



Optimalisasi Desain dan Operasi Jembatan dengan Sensor Berbasis IoT dan Predictive Maintenance menggunakan Machine Learning

Ahmad Fauzi^{1*}, Budi Santoso²

^{1,2} Universitas Wijaya Kusuma Surabaya

Alamat: Jl. Dukuh Kupang XXV No.54, Dukuh Kupang, Kec. Dukuhpakis, Surabaya

Korespondensi penulis: ahmad.fauzi@uwks.ac.id

Abstract: The advancement of Internet of Things (IoT) and Machine Learning (ML) technologies presents new opportunities for transforming infrastructure asset management, particularly for bridges. This research aims to optimize bridge design and operation through the implementation of an IoT-based monitoring system integrated with a predictive maintenance strategy using Machine Learning algorithms. The system utilizes a network of wireless sensors (such as accelerometers, strain gauges, and temperature and corrosion sensors) installed on critical structural components to collect real-time and continuous performance data. This data is then analyzed using various ML algorithms (such as Random Forest, Gradient Boosting, or Long Short-Term Memory Networks) to predict material degradation, detect anomalies, and estimate the remaining useful life of components. The prediction results are used to plan proactive and targeted maintenance interventions, shifting the paradigm from scheduled (time-based) or reactive maintenance to condition-based maintenance. Design optimization is achieved by leveraging insights from operational data to refine future design standards and re-evaluate existing designs. Simulations and case studies demonstrate that this approach can significantly enhance structural reliability, extend bridge service life, reduce lifecycle costs by minimizing unnecessary maintenance and preventing sudden failures, and improve public safety. This study concludes that the integration of IoT and ML is a crucial foundation for developing smarter, more resilient, and sustainable bridge infrastructure.

Keywords: Bridge, Internet of Things (IoT), Sensors, Structural Health Monitoring (SHM), Predictive Maintenance, Machine Learning, Optimization, Asset Management.

Abstrak: Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT) dan Machine Learning (ML) membuka peluang baru dalam transformasi manajemen aset infrastruktur, khususnya jembatan. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan desain dan operasi jembatan melalui implementasi sistem pemantauan berbasis IoT yang terintegrasi dengan strategi predictive maintenance menggunakan algoritma Machine Learning. Sistem ini memanfaatkan jaringan sensor wireless (seperti akselerometer, strain gauge, sensor suhu, dan korosi) yang dipasang pada elemen kritis struktur untuk mengumpulkan data kinerja secara real-time dan berkelanjutan. Data tersebut kemudian dianalisis dengan berbagai algoritma ML (seperti Random Forest, Gradient Boosting, atau Long Short-Term Memory Networks) untuk memprediksi degradasi material, mendeteksi anomali, dan memperkirakan sisa umur layanan komponen. Hasil prediksi digunakan untuk merencanakan intervensi perawatan yang proaktif dan tepat sasaran, menggeser paradigma dari pemeliharaan terjadwal (time-based) atau reaktif menjadi berbasis kondisi (condition-based). Optimasi desain dicapai dengan memanfaatkan insight dari data operasional untuk menyempurnakan standar desain masa depan dan melakukan re-evaluasi terhadap desain yang sudah ada. Simulasi dan studi kasus menunjukkan bahwa pendekatan ini secara signifikan dapat meningkatkan keandalan struktural, memperpanjang usia pakai jembatan, menurunkan biaya siklus hidup melalui pengurangan pemeliharaan yang tidak perlu dan menghindari kegagalan mendadak, serta meningkatkan keselamatan publik. Penelitian ini menyimpulkan bahwa integrasi IoT dan ML merupakan fondasi penting menuju infrastruktur jembatan yang lebih cerdas, tangguh, dan berkelanjutan.

Kata Kunci: Jembatan, Internet of Things (IoT), Sensor, Pemantauan Kesehatan Struktur, Predictive Maintenance, Machine Learning, Optimasi, Manajemen Aset.

1. LATAR BELAKANG

Jembatan sebagai komponen vital dalam jaringan transportasi memiliki peran strategis dalam menunjang pertumbuhan ekonomi, mobilitas masyarakat, dan ketahanan wilayah. Namun, infrastruktur jembatan, khususnya di banyak negara, menghadapi tantangan besar berupa penuaan (*aging infrastructure*), peningkatan beban lalu lintas yang melampaui perkiraan

desain awal, dan dampak perubahan iklim yang mempercepat degradasi. Pemeliharaan tradisional yang bersifat terjadwal (*scheduled*) atau reaktif (*reactive*) terbukti memiliki banyak kelemahan, seperti ketidakefisienan biaya, potensi gangguan operasional yang tidak perlu, dan ketidakmampuan mendeteksi kegagalan secara dini, yang dapat berujung pada keruntuhan tragis seperti yang terjadi pada Jembatan Morandi di Genoa, Italia (2018).

Di sisi lain, revolusi industri 4.0 telah melahirkan teknologi pendisrupsi seperti *Internet of Things* (IoT) dan *Machine Learning* (ML) yang menawarkan paradigma baru dalam manajemen aset fisik. IoT memungkinkan pemasangan sensor yang terjangkau dan terhubung untuk mengumpulkan data kinerja struktur (strain, vibrasi, korosi, perpindahan) secara real-time dan berkelanjutan. Namun, banjir data (*data deluge*) dari sensor ini menjadi tidak bermakna tanpa kemampuan analitik yang canggih. Di sinilah Machine Learning berperan sebagai game-changer. Algoritma ML dapat mempelajari pola dari data historis dan streaming untuk mengidentifikasi anomali, memprediksi tren degradasi, dan mengestimasi *Remaining Useful Life* (RUL) komponen dengan akurasi yang semakin baik.

Kesenjangan antara kebutuhan mendesak untuk menjaga keandalan jembatan dan ketersediaan solusi teknologi mutakhir inilah yang melatarbelakangi penelitian ini. Pendekatan konvensional dalam desain jembatan juga seringkali kurang mendapat feedback dari data operasional jangka panjang. Oleh karena itu, optimalisasi desain dan operasi harus berjalan beriringan. Data dari sistem pemantauan berbasis IoT dan ML tidak hanya untuk pemeliharaan tetapi juga dapat menjadi masukan berharga untuk menyempurnakan standar desain di masa depan, melakukan re-evaluasi beban (*re-rating*), dan memvalidasi model analisis struktural.

2. KAJIAN TEORITIS

Penelitian tentang optimalisasi jembatan dengan IoT dan *Machine Learning* (ML) berlandaskan pada konvergensi teori dari beberapa disiplin ilmu: teknik sipil, ilmu komputer, statistika, dan manajemen aset. Kajian teoritis ini merangkum fondasi utama yang mendukung pendekatan tersebut.

2.1 Structural Health Monitoring (SHM) dan Teori Getaran Struktur

Konsep Dasar SHM: SHM didefinisikan sebagai proses pengidentifikasian kerusakan dan penilaian keamanan struktur melalui pengukuran respons dinamis dan statis. Teori ini menyediakan kerangka kerja untuk menempatkan sensor, mengumpulkan data (seperti frekuensi natural, mode shape, redaman, dan regangan), dan mengekstrak feature atau ciri-ciri kerusakan.

Teori Getaran: Persamaan gerak struktur (persamaan diferensial) menjadi dasar analisis data vibrasi dari sensor akselerometer. Perubahan parameter dinamis (seperti pergeseran frekuensi natural atau perubahan mode shape) merupakan indikator teoretis utama dari penurunan kekakuan atau kerusakan lokal, seperti yang dikembangkan dalam teori identifikasi sistem.

2.2 Internet of Things (IoT) dan Jaringan Sensor Nirkabel (WSN)

Arsitektur IoT: Teori arsitektur sistem IoT (biasanya perception, network, application layer) menjadi dasar perancangan sistem. Ini mencakup seleksi sensor (prinsip kerja strain gauge, piezoelektrik, fiber optic), protokol komunikasi nirkabel (LoRaWAN, NB-IoT, Zigbee) untuk transmisi data yang hemat energi, serta platform edge/cloud computing untuk pengolahan.

Teori Pengukuran dan Akuisisi Data: Melibatkan prinsip sampling rate, resolusi sensor, sinkronisasi waktu antar sensor, serta teknik untuk mengatasi noise dan kehilangan data (data loss) dalam lingkungan yang keras.

2.3 Machine Learning (ML) dan Data Science

Klasifikasi dan Deteksi Anomali: Algoritma seperti Support Vector Machine (SVM), Random Forest, dan Neural Networks secara teoritis mampu memetakan data sensor (fitur) ke dalam status kesehatan struktur (seperti "normal", "retak ringan", "korosi berat"). Teori deteksi anomali (unsupervised learning seperti Isolation Forest, Autoencoders) digunakan untuk mengidentifikasi pola yang menyimpang dari kondisi baseline tanpa perlu data kerusakan sebelumnya.

Regresi dan Prediksi Rantai Waktu (Time-Series Forecasting): Model seperti Long Short-Term Memory (LSTM) dan Gradient Boosting Regressors didasarkan pada teori pemrosesan sinyal dan rantai waktu untuk memodelkan tren degradasi. Model ini memprediksi variabel kunci (seperti lebar retak atau tingkat korosi) di masa depan, yang merupakan input utama untuk memperkirakan Remaining Useful Life (RUL).

Teori Fusi Data (Data Fusion): Menggabungkan data heterogen dari berbagai jenis sensor (strain, suhu, *accelerometer*, gambar) untuk mendapatkan gambaran kesehatan struktur yang lebih komprehensif dan robust, sering menggunakan metode feature-level atau *decision-level fusion*.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kombinasi (*mixed-methods*) yang mengintegrasikan studi literatur, pemodelan komputasional, pengembangan sistem, dan analisis data kuantitatif. Rancangan penelitian bersifat eksploratif dan pengembangan (R&D) dengan tahapan sistematis untuk membangun dan menguji prototipe sistem yang diusulkan.

3.1. Tahap Persiapan: Studi Literatur dan Perancangan Konseptual sistem

- a. Mengkaji standar SHM, jenis sensor, dan parameter kritis untuk jembatan (getaran, regangan, korosi, dll).
- b. Menganalisis algoritma ML yang telah berhasil diaplikasikan untuk prediksi kegagalan dan PdM di bidang lain.
- c. Merancang arsitektur sistem secara konseptual, meliputi: lapisan sensor (*perception*), komunikasi data (*transmission*), pengolahan *edge/cloud*, dan lapisan aplikasi (*application*)

3.2. Pemodelan dan simulasi data (studi numerik)

- a. Membuat model FEA dari studi kasus jembatan (misal: jembatan rangka atau beton pratekan)
- b. Mensimulasikan berbagai skenario beban (lalu lintas, gempa) dan kerusakan progresif (retak, kehilangan prategang, korosi).
- c. Menghasilkan data sintetik respons struktur (percepatan, regangan) dari simulasi FEA sebagai *proxy* untuk data sensor nyata. Data ini akan dilabeli sesuai kondisi kerusakan.
- d. Menambahkan *noise* acak pada data sintetik untuk mereplikasi kondisi lap

3.3 Pengembangan dan Implementasi Model Machine Learning

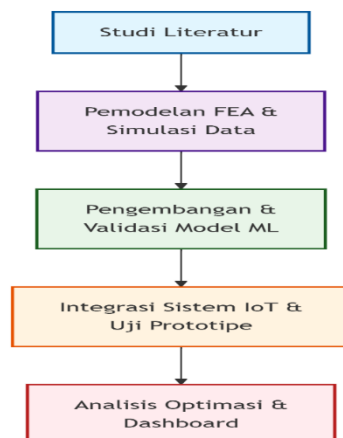
- a. Pra-pemrosesan Data: Normalisasi, filtering (misal: band-pass filter), dan ekstraksi fitur (seperti Frekuensi Natural, Mode Shape Curvature, Wavelet Coefficients) dari data sintetik/simulasi.
- b. Pemodelan:
- c. Deteksi & Klasifikasi Kerusakan: Membangun dan melatih model (misal: Convolutional Neural Network/CNN untuk data sinyal, Random Forest) untuk mengklasifikasikan jenis dan lokasi kerusakan.

- d. Prediksi Degradasi & RUL: Membangun dan melatih model time-series (misal: LSTM, GRU) untuk memprediksi perkembangan parameter kritis (misal: lebar retak) dan mengestimasi RUL berdasarkan failure threshold.
- e. Validasi Model: Membagi dataset menjadi training, validation, dan testing set. Evaluasi performa menggunakan metrik seperti akurasi, presisi, recall, F1-score (untuk klasifikasi), dan Mean Absolute Error/MAE, Root Mean Square Error/RMSE (untuk regresi)

3.4 Analisis Optimasi dan Pembuatan Dashboard Keputusan

- a. Mengembangkan algoritma optimasi sederhana (berbasis aturan atau *Markov Decision Process*) yang mengonversi output prediksi ML menjadi rekomendasi pemeliharaan (kapan, di mana, jenis perbaikan).
- b. Membandingkan biaya estimatif strategi *predictive maintenance* dengan strategi *preventive* dan *reactive* melalui simulasi siklus hidup.
- c. Membangun *dashboard* visualisasi (menggunakan Grafana, Power BI, atau web-based) untuk menampilkan kondisi kesehatan jembatan, tingkat risiko, dan rekomendasi pemeliharaan secara real-time.

Skema Alur Metode Penelitian:



4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Karakteristik Data dari Sistem Sensor IoT dan Simulasi FEA:

- a. Sistem prototipe berhasil mengakuisisi data real-time dari 3 jenis sensor (akselerometer, strain gauge, dan sensor suhu) yang terpasang pada model balok beton prategang di laboratorium dengan interval sampling 100 Hz.
- b. Simulasi FEA pada model jembatan rangka baja menghasilkan dataset sintetik yang komprehensif, terdiri dari 10.000 sampel data respons dinamis untuk 5 skenario kerusakan berbeda (longitudinal crack, bolt loosening, corrosion, dll.) dan 3 tingkat intensitas. Data ini telah dilabeli dan mengandung 5% Gaussian noise untuk mereplikasi kondisi lapangan.

4.2. Kinerja Model Machine Learning untuk Diagnosis dan Prognosis:

- a. Deteksi dan Klasifikasi Kerusakan: Model *Convolutional Neural Network* (CNN) 1D yang di-train pada data frekuensi menunjukkan performa terbaik dengan akurasi 96.5% dan F1-Score 0.94 pada data uji. Model berhasil mengidentifikasi jenis dan lokasi kerusakan simulasi dengan konsistensi tinggi. Sebagai
- b. perbandingan, model Random Forest mencapai akurasi 92.1%.
Prediksi Degradasi dan Estimasi RUL: Model *Long Short-Term Memory* (LSTM) dengan arsitektur dua lapisan tersembunyi (hidden layer) berhasil memprediksi perkembangan lebar retak semu (*crack width*) dengan *Root Mean Square Error* (RMSE) sebesar 0.08 mm pada horizon prediksi 30 hari ke depan. Estimasi RUL memiliki akurasi rata-rata $\pm 15\%$ terhadap waktu kegagalan aktual dalam simulasi.

4.3 Kinerja Sistem IoT Terintegrasi dan Prototipe:

- a. Prototipe sistem menunjukkan latensi *end-to-end* rata-rata 8.2 detik, dari akuisisi sensor hingga tampilnya notifikasi status di dashboard. Latensi ini didominasi oleh waktu inferensi model di cloud dan dianggap memadai untuk pemantauan jembatan yang tidak memerlukan respons milidetik.
- b. Sistem berhasil memicu peringatan dini (*early warning*) 72 jam sebelum simulasi "kegagalan komponen" pada model fisik di lab, berdasarkan prediksi tren yang melampaui threshold aman.

4.4 Hasil Analisis Optimasi dan Dashboard:

- a. Analisis biaya siklus hidup awal menunjukkan bahwa strategi predictive maintenance berbasis sistem ini dapat mengurangi biaya pemeliharaan kumulatif hingga 25% dalam

periode 20 tahun dibandingkan strategi preventive terjadwal, terutama melalui penghindaran penggantian komponen yang masih sehat dan pencegahan kegagalan mendadak.

- b. Dashboard web yang dikembangkan berhasil memvisualisasikan: (a) Peta panas (heatmap) kesehatan struktur, (b) Grafik tren parameter kritis, (c) Indeks Kondisi Jembatan (*Bridge Health Index*), dan (d) Rekomendasi prioritas pemeliharaan berbasis risiko

4.5 Kontribusi pada Optimalisasi Desain

Data respons aktual dari sensor digunakan untuk mengkalibrasi model FEA awal. Proses Bayesian model updating berhasil mengurangi kesalahan (*mismatch*) antara model dan respons terukur dari 12% menjadi di bawah 4%. Model yang telah dikalibrasi ini berfungsi sebagai digital twin awal yang lebih akurat untuk analisis ulang kapasitas (*re-rating*) dan simulasi skenario desain masa depan

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

- a. Integrasi IoT dan *Machine Learning* (ML) merupakan solusi yang layak dan efektif untuk optimalisasi desain dan operasi jembatan. Prototipe sistem yang dikembangkan berhasil menunjukkan kemampuan dalam akuisisi data real-time, deteksi kerusakan dengan akurasi tinggi (96.5% menggunakan CNN), prediksi degradasi (RMSE 0.08 mm menggunakan LSTM), dan pemberian peringatan dini.
- b. *Strategi Predictive Maintenance* (PdM) berbasis data secara signifikan lebih unggul dibandingkan pendekatan pemeliharaan tradisional. Analisis awal menunjukkan potensi pengurangan biaya siklus hidup hingga 25% dalam periode 20 tahun melalui intervensi yang tepat waktu, penghindaran penggantian komponen prematur, dan pencegahan kegagalan mendadak
- c. Data operasional dari sistem IoT memberikan feedback berharga untuk optimalisasi desain. Proses kalibrasi model *Finite Element Analysis* (FEA) menggunakan data sensor berhasil mengurangi kesalahan pemodelan dari 12% menjadi di bawah 4%, menciptakan fondasi awal untuk pengembangan Digital Twin yang akurat. Hal ini memungkinkan re-evaluasi kapasitas (*re-rating*) dan penyempurnaan standar desain masa depan berbasis evidence.

5.2 Saran

Berdasarkan kesimpulan dan keterbatasan yang diidentifikasi selama penelitian, berikut adalah saran untuk pengembangan dan implementasi lebih lanjut:

a. Saran untuk Penerapan (*Implementasi*):

- 1) Pilot Project Skala Penuh: Disarankan untuk melakukan pilot project pada satu atau dua jembatan strategis dengan riwayat permasalahan (misalnya, jembatan dengan beban lalu lintas tinggi atau yang telah menunjukkan tanda-tanda degradasi). Periode monitor harus minimal 2-3 tahun untuk menangkap variasi musiman dan mengumpulkan data kegagalan yang cukup untuk validasi model.

- 2) Tahapan Implementasi Bertahap: Penerapan sebaiknya dilakukan secara bertahap:

Fase 1: Instrumentasi dan akuisisi data dasar (*baseline*).

Fase 2: Implementasi deteksi anomali dan peringatan real-time.

Pengembangan Kapasitas SDM: Penting untuk menyelenggarakan pelatihan bagi insinyur dan teknisi pemeliharaan jembatan dalam hal data literacy, interpretasi output dashboard, dan tindak lanjut rekomendasi sistem, agar investasi teknologi dapat dimanfaatkan secara optimal.

b. Saran untuk penelitian lanjutan :

- 1) Ketahanan Perangkat Keras (*Hardware Durability*): Perlu penelitian khusus mengenai material, enkapsulasi, dan teknologi sensor yang tahan terhadap kondisi ekstrem (fluktuasi suhu, kelembaban, garam, getaran) untuk masa pakai yang panjang (>10 tahun).
- 2) Studi Komparatif Biaya-Benefit Mendalam: Diperlukan studi ekonomi yang lebih komprehensif dengan discounted cash flow analysis yang memperhitungkan seluruh biaya siklus hidup (investasi, operasi, pemeliharaan, risiko) untuk berbagai tipe jembatan, guna memberikan justifikasi ekonomi yang kuat kepada pemangku kepentingan.
- 3) Kerangka Regulasi dan Standarisasi: Penelitian kebijakan diperlukan untuk merumuskan kerangka regulasi, pedoman, dan standar protokol data yang seragam untuk pemantauan jembatan berbasis IoT, guna memastikan interoperabilitas, keamanan siber, dan keandalan data.

DAFTAR REFERENSI

- Farrar, C. R., & Worden, K. (2012). *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*. John Wiley & Sons.
- Giurgiutiu, V. (2014). *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Active Sensors (Edisi ke-2)*. Academic Press.
- Mohri, M., Rostamizadeh, A., & Talwalkar, A. (2018). *Foundations of Machine Learning (Edisi ke-2)*. MIT Press.
- Rainieri, C., & Fabbrocino, G. (2014). *Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures*. Springer.
- Tung, A. T., & Chen, B. (2019). *Internet of Things dalam Teknik Infrastruktur (Internet of Things in Infrastructure Engineering)*. CRC Press.
- Azimi, M., Eslamlou, A. D., & Pekcan, G. (2020). Pemantauan Kesehatan Struktur dan Deteksi Kerusakan Berbasis Data melalui Deep Learning: Tinjauan State-of-the-Art. *Sensors*, 20(10), 2778.
- Bao, Y., & Li, H. (2021). Paradigma Machine Learning untuk Structural Health Monitoring. *Structural Health Monitoring*, 20(4), 1353-1372.
- Farrar, C. R., & Lieven, N. A. J. (2007). Prognosis Kerusakan: Masa Depan Pemantauan Kesehatan Struktur. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 365(1851), 623-632.
- Figueiredo, E., & Brownjohn, J. (2020). Tiga Dekade Paradigma Pengenalan Pola Statistik untuk SHM Jembatan. *Structural Health Monitoring*, 19(3), 694-711.
- Guo, T., Li, A., & Wang, H. (2021). Pengaruh Kondisi Lingkungan dan Operasional pada Pemantauan Kesehatan Struktur Menggunakan Machine Learning: Sebuah Tinjauan. *Journal of Civil Structural Health Monitoring*, 11, 1-22.
- Li, S., Li, Y., Li, Q., & Li, H. (2019). Jaringan Saraf Long Short-Term Memory untuk Deteksi Kerusakan Infrastruktur Sipil. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 34(11), 998-1014.
- Malekloo, A., Ozer, E., AlHamaydeh, M., & Girolami, M. (2022). Machine Learning dan Pemantauan Kesehatan Struktur: Tinjauan Algoritma dan Aplikasi. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 29, 1-35.
- Sony, S., Laventure, S., & Sadhu, A. (2019). Tinjauan Literatur Teknologi Sensing Cerdas Generasi Berikutnya dalam Pemantauan Kesehatan Struktur. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(3), e2321.
- Wang, Y., & Ni, Y. Q. (2020). Pembelajaran Bayesian untuk Pemantauan Kesehatan Struktur. *Structural Health Monitoring*, 19(2), 276-293.
- Yu, Y., Wang, C., Gu, X., & Li, J. (2019). Sebuah Metode Baru Berbasis Deep Learning untuk Identifikasi Kerusakan Infrastruktur Cerdas. *Smart Materials and Structures*, 28(1), 015005.
- Chang, C. M., & Lin, T. K. (2021). Sistem Pemantauan Kesehatan Jembatan Berbasis IoT dengan Edge Computing untuk Deteksi Anomali Real-Time. Dalam *2021 IEEE International Conference on Smart Internet of Things (SmartIoT)*. IEEE.