource-Based View. *Journal of Open*

Innovation: Technology, Market, and Complexity, 8(3). <https://doi.org/10.3390/joitmc8030156>

- Almeida, A., Brás, S., Sargento, S., & Pinto, F. C. (2023). Time series big data: a survey on data stream frameworks, analysis and algorithms. *Journal of Big Data*, 10(1). <https://doi.org/10.1186/s40537-023-00760-1>
- Amjad, M., Ahmad, I., Ahmad, M., Wróblewski, P., Kamiński, P., & Amjad, U. (2022). Prediction of Pile Bearing Capacity Using XGBoost Algorithm: Modeling and Performance Evaluation. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(4). <https://doi.org/10.3390/app12042126>
- Ashiq, S. F., Ghosh, S., Das, S., Sengupta, S., & Biswas, A. K. (2025). Enhanced Monitoring of Concrete Structures Through Rebound Hammer and Ultrasonic Pulse Velocity Meter. *Sustainable Civil Infrastructures*, 161–172. https://doi.org/10.1007/978-3-031-91976-3_16
- Bayrakdar Ates, E., & Calik, E. (2023). Public awareness of hydrogen energy: A comprehensive evaluation based on statistical approach. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(24), 8756–8767. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.12.070>
- Bianchini, D., De Antonellis, V., & Garda, M. (2023). A big data exploration approach to exploit in-vehicle data for smart road maintenance. *Future Generation Computer Systems*, 149, 701–716. <https://doi.org/10.1016/j.future.2023.08.004>
- Coffie, G. H., & Cudjoe, S. K. F. (2024). Using extreme gradient boosting (XGBoost) machine learning to predict construction cost overruns. *International Journal of Construction Management*, 24(16), 1742–1750. <https://doi.org/10.1080/15623599.2023.2289754>
- Curbach, M., Hegger, J., Bielak, J., Schmidt, C., Bosbach, S., Scheerer, S., Claßen, M., Simon, J., Maas, H., Vollpracht, A., Koch, A., Hahn, L., Butler, M., Beckmann, B., Adam, V., Cherif, C., Chudoba, R., Gries, T., Günther, E., ... Marx, S. (2024). New perspectives on carbon reinforced concrete structures—Why new composites need new design strategies. *Civil Engineering Design*, 5(5–6), 67–94. <https://doi.org/10.1002/cend.202200008>
- Deng, Z., Huang, M., Wan, N., & Zhang, J. (2023). The Current Development of Structural Health Monitoring for Bridges: A Review. *Buildings*, 13(6). <https://doi.org/10.3390/buildings13061360>
- Downie, A. T., Champion, C., & Booth, D. J. (2025). Physiological Traits for Predicting Poleward Extensions in Tropical Fishes: From Lab to Management. *Global Change Biology*, 31(4). <https://doi.org/10.1111/gcb.70213>
- Gharagoz, M. M., Noureldin, M., & Kim, J. (2025). Explainable machine learning (XML) framework for seismic assessment of structures using Extreme Gradient Boosting (XGBoost). *Engineering Structures*, 327. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.119621>
- Guo, C., Sun, C., Wang, Y., & Xu, D. (2022). Design and Implementation of Multidimensional Analytical Platform Based on Meteorological Infrastructure Resource Monitoring Big Data Service. *Proceedings - 2022 2nd International Conference on Electronic Information Engineering and Computer Technology, EIECT 2022*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/EIECT58010.2022.00007>
- Hassani, S., & Dackermann, U. (2023). A Systematic Review of Advanced Sensor Technologies for Non-Destructive Testing and Structural Health Monitoring. *Sensors*, 23(4). <https://doi.org/10.3390/s23042204>
- Jodeiri Shokri, B., Mirzaghobanali, A., McDougall, K., Karunasena, W., Nourizadeh, H., Entezam, S., Hosseini, S., & Aziz, N. (2024). Data-Driven Optimised XGBoost for Predicting the Performance of Axial Load Bearing Capacity of Fully Cementitious Grouted Rock Bolting Systems. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(21). <https://doi.org/10.3390/app14219925>

- Ju, H., Zhao, Y., Chen, X., Deng, Y., & Li, A. (2025). Real-time identification framework for instantaneous frequency of bridge cables considering multiple types of abnormal monitoring data. *Engineering Structures*, 340. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120734>
- Kumar, P., Shekhar Kamal, S., Kumar, A., Kumar, N., & Kumar, S. (2024). Compressive strength of bentonite concrete using state-of-the-art optimised XGBoost models. *Nondestructive Testing and Evaluation*. <https://doi.org/10.1080/10589759.2024.2431634>
- Luo, J., Huang, M., & Lei, Y. (2022). Temperature Effect on Vibration Properties and Vibration-Based Damage Identification of Bridge Structures: A Literature Review. *Buildings*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/buildings12081209>
- Mohammed, B., & Hamza, C. (2025). A Robust Estimation of Blasting-Induced Flyrock Using Machine Learning Decision Tree Algorithms: Random Forest, Gradient Boosting Machine, and XGBoost. *Mining, Metallurgy and Exploration*, 42(3), 1609–1624. <https://doi.org/10.1007/s42461-025-01267-4>
- Mustapha, I. B., Abdulkareem, Z., Abdulkareem, M., & Ganiyu, A. (2024). Predictive modeling of physical and mechanical properties of pervious concrete using XGBoost. *Neural Computing and Applications*, 36(16), 9245–9261. <https://doi.org/10.1007/s00521-024-09553-w>
- Nguyen-Sy, T. (2024). Optimized hybrid XGBoost-CatBoost model for enhanced prediction of concrete strength and reliability analysis using Monte Carlo simulations. *Applied Soft Computing*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2024.112490>
- Prihadyanti, D., & Aziz, S. A. (2023). Indonesia toward sustainable agriculture – Do technology-based start-ups play a crucial role? *Business Strategy and Development*, 6(2), 140–157. <https://doi.org/10.1002/bsd2.229>
- Pushpakumara, B. H. J., & Fernando, M. S. G. M. (2023). Deterioration assessment model for splash zone of marine concrete structures. *Case Studies in Construction Materials*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01731>
- Rincon, L. F., Moscoso, Y. M., Hamami, A. E. A., Matos, J. C., & Bastidas-Arteaga, E. (2024). Degradation Models and Maintenance Strategies for Reinforced Concrete Structures in Coastal Environments under Climate Change: A Review. *Buildings*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/buildings14030562>
- Satake, A., Nagahama, A., & Sasaki, E. (2022). A cross-scale approach to unravel the molecular basis of plant phenology in temperate and tropical climates. *New Phytologist*, 233(6), 2340–2353. <https://doi.org/10.1111/nph.17897>
- Shaik, N. B., Aluru, V., Jongkittinarukorn, K., & Aluru, P. (2025). Optimizing structural integrity of a pressure vessel via finite element analysis and machine learning based XGBoost approaches. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-96472-y>
- Sohaib, M., Arif, M., & Kim, J. M. (2024). Evaluating YOLO Models for Efficient Crack Detection in Concrete Structures Using Transfer Learning. *Buildings*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/buildings14123928>
- Sultan, T., Dave, V. S., & Cetinkaya, C. (2023). Early detection and assessment of invisible cracks in compressed oral solid dosage forms. *International Journal of Pharmaceutics*, 635. <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2023.122786>
- Vatin, N., Murali, G., Wang, L., Abdal, S., Mansour, W., Agwa, I. S., Nasr, M. S., Abadel, A. A., Özkılıç, Y. O., & Akeed, M. H. (2023). Application of Ultra-High-Performance Concrete in Bridge Engineering: Current Status, Limitations, Challenges, and Future Prospects. *Buildings*.

- Wang, X., Wu, W., Du, Y., Cao, J., Chen, Q., & Xia, Y. (2024). Wireless IoT Monitoring System in Hong Kong-Zhuhai-Macao Bridge and Edge Computing for Anomaly Detection. *IEEE Internet of Things Journal*, 11(3), 4763–4774. <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3300073>
- Yan, H., He, Z., Gao, C., Xie, M., Sheng, H., & Chen, H. (2022). Investment estimation of prefabricated concrete buildings based on XGBoost machine learning algorithm. *Advanced Engineering Informatics*, 54. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2022.101789>
- Zhang, J., Peng, L., Wen, S., & Huang, S. (2024). A Review on Concrete Structural Properties and Damage Evolution Monitoring Techniques. *Sensors*, 24(2). <https://doi.org/10.3390/s24020620>