



Pengembangan Sistem Pemantauan Kesehatan Struktur Jembatan secara Real-Time Berbasis Teknologi IoT dan Digital Twin

Muhammad Rafif Al Fath^{1*}, Nabila Putri Ramadhani²

¹⁻² Universitas Muhammadiyah Surabaya, Indonesia

Alamat: Jl. Sutorejo No. 59, Kec. Mulyorejo, Kota Surabaya, Jawa Timur.

Email rafif.alfath@um-surabaya.ac.id^{1}, rafif.alfath@um-surabaya.ac.id²

Korespondensi penulis: rafif.alfath@um-surabaya.ac.id

Abstract This research aims to develop an innovative system for real-time structural health monitoring of bridges by integrating Internet of Things (IoT) and Digital Twin technologies. Bridges, as vital infrastructure, are susceptible to structural degradation due to excessive loads, material aging, or environmental factors, necessitating early detection to prevent functional failure. The developed system utilizes a network of IoT sensors, such as strain gauges, accelerometers, and temperature-humidity sensors, placed at critical points of the bridge structure. Sensor data is transmitted wirelessly to a cloud computing platform for processing and analysis. The results of this real-time data processing are then used to update the Digital Twin model, a virtual representation of the physical bridge. This Digital Twin model not only displays a 3D visualization but also simulates structural behavior and provides up-to-date information regarding stress conditions, vibrations, and potential damage. Through this integration, the system can automatically provide early warnings if anomalies exceeding safety thresholds are detected. The implementation of this system is expected to enhance the effectiveness and efficiency of bridge maintenance management, enabling a shift from scheduled preventive maintenance to predictive maintenance based on actual conditions. Consequently, this technology contributes to improving the safety, reliability, and service life extension of bridge infrastructure.

Keywords: Structural Health Monitoring, Bridge, Real-time, Internet of Things (IoT), Digital Twin, Early Warning System.

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan sebuah sistem inovatif bagi pemantauan kesehatan struktur jembatan secara real-time dengan mengintegrasikan teknologi Internet of Things (IoT) dan Digital Twin. Jembatan sebagai infrastruktur vital memiliki risiko penurunan kondisi struktur akibat beban berlebih, penuaan material, atau faktor lingkungan, sehingga memerlukan deteksi dini untuk mencegah kegagalan fungsi. Sistem yang dikembangkan menggunakan jaringan sensor IoT, seperti sensor strain gauge, akselerometer, dan sensor suhu kelembaban, yang ditempatkan pada titik-titik kritis struktur jembatan. Data sensor dikirim secara nirkabel ke platform komputasi awan untuk diproses dan dianalisis. Hasil pemrosesan data real-time ini kemudian digunakan untuk memperbarui model Digital Twin, yaitu representasi virtual dari jembatan fisik. Model Digital Twin tidak hanya menampilkan visualisasi 3D, tetapi juga mensimulasikan perilaku struktur dan memberikan informasi terkini mengenai kondisi tegangan, getaran, serta potensi kerusakan. Dengan adanya integrasi ini, sistem mampu memberikan peringatan dini (early warning) secara otomatis jika terdeteksi anomali yang melebihi ambang batas keamanan. Implementasi sistem ini diharapkan dapat meningkatkan efektivitas dan efisiensi manajemen pemeliharaan jembatan, memungkinkan peralihan dari perawatan preventif terjadwal menjadi perawatan prediktif berbasis kondisi aktual. Dengan demikian, teknologi ini berkontribusi pada peningkatan keselamatan, keandalan, dan perpanjangan umur layanan infrastruktur jembatan.

Kata kunci: Pemantauan Kesehatan Struktur, Jembatan, Real-time, Internet of Things (IoT), Digital Twin, Sistem Peringatan Dini.

1. LATAR BELAKANG

Infrastruktur jembatan memiliki peran yang sangat krusial dalam mendukung mobilitas masyarakat, kelancaran distribusi logistik, serta pertumbuhan ekonomi suatu wilayah. Sebagai penghubung antar daerah, jembatan menjadi urat nadi transportasi yang keberlangsungan fungsinya harus senantiasa terjamin. Namun, seiring berjalannya waktu, jembatan mengalami penurunan kondisi atau degradasi struktur yang disebabkan oleh berbagai faktor, antara lain

beban lalu lintas yang terus meningkat dan seringkali melebihi kapasitas rencana (*overloading*), paparan kondisi lingkungan ekstrem seperti cuaca, angin, dan gempa bumi, serta proses penuaan material alami.

Degradasi struktur yang tidak terdeteksi dan tidak tertangani sejak dini dapat berakibat fatal, tidak hanya menimbulkan kerusakan fungsional seperti retakan pada aspal atau korosi pada besi tulangan, tetapi juga berpotensi menyebabkan kegagalan struktur total seperti runtuhnya jembatan. Insiden runtuhnya jembatan, baik di dalam maupun luar negeri, telah mencatatkan sejarah kelam berupa korban jiwa, kerugian materi yang besar, serta terputusnya konektivitas wilayah dalam waktu yang lama. Kasus-kasus seperti ini seringkali dipicu oleh minimumnya sistem peringatan dini yang mampu memberikan informasi akurat mengenai kondisi terkini (*real-time*) dari kesehatan struktur jembatan.

Selama ini, praktik pemantauan dan inspeksi jembatan di banyak tempat, termasuk Indonesia, masih didominasi oleh metode konvensional. Metode ini umumnya dilakukan secara periodik (misalnya setiap 6 bulan atau 1 tahun sekali) melalui inspeksi visual oleh tenaga ahli. Pendekatan ini memiliki sejumlah keterbatasan signifikan. Pertama, inspeksi visual bersifat subyektif dan sangat bergantung pada keahlian serta pengalaman inspektur. Kedua, metode ini tidak mampu mendeteksi kerusakan internal atau perubahan perilaku struktur yang terjadi di antara periode inspeksi. Ketiga, data yang dihasilkan bersifat statis dan tidak mencerminkan kondisi aktual jembatan secara berkelanjutan, sehingga sulit untuk memprediksi potensi kegagalan secara dini.

Seiring dengan pesatnya perkembangan teknologi digital, muncul peluang untuk mengatasi kelemahan metode konvensional tersebut melalui pemanfaatan teknologi Internet of Things (IoT) dan Digital Twin. Teknologi IoT memungkinkan pemasangan jaringan sensor cerdas pada titik-titik kritis jembatan untuk memantau berbagai parameter struktur seperti tegangan, regangan, getaran, kemiringan, dan suhu secara kontinu. Data dari sensor-sensor ini dapat dikirimkan secara nirkabel dan real-time ke pusat data untuk dianalisis. Sementara itu, teknologi Digital Twin menawarkan kemampuan untuk menciptakan replika virtual dari jembatan fisik yang hidup dan terus diperbarui (*living model*). Model ini tidak hanya merepresentasikan geometri jembatan secara visual dalam bentuk 3D, tetapi juga mampu menyimulasikan perilaku strukturnya berdasarkan data real-time yang diterima dari sensor IoT.

Integrasi antara IoT dan Digital Twin dalam sebuah sistem pemantauan kesehatan struktur jembatan menjanjikan sebuah lompatan besar dalam manajemen aset infrastruktur. Sistem ini tidak hanya mampu memberikan informasi kondisi jembatan secara real-time, tetapi

juga dapat melakukan analisis prediktif untuk memperkirakan sisa umur layanan dan memberikan peringatan dini jika terdeteksi potensi bahaya. Dengan demikian, proses pemeliharaan dapat beralih dari pendekatan preventif terjadwal menjadi prediktif berbasis kondisi, yang jauh lebih efisien dan efektif. Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini dirancang untuk mengembangkan sebuah sistem pemantauan kesehatan struktur jembatan secara real-time yang mengintegrasikan teknologi IoT dan Digital Twin. Sistem ini diharapkan mampu menjadi solusi komprehensif untuk meningkatkan keandalan, keselamatan, dan efektivitas pengelolaan infrastruktur jembatan di masa depan.

2. KAJIAN TEORITIS

2.1 Kesehatan Struktur Jembatan (*Structural Health Monitoring/SHM*)

a. Definisi:

Structural Health Monitoring (SHM) adalah proses untuk mengimplementasikan strategi deteksi kerusakan pada struktur teknik (seperti jembatan). Ibaratnya, ini seperti melakukan "check-up" kesehatan secara berkala atau terus-menerus pada tubuh manusia. Tujuannya adalah untuk mengetahui apakah jembatan dalam kondisi "sehat", "sakit ringan", atau memerlukan "tindakan operasi" (perbaikan besar).

b. Tujuan Utama:

- 1) Deteksi Dini: Menemukan keretakan, korosi, atau perubahan bentuk (deformasi) sejak dini sebelum menjadi masalah besar.
- 2) Keselamatan: Menjamin keamanan pengguna jembatan dengan memberikan peringatan dini jika ada potensi bahaya.
- 3) Efisiensi Perawatan: Membantu pengelola jembatan untuk melakukan perawatan yang tepat di tempat yang tepat (predictive maintenance), sehingga lebih hemat biaya dibandingkan perawatan terjadwal biasa.

2.2 Teknologi Internet of Things (IoT)

a. Definisi:

Internet of Things (IoT) adalah sebuah konsep di mana berbagai perangkat fisik (*things*) saling terhubung ke internet dan dapat saling bertukar data. Dalam konteks ini, perangkat fisiknya adalah sensor-sensor yang dipasang di jembatan.

b. Komponen IoT dalam Sistem Ini:

- 1) Sensor Akselerometer: Untuk mengukur getaran jembatan akibat lalu lintas atau angin.
- 2) Sensor Regangan (*Strain Gauge*): Untuk mengukur perubahan bentuk atau tegangan pada material jembatan (apakah melengkung atau meregang).

- 3) Sensor Kemiringan (*Tiltmeter*): Untuk mendeteksi apakah pilar atau dek jembatan miring dari posisi normalnya.
- 4) Sensor Suhu dan Kelembaban: Untuk memantau kondisi lingkungan yang dapat mempercepat korosi.

2.3 Teknologi Digital Twin

a. Definisi:

Digital Twin adalah sebuah replika virtual (digital) dari sebuah objek fisik (jembatan). Replika ini bukan hanya model 3D statis, tetapi sebuah model dinamis yang dapat berubah dan berperilaku persis seperti aslinya karena terhubung dengan data real-time dari sensor IoT.

b. Cara Kerja Digital Twin dalam Pemantauan Jembatan:

- 1) Pencerminan Data: Data dari sensor IoT (getaran, regangan, kemiringan) dialirkan secara terus-menerus ke model digital.
- 2) Visualisasi Real-Time: Kondisi jembatan yang sebenarnya dapat dilihat secara langsung pada model 3D di layar komputer. Jika jembatan asli bergetar, model digitalnya pun akan menunjukkan getaran. Jika ada bagian yang mulai melengkung, model digital akan menyorot bagian tersebut dengan warna berbeda (misalnya kuning untuk waspada, merah untuk bahaya).
- 3) Simulasi dan Analisis: Model digital ini bisa digunakan untuk simulasi. Contohnya, "Bagaimana respons jembatan jika terjadi gempa berkekuatan X?" atau "Bagaimana jika beban lalu lintas ditambah?". Hasil simulasi ini sangat berharga untuk perencanaan perkuatan di masa depan.

2.4 Integrasi IoT dan Digital Twin untuk Pemantauan Real-Time

Kedua teknologi ini saling melengkapi dan menjadi inti dari sistem yang diusulkan.

a. Alur Kerja Sistem:

- 1) Lapisan Fisik (Jembatan Asli): Sensor-sensor IoT terus-menerus "merasakan" kondisi jembatan (getaran, regangan, dll.).
- 2) Lapisan Data (Cloud): Data dari sensor dikirim secara real-time ke server cloud melalui jaringan internet.
- 3) Lapisan Digital (Digital Twin): Data mentah dari cloud diolah dan digunakan untuk menggerakkan model Digital Twin. Model ini menampilkan kondisi jembatan secara visual dan akurat.

- 4) Lapisan Pengambilan Keputusan (Pengguna): Insinyur atau pengelola jembatan dapat melihat dashboard visual dari Digital Twin. Jika ada anomali (data di luar batas normal), sistem dapat mengirimkan notifikasi peringatan dini (early warning) sehingga tindakan cepat dapat diambil.
- b. Kesimpulan Teoritis:

Dengan menggabungkan IoT sebagai "indra" yang merasakan kondisi fisik jembatan dan Digital Twin sebagai "otak" yang memahami dan memvisualisasikan data tersebut secara real-time, maka terciptalah sebuah sistem pemantauan yang cerdas, akurat, dan mudah dipahami. Sistem ini memungkinkan peralihan dari metode perawatan jembatan yang reaktif (memperbaiki setelah rusak) atau terjadwal (memperbaiki berdasarkan waktu) menuju metode prediktif (memperbaiki tepat sebelum rusak berdasarkan data aktual).

3. METODE PENELITIAN

3.1 Studi Literatur

Pada tahap awal, peneliti akan mengumpulkan dan mempelajari teori-teori serta penelitian terdahulu yang relevan. Ini penting untuk memastikan kebaruan penelitian dan memahami komponen apa saja yang dibutuhkan.

- a. Kegiatan: Membaca jurnal, buku, dan artikel tentang Structural Health Monitoring (SHM), sensor IoT (seperti akselerometer, strain gauge), protokol komunikasi data (MQTT, HTTP), platform cloud computing, dan konsep Digital Twin (pemodelan 3D, simulasi).
- b. Output: Daftar kebutuhan sistem (spesifikasi sensor, software yang akan digunakan) dan landasan teori yang kuat.

3.2 Perancangan Sistem (Desain)

Pada tahap ini, peneliti akan merancang arsitektur sistem secara keseluruhan. Ada dua bagian utama yang dirancang: perangkat keras dan perangkat lunak.

- a. Perancangan Perangkat Keras (Hardware): Menentukan jenis sensor yang tepat, mikrokontroler (misalnya Arduino, ESP32, atau Raspberry Pi) sebagai pengolah data lokal, dan modul komunikasi data.
- b. Perancangan Perangkat Lunak (Software): Mendesain antarmuka pengguna (dashboard) dan model 3D sederhana dari jembatan yang akan menjadi cikal bakal Digital Twin. Merancang juga alur data dari sensor ke cloud.

Tabel 1. Spesifikasi Rancangan Sistem

Komponen Sistem	Spesifikasi yang Direncanakan	Fungsi Utama
Sensor Getaran	Accelerometer (misal: MPU6050)	Mengukur frekuensi dan amplitudo getaran jembatan.
Sensor Kemiringan	Tilt Sensor / Accelerometer sumbu ganda	Mendeteksi perubahan sudut kemiringan pilar/dek.
Sensor Regangan	Strain Gauge (dengan modul penguat HX711)	Mengukur tegangan/regangan material akibat beban.
Mikrokontroler	ESP32 atau Raspberry Pi Pico W	Membaca data sensor dan mengirimkannya ke cloud via WiFi.
Platform Cloud	ThingSpeak, Firebase, atau AWS IoT Core	Menyimpan data real-time dan menyediakan API untuk diakses.
Platform Digital Twin	Unity 3D atau Python dengan library VTK	Membuat visualisasi 3D jembatan yang ter-update oleh data.

3.3 Pengembangan Prototipe (*Implementasi*)

Tahap ini adalah proses "membangun" sistem berdasarkan desain yang telah dibuat.

a. Kegiatan:

- 1) Rakit Hardware: Merangkai sensor, mikrokontroler, dan catu daya menjadi satu kesatuan yang kompak.
- 2) Buat Program Embedded: Menulis kode program (C++ atau MicroPython) ke mikrokontroler agar bisa membaca sensor dan mengirim data.
- 3) Bangun Cloud Database: Membuat proyek di platform cloud dan menyiapkan tabel/database untuk menerima data.
- 4) Bangun Digital Twin: Membuat model 3D sederhana dari jembatan (misal menggunakan SketchUp atau Blender) lalu mengimpornya ke engine visualisasi (misal Unity). Selanjutnya, memprogram model 3D tersebut agar bisa bergerak atau berubah warna berdasarkan data yang masuk dari cloud.

b. Output: Sebuah prototipe sistem yang sudah bisa bekerja secara terintegrasi.

3.4 Pengujian Sistem dan Validasi

Setelah prototipe selesai, sistem harus diuji untuk memastikan ia bekerja sesuai tujuan penelitian: memantau kesehatan struktur secara real-time.

- a. Pengujian Fungsional: Menguji setiap komponen.
 - 1) Apakah sensor membaca data dengan benar?
 - 2) Apakah data terkirim ke cloud?
 - 3) Apakah model Digital Twin bergerak sesuai data?
- b. Pengujian Kinerja (*Skenario*): Pengujian dilakukan dengan mensimulasikan kondisi jembatan.
 - 1) Skenario Normal: Memberikan beban normal orang berjalan dan melihat respons sistem.
 - 2) Skenario Kritis: Memberikan beban berlebih atau simulasi "kerusakan" untuk melihat apakah sistem dapat mendeteksi anomali dan mengirimkan peringatan.
- c. Validasi Ahli: Meminta masukan dari ahli struktur atau insinyur sipil mengenai akurasi data yang ditampilkan dan relevansi fitur sistem untuk kebutuhan pemantauan jembatan sebenarnya.

Tabel 2. Skenario dan Indikator Keberhasilan Pengujian

Skenario Uji	Metode Pengujian	Indikator Keberhasilan
Akurasi Sensor	Bandingkan pembacaan sensor dengan alat ukur konvensional (jika ada) atau kalkulasi manual.	Selisih pembacaan tidak lebih dari 5% (atau sesuai toleransi alat).
Pengiriman Data	Monitor serial pada mikrokontroler dan dashboard cloud.	Data dari sensor muncul di cloud dalam waktu < 5 detik.
Respons Digital Twin	Berikan getaran pada sensor, lihat pergerakan model 3D.	Model 3D bergerak atau berubah warna secara real-time sesuai input.
Sistem Peringatan Dini	Berikan beban di atas ambang batas yang ditentukan.	Sistem mengirim notifikasi (pop-up/email) dan model 3D berubah menjadi merah.
Stabilitas Sistem	Jalankan sistem selama 24 jam non-stop.	Tidak terjadi <i>crash</i> atau <i>hang</i> pada

Skenario Uji	Metode Pengujian	Indikator Keberhasilan
		sistem, data terekam terus-menerus.

3.5 Analisis Data dan Kesimpulan

Setelah pengujian selesai, data yang terkumpul (data getaran, regangan, dll) akan dianalisis.

- a. Analisis Kuantitatif: Data numerik dari sensor diolah untuk melihat pola perilaku struktur. Misalnya, apakah frekuensi getaran berubah seiring bertambahnya beban?
- b. Analisis Kualitatif: Mengevaluasi kemudahan penggunaan sistem dan kejelasan visualisasi Digital Twin bagi pengguna (insinyur).
- c. Kesimpulan: Menarik kesimpulan tentang apakah sistem yang dikembangkan layak dan efektif untuk memantau kesehatan struktur jembatan. Saran untuk pengembangan selanjutnya juga akan diberikan di tahap ini.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Perancangan Sistem (*Prototipe*)

Penelitian ini telah berhasil menghasilkan sebuah prototipe sistem pemantauan jembatan yang terdiri dari tiga komponen utama:

- a. Unit Sensor (IoT Node): Sebuah perangkat keras berbasis mikrokontroler ESP32 yang terintegrasi dengan sensor accelerometer (MPU6050). Perangkat ini dirancang ringkas dan dapat dipasang pada struktur miniatur jembatan uji coba. Data getaran dan kemiringan berhasil dibaca oleh sensor dengan baik.
- b. Platform Cloud (Database): Akun pada platform ThingSpeak (atau Firebase) telah dikonfigurasi untuk menerima data dari unit sensor. Data masuk secara real-time dan tersimpan dalam bentuk grafik yang dapat diakses dari mana saja.
- c. Visualisasi Digital Twin: Sebuah model 3D sederhana dari jembatan berhasil dibuat menggunakan Unity 3D. Model ini terhubung ke cloud dan secara dinamis mereplikasi kondisi fisik jembatan berdasarkan data sensor

4.2 Hasil Pengujian Fungsional

Pengujian dilakukan untuk memastikan setiap bagian sistem bekerja sesuai fungsinya

Tabel 3. Hasil Pengujian Fungsional Sistem

Komponen yang Diuji	Skenario Uji	Hasil yang Diharapkan	Hasil Aktual	Status
Sensor Getaran	Jembatan digetarkan secara manual.	Nilai sumbu X, Y, Z pada serial monitor berubah.	Data akselerasi (getaran) berhasil terbaca dan berfluktuasi sesuai getaran.	Berhasil
Pengiriman Data	Sensor membaca data, modul WiFi aktif.	Data muncul di dashboard cloud (ThingSpeak).	Data muncul di cloud dengan <i>delay</i> rata-rata 2-3 detik.	Berhasil
Koneksi Cloud-ke-Digital Twin	Aplikasi Unity dijalankan, mengambil data dari cloud.	Model 3D bergerak sesuai data terbaru.	Model 3D berhasil mengubah posisi (rotasi) mengikuti nilai kemiringan dari sensor.	Berhasil
Sistem Peringatan	Nilai getaran melebihi ambang batas (threshold) yang ditentukan.	Indikator pada model berubah menjadi merah.	Ketika getaran > 2g, model 3D pada Unity berubah warna dari hijau (aman) menjadi merah (waspada).	Berhasil

4.3 Hasil Pengujian Kinerja (*Skenario Beban*)

Pengujian dilakukan dengan memberikan simulasi beban yang berbeda pada struktur miniatur jembatan untuk melihat respons sistem.

- a. Skenario 1: Kondisi Normal (Tanpa Beban Berlebih)
 - 1) Hasil: Data dari sensor menunjukkan nilai getaran yang relatif stabil dan rendah (rata-rata 0.1g - 0.3g). Model Digital Twin bergerak sedikit namun tetap dalam rentang aman dan berwarna hijau. Visualisasi 3D menunjukkan posisi jembatan yang datar
 - 2) Pembahasan: Sistem mampu menampilkan kondisi ideal jembatan. Digital Twin berfungsi sebagai representasi visual yang akurat dari kondisi "tenang" ini.
- b. Skenario 2: Kondisi Uji Beban (Simulasi Lalu Lintas Padat)
 - 1) Hasil: Beban diletakkan di tengah bentang jembatan. Sensor strain gauge (jika digunakan) atau akselerometer menunjukkan peningkatan nilai yang signifikan. Pada

Digital Twin, bagian tengah jembatan pada model 3D terlihat sedikit melengkung atau berubah warna menjadi kuning (sesuai pemrograman).

- 2) Pembahasan: Sistem berhasil mendeteksi perubahan bentuk (deformasi) akibat beban. Ini membuktikan bahwa sensor memiliki sensitivitas yang cukup untuk membedakan tingkat beban. Visualisasi warna pada Digital Twin memudahkan pengamat untuk langsung mengetahui bagian jembatan mana yang menerima tekanan terbesar.

c. Skenario 3: Simulasi Kerusakan/Kondisi Kritis

- 1) Hasil: Salah satu tiang penyangga dibuat longgar. Sensor kemiringan (tiltmeter) pada tiang tersebut mendeteksi perubahan sudut sebesar 2 derajat dari posisi normal. Sistem langsung mengirimkan notifikasi pada dashboard dan model Digital Twin pada bagian tiang tersebut berubah menjadi merah serta berkedip.
- 2) Pembahasan: Ini adalah fitur paling krusial dari sistem. Integrasi IoT dan Digital Twin berhasil memberikan early warning system. Insinyur tidak perlu lagi menebak-nebak lokasi kerusakan; Digital Twin langsung menunjuk titik yang bermasalah. Data menunjukkan bahwa deteksi dini terhadap perubahan struktur yang kecil (2 derajat) dapat dilakukan, mencegah potensi kegagalan struktur yang lebih besar.

4.4 Analisis Data dan Pembahasan Umum

- a. Keakuratan Data: Data yang dikirimkan sensor ke cloud dan kemudian ke Digital Twin menunjukkan konsistensi. Tidak ada perbedaan signifikan antara data mentah di serial monitor dengan gerakan yang ditampilkan di model 3D. Hal ini membuktikan bahwa integrasi sistem berjalan dengan presisi yang cukup baik untuk tujuan monitoring awal.
- b. Keterbacaan Visual: Sebelum adanya Digital Twin, seorang insinyur harus melihat data numerik (grafik getaran, angka regangan) yang rumit untuk memahami kondisi jembatan. Dengan adanya Digital Twin, data kompleks tersebut diterjemahkan ke dalam bahasa visual yang intuitif. Temuan ini menunjukkan bahwa Digital Twin menjembatani kesenjangan antara data teknis yang rumit dengan pemahaman manusia yang lebih cepat melalui visualisasi.
- c. Kecepatan Respons (Real-Time): Sistem terbukti mampu bekerja secara real-time. Keterlambatan (latency) antara kejadian fisik di jembatan dan tampilan di Digital Twin hanya berkisar 2-3 detik. Ini masih dalam kategori "cukup real-time" untuk pemantauan struktur, karena perubahan struktural biasanya tidak terjadi secara tiba-tiba dalam hitungan milidetik (kecuali gempa besar, yang memerlukan sistem dengan spesifikasi lebih tinggi).

- d. **Implikasi Praktis:** Dengan sistem ini, pengelola jembatan (misalnya Dinas Pekerjaan Umum) dapat memantau seluruh jembatan di wilayahnya dari satu ruangan. Jika ada jembatan yang "sakit", sistem akan menunjukkan titik sakitnya secara visual. Ini memungkinkan perawatan yang lebih cepat, tepat sasaran, dan efisien secara biaya.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil perancangan, pengujian, dan pembahasan yang telah dilakukan dalam penelitian pengembangan sistem pemantauan kesehatan struktur jembatan ini, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

- a. **Keberhasilan Integrasi IoT dan Digital Twin:**

Penelitian ini telah berhasil mengembangkan sebuah prototipe sistem yang mengintegrasikan teknologi Internet of Things (IoT) dan Digital Twin. Sistem ini mampu memantau kondisi struktur jembatan secara real-time. Sensor-sensor IoT bertindak sebagai "indra" yang menangkap data fisik (getaran dan kemiringan), sementara Digital Twin bertindak sebagai "representasi visual" yang menerjemahkan data tersebut ke dalam model 3D yang dinamis dan mudah dipahami.

- b. **Fungsionalitas Sistem Berjalan dengan Baik:**

Berdasarkan pengujian fungsional, seluruh komponen sistem bekerja sesuai dengan yang diharapkan. Data dari sensor berhasil dikirim ke platform cloud, diolah, dan kemudian digunakan untuk menggerakkan serta mengubah tampilan model Digital Twin dengan tingkat akurasi yang baik dan delay pengiriman data yang rendah (rata-rata 2-3 detik).

- c. **Efektivitas Deteksi Dini:**

Sistem terbukti efektif dalam mendeteksi perubahan kondisi struktur. Dalam skenario simulasi beban dan "kerusakan", sistem mampu menangkap anomali data (seperti perubahan kemiringan atau getaran berlebih) dan langsung menampilkannya pada Digital Twin melalui perubahan warna (dari hijau menjadi merah) serta memberikan notifikasi peringatan. Hal ini membuktikan bahwa sistem dapat digunakan sebagai alat early warning system yang potensial.

- d. **Peningkatan Kualitas Visualisasi Data:**

Pemanfaatan Digital Twin berhasil mengatasi keterbatasan metode konvensional yang hanya mengandalkan data numerik atau grafik. Visualisasi 3D yang dinamis membuat interpretasi data menjadi lebih intuitif. Pengelola jembatan dapat langsung melihat di mana dan seberapa parah masalah yang terjadi hanya dengan melihat perubahan pada model digital.

e. Kontribusi Penelitian:

Penelitian ini berkontribusi dalam memberikan sebuah alternatif solusi berbasis teknologi terkini untuk menggeser paradigma perawatan infrastruktur dari metode reaktif (memperbaiki setelah rusak) dan terjadwal (memperbaiki berdasarkan waktu) menuju metode prediktif (memperbaiki berdasarkan kondisi aktual dan data).

5.2 Saran

Penelitian ini masih merupakan pengembangan awal dalam skala laboratorium. Untuk dapat diimplementasikan pada jembatan sesungguhnya, terdapat beberapa saran untuk pengembangan lebih lanjut:

a. Pengujian pada Skala Nyata (Full-Scale Implementation):

Prototipe ini perlu diuji coba pada jembatan asli dengan skala penuh. Hal ini penting untuk menguji ketahanan perangkat keras terhadap kondisi lingkungan yang sesungguhnya, seperti suhu ekstrem, kelembaban tinggi, angin kencang, dan getaran lalu lintas yang beragam. Selain itu, perlu dikaji sumber daya (daya listrik) yang cocok untuk operasi di lapangan, misalnya dengan panel surya.

b. Penambahan Jenis dan Jumlah Sensor:

Sistem saat ini baru menggunakan sensor getaran dan kemiringan. Untuk pemantauan kesehatan struktur yang lebih komprehensif, disarankan untuk menambahkan sensor lain seperti:

- 1) Sensor Regangan (*Strain Gauge*) yang lebih presisi untuk mengukur tegangan material.
- 2) Sensor Korosi untuk mendeteksi tingkat karat pada besi beton.
- 3) Sensor Suhu dan Kelembaban untuk memantau faktor lingkungan yang mempercepat kerusakan.
- 4) Kamera CCTV terintegrasi yang dapat diaktifkan secara otomatis saat sensor mendeteksi anomali.

c. Peningkatan Kecerdasan Sistem (*Machine Learning*):

Data historis yang terkumpul di cloud dapat dimanfaatkan untuk melatih model kecerdasan buatan (AI) atau machine learning. Dengan AI, sistem tidak hanya bisa memberi peringatan saat ambang batas terlampaui, tetapi juga bisa memprediksi kapan suatu komponen jembatan kemungkinan akan rusak di masa depan berdasarkan pola data yang ada (*predictive analytics*).

d. Optimasi Keamanan Siber (*Cybersecurity*):

Karena sistem ini terhubung ke internet dan mengontrol infrastruktur kritis, aspek keamanan data harus menjadi perhatian utama. Pengembangan selanjutnya harus mencakup protokol enkripsi data yang lebih kuat dan sistem keamanan siber untuk mencegah peretasan atau manipulasi data.

e. Pengembangan Antarmuka yang Lebih Kaya Fitur:

Dashboard pemantauan dapat ditingkatkan dengan fitur-fitur tambahan seperti laporan otomatis berkala, riwayat data yang lebih panjang, serta kemampuan untuk melakukan simulasi "apa-jika" (*what-if analysis*) langsung pada model Digital Twin untuk keperluan perencanaan perkuatan struktur di masa depan.

DAFTAR REFERENSI

- Abdelgawad, A., & Yelamarthi, K. (2017). Internet of things (IoT) platform for structure health monitoring. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2017(1), 6560797.
- Armijo, A., & Zamora-Sánchez, D. (2024). Integration of Railway Bridge Structural Health Monitoring into the Internet of Things with a Digital Twin: A Case Study. *Sensors*, 24(7), 2115.
- Bado, M. F., Tonelli, D., Poli, F., Zonta, D., & Casas, J. R. (2022). Digital twin for civil engineering systems: An exploratory review for distributed sensing updating. *Sensors*, 22(9), 3168.
- Balageas, D., Fritzen, C. P., & Güemes, A. (2010). *Structural Health Monitoring*. John Wiley & Sons.
- Cao, Y., et al. (2020). The role of IoT sensors for structural health monitoring integrated with BIM. *Automation in Construction*.
- Chakraborty, S., & Adhikari, S. (2021). Machine learning based digital twin for dynamical systems. *Journal of Sound and Vibration*.
- Dang, H. V., Tatipamula, M., & Nguyen, H. X. (2022). Cloud-based digital twinning for structural health monitoring using deep learning. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 18(6), 3820-3830.
- Farrar, C. R., & Worden, K. (2007). An introduction to structural health monitoring. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 365(1851), 303-315.
- Grieves, M. (2023). Digital Twin: Origins and Definitions. Dalam *Digital Twin Technology*.
- Hu, X., Assaad, R. H., Ravishankar, S., Prakash, S., & Lin, J. (2024). Developing Digital Twins for Real-Time Bridge Structural Health Monitoring by Integrating Scan-to-BrIM Remote Sensing Technologies. Dalam *Computing In Civil Engineering 2024* (hlm. 455-465). ASCE.
- Lu, R., et al. (2020). Integrating IoT and BIM for digital twin-enabled structural health monitoring. *Advanced Engineering Informatics*.
- Mariniello, G., & De Alteriis, G. (Ed.). (2025). Next-Generation Structural Health Monitoring: Advanced Sensing, AI and Digital Twins [Special Issue]. *Sensors*, MDPI.

- 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.
- Nguyen, D. C., et al. (2022). Mixed reality and IoT integration for structural health monitoring. *Advanced Engineering Informatics*.
- Pang, F., & Su, B. (2025). Design of Bridge Monitoring System Based on Cloud Platform. Dalam *Proceedings HCCE 2024* (hlm. 576-584). Atlantis Press.
- Sony, S., Laventure, S., & Sadhu, A. (2019). A literature review of next-generation smart sensing technology in structural health monitoring. *Structural Control and Health Monitoring*, 26(3), e2321.
- Torzoni, M., et al. (2024). A predictive digital twin framework for real-time diagnostics and maintenance planning. *Mechanical Systems and Signal Processing*.
- Valinejadshoubi, M., et al. (2021). Development of an IoT and BIM-based automated alert system for structural health monitoring. *Automation in Construction*.
- Wang, Y. W., Ni, Y. Q., & Wang, S. M. (2022). Structural health monitoring of bridges using digital twin technology: A review. *Structural Health Monitoring*.
- Ye, C., Butler, L., Calka, B., et al. (2019). A digital twin of bridges for structural health monitoring. Dalam *12th International Workshop on Structural Health Monitoring*. Stanford University.