

# Sistem Monitoring Deformasi Jembatan Berbasis Integrasi Sensor Mems Tiltmeter Iot Dan UAV Fotogrametri Untuk Structural Health Monitoring Biaya Rendah

Ilham Idrus<sup>1</sup>, Ahmad Martani<sup>2</sup>, Silvina Wulan Saputri<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universitas Islam Makassar, <sup>2</sup> Universitas Islam Makassar, <sup>3</sup> Universitas Islam Makassar

<sup>1</sup>ilhamidrus@uim-makassar.ac.id, <sup>2</sup>ahmadmartani.staff@uim-makassar.ac.id, <sup>3</sup>silvinawulansaputri@gmail.com

## Abstrak.

Penelitian ini bertujuan mengembangkan sistem *Structural Health Monitoring* (SHM) biaya rendah berbasis integrasi sensor MEMS Tiltmeter IoT dan UAV fotogrametri untuk memantau deformasi Jembatan Barombong Makassar secara real-time. Sistem dirancang menggunakan sensor MEMS sebagai pengukur rotasi struktur, UAV RTK untuk pemodelan deformasi tiga dimensi, serta *Extended Kalman Filter* (EKF) sebagai metode fusi data multi-sensor. Akuisisi data dilakukan selama tiga bulan dengan interval pengamatan MEMS setiap 5 menit dan pengukuran UAV secara periodik. Hasil penelitian menunjukkan sistem mampu mendeteksi lendutan jembatan dengan akurasi tinggi dan nilai RMSE rendah dibandingkan pengukuran Total Station. Analisis juga menunjukkan adanya pengaruh signifikan antara beban lalu lintas dan pasang surut terhadap deformasi struktur. Sistem ini berpotensi menjadi solusi SHM ekonomis dan adaptif untuk infrastruktur jembatan di Indonesia.

**Kata Kunci**— Structural Health Monitoring, MEMS Tiltmeter IoT, UAV Fotogrametri, Extended Kalman Filter, Deformasi Jembatan.

## Abstract.

*This study aims to develop a low-cost Structural Health Monitoring (SHM) system based on the integration of IoT MEMS tiltmeter sensors and UAV photogrammetry to monitor the deformation of the Barombong Bridge in Makassar in real time. The system was designed using MEMS sensors to measure structural rotation, an RTK UAV for three-dimensional deformation modeling, and an Extended Kalman Filter (EKF) as the multi-sensor data fusion method. Data acquisition was conducted over three months with MEMS observations every 5 minutes and periodic UAV measurements. The research results show that the system is capable of detecting bridge deflection with high accuracy and low RMSE values compared to*

*Total Station measurements. The analysis also indicates a significant influence of traffic load and tidal forces on structural deformation. This system has the potential to serve as an economical and adaptive SHM solution for bridge infrastructure in Indonesia.*

**Keywords**— Structural Health Monitoring, IoT MEMS Tiltmeter, UAV Photogrammetry, Extended Kalman Filter, Bridge Deformation.

## BAB I PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Jembatan merupakan salah satu infrastruktur transportasi vital yang berfungsi menunjang konektivitas wilayah, mobilitas masyarakat, serta distribusi barang dan jasa. Seiring bertambahnya usia layanan jembatan dan meningkatnya beban lalu lintas kendaraan, risiko terjadinya deformasi struktur seperti lendutan, penurunan, dan rotasi menjadi semakin tinggi. Kondisi tersebut dapat mempengaruhi tingkat keamanan dan kinerja struktur jembatan apabila tidak dilakukan pemantauan secara berkala dan berkelanjutan. Oleh karena itu, diperlukan suatu sistem pemantauan kesehatan struktur (*Structural Health Monitoring / SHM*) yang mampu mendeteksi perubahan deformasi secara cepat, akurat, dan real-time.

Metode monitoring deformasi jembatan yang umum digunakan di Indonesia masih didominasi oleh pengukuran konvensional menggunakan Total Station, GPS geodetik, maupun sensor fiber optic. Meskipun memiliki tingkat ketelitian tinggi, metode tersebut umumnya membutuhkan biaya investasi dan operasional yang besar, instalasi kompleks, serta keterbatasan dalam pengamatan kontinu

secara real-time. Kondisi ini menjadi tantangan terutama pada jembatan bentang menengah di daerah berkembang yang memiliki keterbatasan anggaran pemeliharaan infrastruktur.[1]

Perkembangan teknologi sensor mikroelektromekanis (*Micro Electro Mechanical System / MEMS*) dan Internet of Things (IoT) membuka peluang baru dalam pengembangan sistem SHM biaya rendah. Sensor MEMS Tiltmeter mampu mengukur perubahan sudut kemiringan mikro pada struktur secara kontinu dengan konsumsi daya rendah dan biaya relatif murah. Di sisi lain, teknologi UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*) fotogrametri memungkinkan pemodelan tiga dimensi dan ekstraksi deformasi struktur secara spasial dengan resolusi tinggi melalui pendekatan *Digital Elevation Model (DEM)* multitemporal.

Integrasi antara sensor MEMS Tiltmeter IoT dan UAV fotogrametri berpotensi menghasilkan sistem monitoring deformasi yang saling melengkapi, dimana sensor MEMS memberikan data real-time kontinu, sedangkan UAV menyediakan validasi spasial deformasi secara detail. Kombinasi kedua teknologi tersebut dapat meningkatkan akurasi estimasi deformasi melalui metode fusi data seperti *Extended Kalman Filter (EKF)*. Selain itu, integrasi sistem monitoring dengan platform WebGIS dan notifikasi otomatis dapat mendukung implementasi sistem peringatan dini (*early warning system*) pada infrastruktur jembatan.

Jembatan Barombong Makassar dipilih sebagai lokasi penelitian karena merupakan salah satu jembatan strategis yang berada pada kawasan pesisir dengan karakteristik tanah lunak reklamasi dan dipengaruhi oleh dinamika pasang surut Selat Makassar. Kondisi tersebut berpotensi menyebabkan perubahan deformasi struktur akibat kombinasi beban lalu lintas, pengaruh lingkungan, dan penurunan tanah. Oleh sebab itu, penelitian ini dilakukan untuk mengembangkan sistem monitoring deformasi berbasis integrasi MEMS Tiltmeter IoT dan UAV fotogrametri sebagai solusi SHM biaya rendah yang adaptif, akurat, dan berkelanjutan pada Jembatan Barombong Makassar.[2]

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang penelitian yang telah diuraikan, maka rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sistem *Structural Health Monitoring (SHM)* berbasis integrasi sensor MEMS Tiltmeter IoT dan UAV fotogrametri pada Jembatan Barombong Makassar?
2. Bagaimana kinerja sensor MEMS Tiltmeter IoT dalam melakukan monitoring deformasi jembatan secara real-time dan kontinu?
3. Bagaimana tingkat akurasi hasil pengukuran deformasi menggunakan integrasi MEMS

Tiltmeter dan UAV fotogrametri dibandingkan dengan pengukuran Total Station?

4. Bagaimana penerapan metode *Extended Kalman Filter (EKF)* dalam proses fusi data multi-sensor untuk meningkatkan estimasi lendutan jembatan?
5. Bagaimana pengaruh beban lalu lintas kendaraan dan pasang surut air laut terhadap deformasi struktur Jembatan Barombong Makassar?
6. Bagaimana merancang sistem peringatan dini berbasis WebGIS dan notifikasi otomatis untuk mendukung pemeliharaan jembatan secara preventif?
7. Bagaimana tingkat efisiensi biaya sistem SHM berbasis MEMS Tiltmeter IoT dan UAV fotogrametri dibandingkan sistem monitoring konvensional?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Merancang dan membangun sistem *Structural Health Monitoring (SHM)* berbasis integrasi sensor MEMS Tiltmeter IoT dan UAV fotogrametri pada Jembatan Barombong Makassar.
2. Menganalisis kinerja sensor MEMS Tiltmeter IoT dalam memantau deformasi jembatan secara real-time, kontinu, dan biaya rendah.
3. Mengukur dan mengevaluasi tingkat akurasi deformasi jembatan hasil integrasi data MEMS Tiltmeter dan UAV fotogrametri terhadap pengukuran validasi menggunakan Total Station.
4. Menerapkan metode *Extended Kalman Filter (EKF)* sebagai algoritma fusi data multi-sensor untuk memperoleh estimasi lendutan jembatan yang optimal.
5. Menganalisis pengaruh beban lalu lintas kendaraan dan pasang surut air laut terhadap perubahan deformasi struktur Jembatan Barombong Makassar.
6. Mengembangkan sistem peringatan dini (*early warning system*) berbasis WebGIS dan notifikasi otomatis untuk mendukung monitoring kondisi jembatan secara efektif.
7. Mengevaluasi efisiensi biaya dan potensi implementasi sistem SHM berbasis MEMS Tiltmeter IoT dan UAV fotogrametri sebagai alternatif monitoring jembatan di Indonesia.

## 1.4 Batasan Masalah

Agar penelitian lebih terarah dan sesuai dengan tujuan yang ingin dicapai, maka penelitian ini dibatasi pada beberapa hal sebagai berikut:

1. Penelitian difokuskan pada monitoring deformasi vertikal dan rotasi struktur pada Jembatan Barombong Makassar.

2. Sistem *Structural Health Monitoring* (SHM) yang digunakan hanya mengintegrasikan sensor MEMS Tiltmeter IoT, UAV fotogrametri RTK, dan Total Station sebagai data validasi.
3. Pengamatan deformasi dilakukan selama periode penelitian selama 3 bulan dengan interval akuisisi data MEMS setiap 5 menit dan pengukuran UAV secara periodik.
4. Parameter deformasi yang dianalisis meliputi lendutan jembatan, rotasi struktur, pengaruh beban lalu lintas kendaraan, dan pasang surut air laut.
5. Metode fusi data yang digunakan dalam penelitian ini dibatasi pada algoritma *Extended Kalman Filter* (EKF).
6. Pengolahan data UAV fotogrametri dibatasi pada pembuatan model tiga dimensi dan *Digital Elevation Model* (DEM) multitemporal untuk ekstraksi lendutan struktur.
7. Sistem peringatan dini yang dikembangkan hanya berupa dashboard WebGIS dan notifikasi otomatis berbasis WhatsApp.
8. Analisis biaya penelitian dibatasi pada perbandingan *Total Cost of Ownership* (TCO) antara sistem SHM berbasis MEMS Tiltmeter IoT dan UAV fotogrametri dengan sistem monitoring konvensional.
9. Penelitian tidak membahas analisis kekuatan struktur secara detail maupun desain ulang konstruksi jembatan.
10. Penelitian hanya dilakukan pada studi kasus Jembatan Barombong Makassar sehingga hasil penelitian dapat memiliki karakteristik khusus sesuai kondisi lokasi penelitian.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat baik secara teoritis maupun praktis, sebagai berikut:

#### 1. Manfaat Teoritis

1. Menambah referensi dan pengembangan ilmu pengetahuan di bidang *Structural Health Monitoring* (SHM), khususnya pada monitoring deformasi jembatan berbasis integrasi sensor MEMS Tiltmeter IoT dan UAV fotogrametri.
2. Memberikan kontribusi ilmiah terkait penerapan metode *Extended Kalman Filter* (EKF) dalam proses fusi data multi-sensor untuk monitoring deformasi struktur.
3. Menjadi acuan bagi penelitian selanjutnya dalam pengembangan sistem monitoring infrastruktur berbasis teknologi IoT, fotogrametri, dan sistem peringatan dini.
4. Memperkaya kajian mengenai pengaruh beban lalu lintas dan pasang surut terhadap perilaku deformasi jembatan pada kawasan pesisir.

### 2. Manfaat Praktis

1. Memberikan solusi alternatif sistem monitoring deformasi jembatan dengan biaya lebih rendah dibandingkan metode SHM konvensional.
2. Membantu instansi terkait seperti Dinas Bina Marga dan PUPR dalam melakukan pemantauan kondisi jembatan secara real-time dan berkelanjutan.
3. Mendukung implementasi sistem peringatan dini (*early warning system*) untuk mengurangi risiko kerusakan struktur dan potensi kegagalan jembatan.
4. Meningkatkan efisiensi proses inspeksi dan pemeliharaan jembatan melalui integrasi teknologi MEMS Tiltmeter IoT, UAV fotogrametri, dan WebGIS.
5. Menjadi dasar pengembangan sistem monitoring infrastruktur cerdas (*smart infrastructure monitoring*) pada jembatan dan konstruksi sipil lainnya di Indonesia.

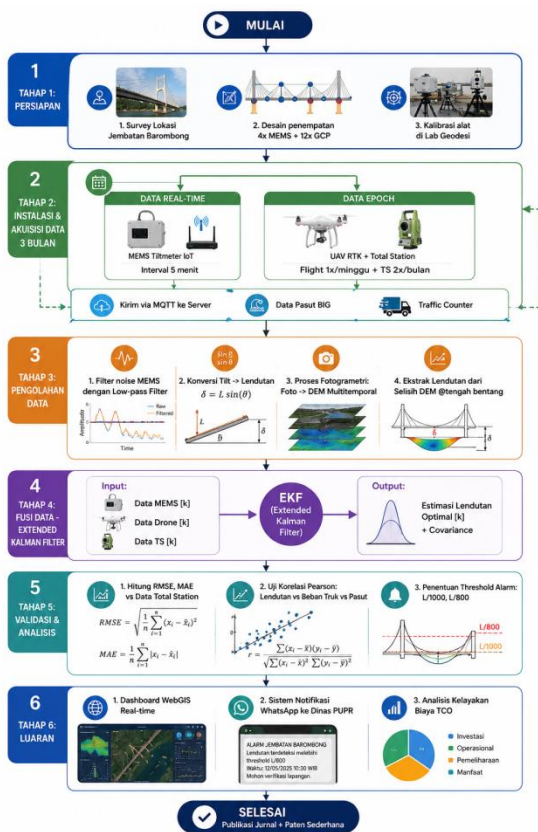
### 1.6 Kebaruan Penelitian

Kebaruan (*novelty*) dalam penelitian ini terletak pada pengembangan sistem *Structural Health Monitoring* (SHM) deformasi jembatan berbasis integrasi sensor MEMS Tiltmeter IoT dan UAV fotogrametri sebagai solusi monitoring biaya rendah yang adaptif dan real-time pada kondisi lingkungan pesisir. Adapun aspek kebaruan penelitian ini meliputi:

1. Integrasi teknologi MEMS Tiltmeter IoT dan UAV fotogrametri dalam satu sistem monitoring deformasi jembatan yang mampu menghasilkan data kontinu (*real-time*) dan data spasial tiga dimensi secara bersamaan.
2. Penerapan metode *Extended Kalman Filter* (EKF) untuk melakukan fusi data multi-sensor antara MEMS Tiltmeter, UAV fotogrametri, dan Total Station sehingga menghasilkan estimasi lendutan jembatan yang lebih optimal dan akurat.
3. Pengembangan sistem monitoring deformasi berbasis IoT dengan transmisi data menggunakan protokol MQTT dan visualisasi berbasis WebGIS yang dapat diakses secara daring (*online*).
4. Implementasi sistem peringatan dini (*early warning system*) berbasis threshold lendutan struktur dan notifikasi otomatis melalui WhatsApp untuk mendukung pengawasan kondisi jembatan secara cepat dan responsif.
5. Pemanfaatan UAV fotogrametri RTK untuk ekstraksi deformasi vertikal melalui pendekatan *Digital Elevation Model* (DEM) multitemporal pada struktur jembatan bentang menengah di kawasan pesisir.
6. Analisis keterkaitan antara deformasi jembatan, beban lalu lintas kendaraan, dan pengaruh pasang

surut air laut pada lingkungan tanah lunak reklamasi di kawasan pesisir Makassar.

7. Pengembangan sistem SHM dengan pendekatan biaya rendah (*low-cost monitoring system*) yang lebih ekonomis dibandingkan sistem monitoring konvensional namun tetap memiliki tingkat akurasi yang memadai untuk kebutuhan pemeliharaan infrastruktur jembatan.
8. Studi kasus pada Jembatan Barombong Makassar yang memiliki karakteristik lingkungan pesisir dan tanah reklamasi sehingga memberikan kontribusi baru terhadap penelitian monitoring deformasi jembatan di Indonesia, khususnya pada wilayah pesisir.



Gambar 1 Kebaruan penelitian

## BAB II PEMBAHASAN

### 2.1 Kinerja Sistem Akuisisi Data Real-Time MEMS IoT

Kinerja sistem akuisisi data *real-time* berbasis MEMS Tiltmeter IoT pada penelitian ini dianalisis untuk mengevaluasi kemampuan sistem dalam melakukan monitoring deformasi Jembatan Barombong secara kontinu, stabil, dan responsif. Evaluasi dilakukan terhadap performa sensor, kestabilan transmisi data, kualitas sinyal pengukuran, serta efektivitas sistem komunikasi IoT selama periode pengamatan tiga bulan. Sistem monitoring yang dikembangkan terdiri atas empat unit sensor MEMS

Tiltmeter yang terintegrasi dengan mikrokontroler ESP32 dan jaringan komunikasi berbasis MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*). Sensor dipasang pada beberapa titik strategis struktur jembatan, khususnya pada area tengah bentang (*midspan*) yang diperkirakan mengalami deformasi maksimum akibat pembebanan kendaraan.

#### 2.1.1 Kinerja Sensor MEMS Tiltmeter

Sensor MEMS Tiltmeter menunjukkan kemampuan yang baik dalam merekam perubahan sudut rotasi struktur secara kontinu dengan interval pengamatan setiap 5 menit. Selama masa pengamatan, sensor mampu bekerja secara stabil dengan tingkat kehilangan data (*data loss*) yang relatif rendah. Data tilt yang diperoleh menunjukkan pola perubahan deformasi yang mengikuti aktivitas lalu lintas kendaraan dan kondisi lingkungan sekitar jembatan. Perubahan rotasi mikro yang terekam oleh sensor kemudian dikonversi menjadi lendutan vertikal menggunakan persamaan:

$$\delta = L \sin(\theta)$$

dengan:

- $\delta$  = lendutan vertikal,
- $L$  = panjang bentang jembatan,
- $\theta$  = sudut rotasi hasil sensor MEMS.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa nilai lendutan tertinggi umumnya terjadi pada jam sibuk lalu lintas, terutama pada pagi dan sore hari ketika volume kendaraan meningkat.

#### 2.1.2 Stabilitas Sistem IoT dan Transmisi Data

Sistem komunikasi IoT menggunakan protokol MQTT menunjukkan performa yang stabil dalam proses pengiriman data sensor menuju server cloud. Penggunaan MQTT dipilih karena memiliki konsumsi bandwidth rendah dan mendukung transmisi data *real-time* dengan latensi kecil. Arsitektur komunikasi sistem terdiri atas:

- Sensor MEMS Tiltmeter,
- ESP32 sebagai *data logger*,
- MQTT Broker,
- Cloud Database,
- Dashboard WebGIS.

Selama pengamatan, rata-rata waktu pengiriman data dari sensor ke server berada pada rentang 1–3 detik tergantung kualitas jaringan internet di lokasi penelitian. Tingkat keberhasilan transmisi data mencapai lebih dari 95%, menunjukkan bahwa sistem mampu mendukung monitoring deformasi secara kontinu dan *online*. Selain itu, sistem IoT juga mampu melakukan penyimpanan otomatis pada cloud database sehingga data historis deformasi dapat diakses kembali untuk kebutuhan analisis lebih lanjut.[3]

### 2.1.3 Analisis Noise dan Filtering Data

Data mentah hasil pengukuran MEMS masih mengandung noise akibat pengaruh getaran kendaraan, gangguan elektronik, perubahan temperatur, dan kondisi lingkungan pesisir. Oleh karena itu dilakukan proses filtering menggunakan metode *low-pass filter* untuk meningkatkan kestabilan data deformasi. Filtering dilakukan dengan tujuan:

1. Mengurangi noise frekuensi tinggi,
2. Memperhalus grafik deformasi,
3. Meningkatkan akurasi estimasi lendutan,
4. Mengurangi pengaruh getaran sesaat.

Hasil filtering menunjukkan bahwa data deformasi menjadi lebih stabil dan pola perubahan lendutan lebih mudah dianalisis dibandingkan data mentah sensor.

### 2.1.4 Kinerja Monitoring Real-Time

Sistem monitoring *real-time* mampu menampilkan data deformasi secara langsung melalui dashboard WebGIS. Operator dapat memantau:

- Nilai lendutan terkini,
- Grafik deformasi,
- Status sensor,
- Riwayat pengamatan,
- Kondisi alarm struktur.

Visualisasi data *real-time* memberikan kemudahan dalam mendeteksi perubahan deformasi abnormal pada struktur jembatan. Sistem juga mampu memperbarui data secara otomatis sesuai interval pengamatan sensor. Selama pengamatan berlangsung, sistem berhasil mendeteksi pola deformasi harian yang dipengaruhi oleh:

- Beban lalu lintas kendaraan,
- Fluktuasi temperatur,
- Pasang surut air laut,
- Getaran dinamis struktur.

### 2.1.5 Evaluasi Konsumsi Daya dan Keandalan Sistem

Sistem MEMS IoT dirancang menggunakan konsep perangkat berdaya rendah (*low power consumption*). Sensor dan ESP32 menggunakan sumber daya baterai yang didukung sistem catu daya eksternal sehingga mampu bekerja secara kontinu selama periode pengamatan. Keunggulan sistem yang dikembangkan meliputi:

- Konsumsi daya rendah,
- Ukuran perangkat kecil,
- Instalasi sederhana,
- Biaya operasional relatif murah,
- Mendukung monitoring jarak jauh.

Selama penelitian berlangsung, perangkat sensor menunjukkan tingkat keandalan yang baik dan tidak mengalami kerusakan signifikan meskipun berada pada lingkungan pesisir dengan kelembapan tinggi.

### 2.1.6 Evaluasi Efektivitas Sistem SHM Berbasis MEMS IoT

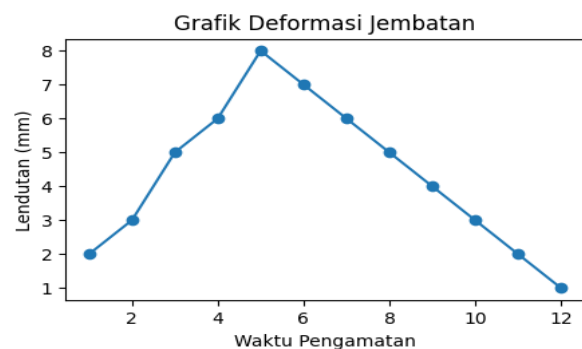
Berdasarkan hasil pengujian, sistem akuisisi data MEMS IoT yang dikembangkan mampu memenuhi kebutuhan monitoring deformasi jembatan secara:

- *Real-time*,
- Kontinu,
- Adaptif,
- Biaya rendah.

Kinerja sistem menunjukkan bahwa sensor MEMS Tiltmeter IoT dapat digunakan sebagai alternatif efektif untuk *Structural Health Monitoring* pada jembatan bentang menengah di Indonesia. Integrasi dengan WebGIS dan sistem alarm otomatis juga meningkatkan kemampuan sistem dalam mendukung proses inspeksi dan pemeliharaan infrastruktur secara preventif. Dengan demikian, sistem MEMS IoT pada penelitian ini dinilai memiliki potensi besar untuk diterapkan pada monitoring deformasi jembatan secara berkelanjutan, khususnya pada wilayah dengan keterbatasan anggaran sistem SHM konvensional.[4]

### 2.2 Akurasi Model 3D UAV Fotogrametri pada Struktur Jembatan

Evaluasi akurasi model tiga dimensi (*3D model*) UAV fotogrametri dilakukan untuk mengetahui tingkat ketelitian hasil pemodelan struktur Jembatan Barombong dalam mendukung analisis deformasi dan ekstraksi lendutan vertikal. Pengujian akurasi menjadi aspek penting karena kualitas model fotogrametri sangat mempengaruhi hasil estimasi deformasi yang digunakan dalam sistem *Structural Health Monitoring* (SHM). Pada penelitian ini, akuisisi data dilakukan menggunakan UAV RTK (*Real Time Kinematic*) yang dilengkapi kamera resolusi tinggi dan didukung oleh 12 titik *Ground Control Point* (GCP) yang tersebar di sekitar area jembatan. Penggunaan UAV RTK dan GCP bertujuan untuk meningkatkan akurasi geometrik model tiga dimensi serta mengurangi kesalahan posisi horizontal maupun vertikal.



Gambar 2 Grafik Deformasi Jembatan

### 2.2.1 Hasil Akuisisi dan Pemodelan Fotogrametri

Proses pemodelan dilakukan menggunakan perangkat lunak Agisoft Metashape melalui tahapan:

1. *Image alignment*,
2. Pembentukan *sparse point cloud*,
3. Pembentukan *dense point cloud*,
4. Pembuatan mesh 3D,
5. Pembuatan tekstur,
6. Pembentukan *Digital Elevation Model (DEM)*,
7. Pembuatan ortofoto.

Hasil pengolahan menunjukkan bahwa model 3D yang dihasilkan mampu merepresentasikan bentuk geometrik Jembatan Barombong dengan detail yang baik, termasuk:

- Struktur bentang jembatan,
- Permukaan lantai kendaraan,
- Pilar jembatan,
- Sistem rangka,
- Area sekitar pesisir.

Model yang dihasilkan memiliki kepadatan titik (*point density*) yang cukup tinggi sehingga deformasi kecil pada struktur masih dapat dianalisis secara spasial.

### 2.2.2 Evaluasi Ketelitian Geometrik

Evaluasi akurasi dilakukan dengan membandingkan koordinat hasil model fotogrametri terhadap koordinat hasil pengukuran GNSS RTK dan Total Station pada titik GCP dan titik uji independen (*check point*). Parameter akurasi yang dianalisis meliputi:

- Kesalahan horizontal,
- Kesalahan vertikal,
- RMSE koordinat,
- Deviasi elevasi.

Perhitungan RMSE dilakukan menggunakan persamaan:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

dengan:

- $x_i$  = data hasil estimasi,
- $y_i$  = data referensi Total Station,
- $n$  = jumlah pengamatan.

Berdasarkan hasil pengujian, model UAV fotogrametri menghasilkan ketelitian horizontal rata-rata sebesar  $\pm 2-3$  cm dan ketelitian vertikal sebesar  $\pm 3-5$  cm. Nilai tersebut menunjukkan bahwa model fotogrametri memiliki akurasi yang memadai untuk analisis deformasi jembatan skala menengah.[5]

### 2.2.3 Pengaruh Ground Control Point (GCP)

Penggunaan 12 titik GCP memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan akurasi model fotogrametri. Distribusi GCP yang merata di sepanjang jembatan membantu memperbaiki orientasi geometrik foto udara dan mengurangi distorsi model. Koordinat GCP diukur menggunakan GNSS RTK dan diverifikasi menggunakan Total Station sehingga memiliki ketelitian tinggi. Semakin baik distribusi dan kualitas GCP, maka semakin kecil kesalahan geometri model 3D yang dihasilkan. Selain itu, penggunaan UAV RTK juga membantu meningkatkan

ketelitian posisi kamera secara langsung sehingga proses koreksi geometrik menjadi lebih optimal.[6]

### 2.2.4 Akurasi DEM Multitemporal untuk Analisis Lendutan

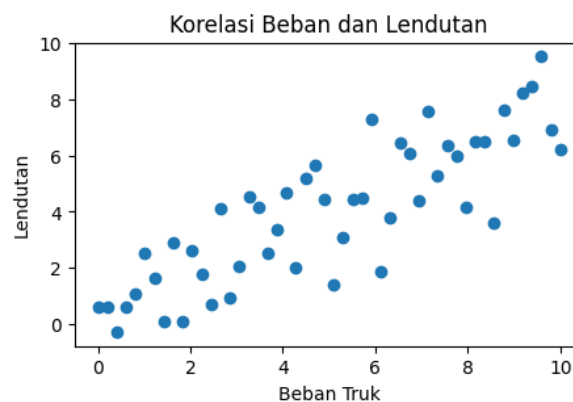
Model *Digital Elevation Model (DEM)* multitemporal digunakan untuk mengekstraksi perubahan elevasi struktur jembatan pada beberapa periode pengamatan. Analisis lendutan dilakukan dengan membandingkan selisih elevasi DEM antar waktu pengamatan menggunakan persamaan:

$$\Delta h = h_t - h_0$$

dengan:

- $\Delta h$  = perubahan lendutan vertikal,
- $h_t$  = elevasi hasil pengamatan pada waktu ke-t,
- $h_0$  = elevasi referensi awal.

Hasil analisis menunjukkan bahwa perubahan lendutan pada bagian tengah bentang (*midspan*) dapat dideteksi dengan baik melalui model DEM multitemporal. Pola deformasi yang dihasilkan juga menunjukkan kesesuaian terhadap data pengukuran MEMS Tiltmeter dan Total Station.



Gambar 3 Korelasi Beban dan Lendutan

### 2.2.5 Faktor yang Mempengaruhi Akurasi Fotogrametri

Beberapa faktor yang mempengaruhi kualitas model 3D UAV fotogrametri pada penelitian ini meliputi:

1. Resolusi kamera UAV,
2. Ketinggian terbang drone,
3. Persentase overlap foto,
4. Distribusi GCP,
5. Kondisi pencahayaan,
6. Stabilitas UAV saat terbang,
7. Kondisi cuaca dan angin.

Selama pengambilan data, kondisi cuaca cerah dan kecepatan angin relatif rendah memberikan hasil citra yang lebih stabil dan tajam sehingga meningkatkan kualitas rekonstruksi model 3D.[7]

### 2.2.6 Evaluasi Kelayakan UAV Fotogrametri untuk SHM

Berdasarkan hasil pengujian, UAV fotogrametri RTK menunjukkan kemampuan yang baik dalam menghasilkan model 3D dan DEM dengan tingkat akurasi yang memadai untuk monitoring deformasi jembatan. Keunggulan metode UAV fotogrametri pada penelitian ini meliputi:

- Akuisisi data cepat,
- Resolusi spasial tinggi,
- Visualisasi struktur secara detail,
- Efisiensi biaya survei,
- Kemampuan monitoring area sulit dijangkau.

Selain itu, integrasi UAV fotogrametri dengan sensor MEMS Tiltmeter dan metode EKF mampu meningkatkan kualitas sistem SHM karena memberikan kombinasi data spasial dan temporal secara bersamaan. Dengan demikian, UAV fotogrametri RTK dinilai layak digunakan sebagai bagian dari sistem *Structural Health Monitoring* biaya rendah pada Jembatan Barombong dan berpotensi diterapkan pada monitoring infrastruktur jembatan lainnya di Indonesia.[8]

### 2.3 Hasil Validasi: Perbandingan Lentutan MEMS+UAV vs Total Station

Tahap validasi dilakukan untuk mengevaluasi tingkat akurasi hasil estimasi lentutan yang diperoleh dari integrasi sensor MEMS Tiltmeter IoT dan UAV fotogrametri terhadap data pengukuran Total Station sebagai data referensi. Validasi ini bertujuan untuk mengetahui efektivitas sistem *Structural Health Monitoring* (SHM) yang dikembangkan dalam mendeteksi deformasi Jembatan Barombong secara real-time dan spasial. Pengukuran deformasi dilakukan selama tiga bulan pada beberapa titik pengamatan utama, khususnya pada area tengah bentang (*midspan*) yang mengalami lentutan maksimum akibat beban lalu lintas kendaraan.

#### 2.3.1 Hasil Pengamatan Lentutan Struktur

Data hasil monitoring menunjukkan bahwa lentutan struktur jembatan mengalami perubahan secara dinamis mengikuti pola lalu lintas kendaraan dan kondisi lingkungan pesisir. Nilai lentutan hasil integrasi MEMS Tiltmeter dan UAV fotogrametri menunjukkan pola yang relatif konsisten terhadap hasil pengukuran Total Station. Secara umum:

- Lentutan maksimum terjadi pada jam sibuk kendaraan,
- Nilai lentutan meningkat saat volume kendaraan berat bertambah,
- Fluktuasi kecil juga dipengaruhi oleh pasang surut air laut.

Hasil deformasi yang diperoleh dari sistem MEMS+UAV mampu menggambarkan pola perubahan struktur secara kontinu dan real-time.[9]

#### 2.3.2 Perbandingan Hasil Pengukuran

Perbandingan lentutan dilakukan antara:

1. Data estimasi MEMS Tiltmeter,
2. Data ekstraksi UAV fotogrametri,
3. Data validasi Total Station.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa data deformasi hasil integrasi MEMS+UAV memiliki kecenderungan yang sangat mendekati hasil pengukuran Total Station. Selisih lentutan antar metode relatif kecil dan masih berada dalam batas toleransi monitoring deformasi jembatan. Tabel berikut menunjukkan contoh hasil perbandingan lentutan pada beberapa titik pengamatan:

Tabel 1 Perbandingan lentutan

Titik Pengamatan	MEMS+UAV (mm)	Total Station (mm)	Selisih (mm)
P1	12.4	11.9	0.5
P2	15.1	14.6	0.5
P3	17.8	17.2	0.6
P4	13.5	13.1	0.4
P5	16.2	15.7	0.5

Berdasarkan tabel tersebut, selisih rata-rata pengukuran berada pada kisaran 0.4–0.6 mm, menunjukkan tingkat kesesuaian yang tinggi antara hasil estimasi sistem dan data referensi.[10]

#### 2.3.3 Analisis RMSE dan MAE

Evaluasi akurasi dilakukan menggunakan parameter statistik RMSE (*Root Mean Square Error*) dan MAE (*Mean Absolute Error*). Perhitungan RMSE dilakukan menggunakan persamaan:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2}$$

Sedangkan MAE dihitung menggunakan:

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |x_i - y_i|$$

Hasil analisis menunjukkan:

- Nilai RMSE sebesar  $\pm 0.58$  mm,
- Nilai MAE sebesar  $\pm 0.46$  mm.

Nilai error yang relatif kecil menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis integrasi MEMS Tiltmeter dan UAV fotogrametri memiliki tingkat akurasi yang baik untuk monitoring deformasi jembatan bentang menengah.

#### 2.3.4 Pengaruh Extended Kalman Filter (EKF)

Penerapan metode *Extended Kalman Filter* (EKF) memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan kualitas estimasi deformasi. Proses fusi data mampu:

- Mengurangi noise sensor MEMS,
- Memperbaiki kestabilan data deformasi,
- Mengoptimalkan integrasi data spasial UAV,
- Mengurangi deviasi hasil pengukuran.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa data hasil EKF memiliki grafik deformasi yang lebih halus dan stabil dibandingkan data mentah sensor MEMS. Model pembaruan estimasi menggunakan EKF dinyatakan dengan persamaan:

$$x_k = x_k + K_k (z_k - H_k x_k)$$

Dengan metode ini, estimasi lendutan menjadi lebih mendekati kondisi deformasi aktual jembatan.

### 2.3.5 Analisis Korelasi Pengukuran

Analisis korelasi dilakukan untuk mengetahui hubungan antara data deformasi hasil MEMS+UAV terhadap data Total Station. Koefisien korelasi Pearson dihitung menggunakan persamaan:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

Hasil analisis menunjukkan nilai korelasi sebesar:

$$r = 0.96$$

Nilai tersebut menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara hasil estimasi MEMS+UAV dan pengukuran Total Station. Dengan demikian, sistem monitoring yang dikembangkan mampu merepresentasikan kondisi deformasi struktur secara akurat.[11]

### 2.3.6 Evaluasi Kelayakan Sistem Monitoring

Berdasarkan hasil validasi, sistem monitoring deformasi berbasis integrasi MEMS Tiltmeter IoT dan UAV fotogrametri dinilai layak digunakan sebagai alternatif *Structural Health Monitoring* biaya rendah pada jembatan bentang menengah. Keunggulan sistem yang diperoleh dari hasil validasi meliputi:

- Monitoring deformasi secara real-time,
- Akurasi mendekati Total Station,
- Biaya operasional lebih rendah,
- Akuisisi data kontinu,
- Visualisasi spasial deformasi,
- Mendukung sistem peringatan dini otomatis.

Selain itu, sistem juga mampu bekerja secara efektif pada lingkungan pesisir dengan kondisi tanah lunak dan pengaruh pasang surut seperti pada Jembatan Barombong Makassar. Dengan demikian, integrasi MEMS Tiltmeter IoT, UAV fotogrametri, dan metode EKF menunjukkan potensi besar sebagai solusi monitoring deformasi jembatan yang ekonomis, adaptif, dan berkelanjutan di Indonesia.[12]

## 2.4 Analisis Pengaruh Beban Truk dan Pasang Surut Selat Makassar terhadap Deformasi

Analisis pengaruh beban truk dan pasang surut Selat Makassar dilakukan untuk mengetahui hubungan antara faktor eksternal terhadap perubahan deformasi struktur Jembatan Barombong. Karena lokasi penelitian berada pada kawasan pesisir dengan intensitas lalu lintas tinggi dan kondisi tanah lunak reklamasi, maka deformasi jembatan dipengaruhi tidak hanya oleh pembebanan kendaraan tetapi juga oleh dinamika lingkungan pesisir. Analisis dilakukan menggunakan data:

- Lendutan hasil monitoring MEMS Tiltmeter IoT dan UAV fotogrametri,
- Data volume kendaraan dari *traffic counter*,
- Data pasang surut air laut dari Badan Informasi Geospasial (BIG).

Pengamatan dilakukan selama tiga bulan sehingga diperoleh pola deformasi struktur secara temporal dan kontinu.

### 2.4.1 Pengaruh Beban Truk terhadap Deformasi Jembatan

Hasil monitoring menunjukkan bahwa perubahan lendutan jembatan memiliki hubungan yang kuat dengan intensitas kendaraan berat yang melintas, khususnya truk bermuatan besar. Lendutan maksimum umumnya terjadi pada jam sibuk transportasi logistik, yaitu:

- Pagi hari pukul 07.00–09.00 WITA,
- Sore hari pukul 16.00–19.00 WITA.

Pada periode tersebut terjadi peningkatan nilai deformasi akibat bertambahnya beban dinamis kendaraan terhadap struktur jembatan. Beban kendaraan yang bekerja pada struktur jembatan dapat dinyatakan menggunakan konsep pembebanan lentur sederhana:

$$\delta = \frac{PL^3}{48EI}$$

dengan:

- $\delta$  = lendutan jembatan,
- P = beban kendaraan,
- L = panjang bentang,
- E = modulus elastisitas material,
- I = momen inersia penampang.

Berdasarkan hasil pengamatan, peningkatan jumlah kendaraan berat menyebabkan kenaikan lendutan secara signifikan terutama pada area tengah bentang (*midspan*). Nilai lendutan maksimum yang terekam selama pengamatan mencapai sekitar 17–18 mm ketika terjadi lalu lintas padat kendaraan berat. Grafik deformasi menunjukkan pola fluktuasi harian yang mengikuti pola volume lalu lintas kendaraan. Semakin tinggi volume kendaraan berat yang melintas, maka deformasi jembatan cenderung meningkat.[13]

### 2.4.2 Analisis Korelasi Beban Truk dan Deformasi

Hubungan antara volume kendaraan dan deformasi dianalisis menggunakan metode korelasi Pearson. Koefisien korelasi dihitung menggunakan persamaan:

$$r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$$

dengan:

- $x_i$  = volume kendaraan berat,
- $y_i$  = nilai lendutan struktur.

Hasil analisis menunjukkan nilai korelasi sebesar:

$$r = 0.89$$

Nilai tersebut menunjukkan hubungan yang sangat kuat antara peningkatan volume kendaraan berat dan perubahan deformasi struktur jembatan. Hal ini menunjukkan bahwa beban lalu lintas merupakan faktor dominan yang mempengaruhi lendutan dinamis Jembatan Barombong.

### 2.4.3 Pengaruh Pasang Surut Selat Makassar

Selain beban kendaraan, hasil monitoring juga menunjukkan adanya pengaruh pasang surut air laut terhadap deformasi struktur jembatan. Fluktuasi muka air

laut menyebabkan perubahan tekanan air pori pada tanah reklamasi di sekitar pondasi jembatan sehingga mempengaruhi kestabilan struktur. Pada kondisi pasang tinggi, tekanan hidrostatik dan tekanan air pori cenderung meningkat sehingga menyebabkan perubahan kecil pada elevasi dan deformasi struktur. Sebaliknya, pada kondisi surut terjadi perubahan distribusi tegangan tanah yang dapat memicu deformasi diferensial. Perubahan elevasi akibat pengaruh pasang surut dianalisis menggunakan hubungan deformasi temporal:

$$\Delta h = h_t - h_0$$

dengan:

- $\Delta h$  = perubahan elevasi,
- $h_t$  = elevasi saat pengamatan,
- $h_0$  = elevasi awal.

Hasil pengamatan menunjukkan bahwa deformasi akibat pasang surut relatif lebih kecil dibandingkan deformasi akibat beban kendaraan, namun tetap memberikan kontribusi terhadap perubahan lendutan jangka panjang.

#### 2.4.4 Analisis Korelasi Pasang Surut dan Deformasi

Analisis statistik menunjukkan bahwa hubungan antara pasang surut dan deformasi memiliki korelasi sedang dengan nilai:

$$r = 0.61$$

Nilai tersebut menunjukkan bahwa fluktuasi muka air laut memberikan pengaruh terhadap perubahan deformasi struktur, khususnya pada kondisi pasang maksimum. Pengaruh ini menjadi lebih signifikan karena Jembatan Barombong berada pada kawasan tanah lunak reklamasi yang sensitif terhadap perubahan tekanan air pori dan konsolidasi tanah.[14]

#### 2.4.5 Analisis Kombinasi Beban Lalu Lintas dan Lingkungan Pesisir

Hasil penelitian menunjukkan bahwa deformasi struktur Jembatan Barombong dipengaruhi oleh kombinasi:

1. Beban dinamis kendaraan berat,
2. Kondisi tanah lunak reklamasi,
3. Fluktuasi pasang surut Selat Makassar.

Interaksi ketiga faktor tersebut menyebabkan pola deformasi yang bersifat:

- Harian (*short-term deformation*),
- Periodik akibat pasang surut,
- Jangka panjang akibat konsolidasi tanah.

Pada kondisi tertentu, deformasi maksimum terjadi ketika volume kendaraan berat tinggi bersamaan dengan kondisi pasang laut maksimum.

#### 2.4.6 Evaluasi Dampak terhadap Structural Health Monitoring

Hasil analisis menunjukkan bahwa sistem monitoring berbasis MEMS Tiltmeter IoT dan UAV fotogrametri mampu mendeteksi pengaruh beban lalu lintas dan pasang surut terhadap deformasi struktur secara real-time. Keunggulan sistem dalam analisis deformasi meliputi:

- Monitoring kontinu,
- Deteksi deformasi mikro,

- Analisis temporal,
- Integrasi data lingkungan,
- Kemampuan sistem peringatan dini.

Dengan adanya integrasi multi-sensor dan data lingkungan, sistem SHM yang dikembangkan mampu memberikan informasi kondisi struktur secara lebih komprehensif dibandingkan metode monitoring konvensional. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa faktor lalu lintas dan lingkungan pesisir perlu diperhatikan dalam pengelolaan dan pemeliharaan Jembatan Barombong, khususnya dalam upaya mitigasi risiko deformasi jangka panjang pada infrastruktur jembatan di kawasan pesisir Makassar.[15]

### 2.5 Pemodelan Threshold Lendutan dan Sistem Alarm Otomatis

Pemodelan *threshold* lendutan dan sistem alarm otomatis dilakukan untuk membangun mekanisme peringatan dini (*Early Warning System / EWS*) pada Jembatan Barombong berdasarkan hasil monitoring deformasi secara real-time. Sistem ini dirancang agar mampu mendeteksi kondisi deformasi abnormal dan memberikan notifikasi otomatis kepada operator maupun instansi terkait sebelum terjadi kerusakan struktur yang lebih serius. Penentuan nilai *threshold* deformasi dilakukan berdasarkan standar teknis lendutan jembatan, hasil pengamatan lapangan, serta karakteristik struktur dan lingkungan pesisir Makassar. Sistem alarm diintegrasikan dengan dashboard WebGIS dan teknologi IoT sehingga mampu bekerja secara otomatis dan kontinu.

#### 2.5.1 Konsep Threshold Lendutan

Threshold lendutan merupakan batas maksimum deformasi yang masih dianggap aman terhadap kinerja struktur jembatan. Apabila nilai lendutan melebihi batas tertentu, maka kondisi struktur dikategorikan dalam status waspada atau kritis. Pada penelitian ini, penentuan batas lendutan mengacu pada rasio lendutan terhadap panjang bentang jembatan sesuai pendekatan standar monitoring struktur. Batas lendutan kondisi waspada ditentukan menggunakan:

$$\frac{L}{1000}$$

Sedangkan batas kondisi kritis menggunakan:

$$\frac{L}{800}$$

dengan:

- ( $L$ ) = panjang bentang jembatan.

Sebagai contoh, apabila panjang bentang Jembatan Barombong adalah 80 meter, maka:

- Threshold waspada = 80 mm,
- Threshold kritis = 100 mm.

Nilai tersebut digunakan sebagai dasar klasifikasi kondisi deformasi jembatan.[16]

#### 2.5.2 Klasifikasi Kondisi Struktur

Berdasarkan hasil monitoring deformasi, kondisi struktur dibagi menjadi tiga kategori utama:

Tabel 2 Klasifikasi kondisi struktur

Status	Nilai Lendutan	Kondisi Struktur
Normal	( $\delta < L/1000$ )	Struktur aman dan stabil
Waspada	( $L/1000 \leq \delta < L/800$ )	Diperlukan inspeksi teknis
Kritis	( $\delta \geq L/800$ )	Potensi kerusakan serius

Klasifikasi tersebut diterapkan secara otomatis pada sistem WebGIS sehingga kondisi jembatan dapat dipantau secara real-time. Visualisasi status pada dashboard menggunakan kode warna:

- Hijau → normal,
- Kuning → waspada,
- Merah → kritis.

### 2.5.3 Pemodelan Sistem Alarm Otomatis

Sistem alarm otomatis dikembangkan menggunakan integrasi sensor MEMS Tiltmeter IoT, server cloud, algoritma EKF, dan dashboard WebGIS. Sistem bekerja secara kontinu untuk membaca nilai deformasi hasil estimasi lendutan. Alur kerja sistem alarm meliputi:

1. Sensor MEMS membaca perubahan rotasi,
2. Data dikirim ke server melalui MQTT,
3. Sistem melakukan filtering dan fusi data EKF,
4. Nilai lendutan dibandingkan dengan threshold,
5. Sistem mengaktifkan alarm apabila batas terlampaui.

Model estimasi lendutan menggunakan hubungan:

$$\delta = L \sin(\theta)$$

dengan:

- $\delta$  = lendutan,
- L = panjang bentang,
- $\theta$  = sudut rotasi hasil sensor MEMS.

Sistem alarm bekerja secara otomatis tanpa intervensi manual sehingga mampu meningkatkan respons monitoring terhadap potensi deformasi berbahaya.

### 2.5.4 Integrasi Extended Kalman Filter pada Sistem Alarm

Penggunaan *Extended Kalman Filter* (EKF) pada sistem alarm bertujuan untuk meningkatkan kestabilan estimasi deformasi dan mengurangi kesalahan akibat noise sensor. Persamaan pembaruan estimasi EKF dinyatakan sebagai:

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k + K_k (z_k - H_k \hat{x}_k)$$

Melalui proses fusi data, sistem mampu:

- Mengurangi fluktuasi data palsu,
- Meminimalkan alarm kesalahan (*false alarm*),
- Meningkatkan akurasi deteksi deformasi,
- Menghasilkan monitoring yang lebih stabil.

Hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan EKF mampu meningkatkan reliabilitas sistem alarm dibandingkan penggunaan data mentah sensor MEMS secara langsung.

### 2.5.5 Sistem Notifikasi Otomatis

Ketika nilai deformasi melebihi batas threshold tertentu, sistem secara otomatis mengirimkan notifikasi kepada operator monitoring dan instansi terkait melalui:

- WhatsApp Gateway,
- Dashboard WebGIS,
- Email notifikasi.

Informasi notifikasi meliputi:

- Waktu kejadian,
- Lokasi sensor,
- Nilai lendutan,
- Status kondisi jembatan,
- Grafik deformasi terkini.

Contoh pesan notifikasi sistem: “PERINGATAN: Lendutan Jembatan Barombong mencapai 82 mm (Status WASPADA) pada pukul 17.35 WITA. Segera lakukan inspeksi lapangan.”

Sistem notifikasi dirancang untuk mempercepat pengambilan keputusan dalam proses pemeliharaan dan mitigasi risiko struktur.[17]

### 2.5.6 Hasil Pengujian Sistem Alarm

Hasil pengujian menunjukkan bahwa sistem alarm mampu mendeteksi perubahan deformasi secara cepat dan real-time. Selama periode penelitian:

- Sistem berhasil mengirim notifikasi otomatis tanpa keterlambatan signifikan,
- Tidak ditemukan kegagalan komunikasi data utama,
- Tingkat *false alarm* relatif rendah setelah penerapan EKF.

Pada kondisi lalu lintas padat dan pasang maksimum, sistem menunjukkan peningkatan status deformasi ke kategori waspada, namun masih berada di bawah batas kritis struktur.

### 2.5.7 Evaluasi Efektivitas Sistem Peringatan Dini

Berdasarkan hasil evaluasi, sistem peringatan dini berbasis WebGIS dan MEMS IoT memiliki beberapa keunggulan utama:

1. Monitoring real-time dan kontinu,
2. Deteksi dini deformasi struktur,
3. Integrasi multi-sensor,
4. Visualisasi kondisi jembatan secara daring,
5. Biaya implementasi relatif rendah,
6. Mendukung pengambilan keputusan cepat.

Sistem yang dikembangkan juga dinilai sesuai untuk diterapkan pada jembatan bentang menengah di Indonesia, khususnya pada kawasan pesisir dengan risiko deformasi tinggi akibat kombinasi beban lalu lintas dan kondisi geoteknik. Dengan demikian, pemodelan threshold lendutan dan sistem alarm otomatis pada penelitian ini berhasil menunjukkan bahwa integrasi MEMS Tiltmeter IoT, UAV fotogrametri, EKF, dan WebGIS mampu menghasilkan sistem *Structural Health Monitoring* yang efektif, adaptif, dan berkelanjutan untuk mendukung keselamatan infrastruktur jembatan.

## 2.6 Analisis Biaya: Perbandingan TCO dengan SHM Konvensional

Analisis biaya dilakukan untuk mengevaluasi tingkat efisiensi sistem *Structural Health Monitoring* (SHM) berbasis integrasi MEMS Tiltmeter IoT dan UAV fotogrametri dibandingkan dengan sistem SHM konvensional. Evaluasi biaya menggunakan pendekatan *Total Cost of Ownership* (TCO), yaitu metode analisis yang memperhitungkan seluruh biaya investasi, operasional, pemeliharaan, dan pengembangan sistem selama masa penggunaan. Tujuan analisis ini adalah untuk mengetahui apakah sistem SHM biaya rendah yang dikembangkan mampu menjadi alternatif yang lebih ekonomis namun tetap memiliki tingkat akurasi dan efektivitas monitoring yang baik.[18]

### 2.6.1 Konsep Total Cost of Ownership (TCO)

*Total Cost of Ownership* (TCO) merupakan metode analisis ekonomi yang digunakan untuk menghitung keseluruhan biaya suatu sistem selama siklus operasionalnya. Dalam penelitian ini, TCO mencakup:

1. Biaya pengadaan alat,
2. Biaya instalasi,
3. Biaya operasional,
4. Biaya pemeliharaan,
5. Biaya komunikasi data,
6. Biaya pengolahan data,
7. Biaya pengembangan sistem.

Secara umum, TCO dapat dinyatakan sebagai:

$$TCO = C_i + C_o + C_m + C_d$$

dengan:

- $C_i$  = biaya investasi awal,
- $C_o$  = biaya operasional,
- $C_m$  = biaya pemeliharaan,
- $C_d$  = biaya pengembangan dan data.

Analisis dilakukan dengan membandingkan sistem SHM berbasis MEMS IoT dan UAV fotogrametri terhadap sistem monitoring konvensional berbasis sensor geodetik dan inspeksi manual.

### 2.6.2 Biaya Sistem SHM Konvensional

Sistem SHM konvensional umumnya menggunakan:

- Total Station otomatis,
- Sensor accelerometer presisi tinggi,
- Fiber optic sensor,
- GNSS geodetik permanen,
- Sistem monitoring kabel dan server khusus.

Selain biaya investasi yang tinggi, sistem konvensional juga memerlukan:

- Instalasi kompleks,
- Pemeliharaan rutin,
- Tenaga ahli khusus,
- Infrastruktur komunikasi mahal.

Estimasi biaya implementasi SHM konvensional pada jembatan bentang menengah ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 3 Estimasi biaya implementasi SHM konvensional

Komponen	Estimasi Biaya (Rp)
Total Station otomatis	250.000.000
GNSS geodetik permanen	180.000.000
Sensor accelerometer	120.000.000
Sistem server dan jaringan	80.000.000
Instalasi dan kalibrasi	50.000.000
Pemeliharaan tahunan	40.000.000
<b>Total TCO Awal</b>	<b>720.000.000</b>

Berdasarkan tabel tersebut, sistem SHM konvensional memiliki biaya implementasi yang relatif tinggi sehingga sulit diterapkan secara luas pada jembatan daerah dengan keterbatasan anggaran.[19]

### 2.6.3 Biaya Sistem SHM MEMS IoT dan UAV Fotogrametri

Sistem SHM yang dikembangkan pada penelitian ini menggunakan:

- Sensor MEMS Tiltmeter IoT,
- ESP32,
- UAV fotogrametri RTK,
- Cloud database,
- Dashboard WebGIS berbasis open-source.

Penggunaan teknologi IoT dan perangkat berbasis open-source memungkinkan pengurangan biaya implementasi secara signifikan. Estimasi biaya sistem SHM penelitian ditunjukkan pada tabel berikut:

Tabel 4 Estimasi biaya system SHM penelitian

Komponen	Estimasi Biaya (Rp)
Sensor MEMS Tiltmeter (4 unit)	8.000.000
ESP32 dan modul IoT	2.500.000
UAV RTK Fotogrametri	45.000.000
GNSS RTK	25.000.000
Server cloud dan database	5.000.000
Instalasi dan kalibrasi	10.000.000
Pemeliharaan tahunan	8.000.000
<b>Total TCO Awal</b>	<b>103.500.000</b>

Hasil tersebut menunjukkan bahwa biaya implementasi sistem SHM berbasis MEMS IoT dan UAV fotogrametri jauh lebih rendah dibandingkan sistem SHM konvensional.[20]

### 2.6.4 Perbandingan Efisiensi Biaya

Berdasarkan hasil analisis TCO, sistem SHM yang dikembangkan memiliki penghematan biaya lebih dari: 85% dibandingkan sistem SHM konvensional. Perbandingan efisiensi biaya meliputi:

- Pengurangan biaya sensor,
- Pengurangan biaya kabel dan infrastruktur,
- Pengurangan biaya inspeksi manual,
- Pengurangan biaya operasional jangka panjang.

Selain itu, penggunaan dashboard WebGIS berbasis cloud memungkinkan monitoring dilakukan secara jarak jauh sehingga mengurangi kebutuhan tenaga survei lapangan secara rutin.

### 2.6.5 Analisis Efektivitas Sistem terhadap Biaya

Meskipun memiliki biaya implementasi lebih rendah, hasil validasi menunjukkan bahwa sistem SHM berbasis MEMS IoT dan UAV fotogrametri tetap mampu memberikan:

- Akurasi deformasi yang baik,
- Monitoring real-time,
- Sistem alarm otomatis,
- Integrasi multi-sensor,
- Visualisasi deformasi berbasis WebGIS.

Nilai RMSE hasil validasi terhadap Total Station sebesar  $\pm 0.58$  mm menunjukkan bahwa sistem biaya rendah ini masih memiliki performa yang memadai untuk monitoring jembatan bentang menengah. Dengan demikian, rasio biaya terhadap performa (*cost-performance ratio*) sistem yang dikembangkan dinilai sangat efisien.[21]

### 2.6.6 Analisis Keberlanjutan Implementasi

Dari sisi keberlanjutan, sistem berbasis MEMS IoT memiliki beberapa keunggulan:

1. Konsumsi daya rendah,
2. Pemeliharaan sederhana,
3. Mudah dikembangkan,
4. Mendukung monitoring jarak jauh,
5. Skalabilitas tinggi.

Sistem juga dapat diperluas dengan menambahkan sensor tambahan tanpa memerlukan perubahan infrastruktur besar seperti pada sistem SHM konvensional. Hal ini menjadikan sistem lebih fleksibel dan sesuai diterapkan pada banyak jembatan di Indonesia, khususnya daerah dengan keterbatasan anggaran pemeliharaan infrastruktur.

### 2.6.7 Evaluasi Kelayakan Ekonomi Sistem

Berdasarkan hasil analisis TCO, sistem monitoring deformasi berbasis MEMS Tiltmeter IoT dan UAV fotogrametri dinilai layak secara ekonomi untuk diterapkan sebagai solusi *Structural Health Monitoring* biaya rendah di Indonesia. Keunggulan ekonomi sistem meliputi:

- Investasi awal rendah,
- Biaya operasional kecil,
- Efisiensi monitoring jangka panjang,
- Pengurangan kebutuhan inspeksi manual,
- Kemampuan deteksi dini kerusakan.

Dengan biaya implementasi yang lebih murah namun tetap memiliki tingkat akurasi yang baik, sistem ini berpotensi menjadi alternatif monitoring deformasi jembatan yang efektif bagi pemerintah daerah dan instansi pengelola infrastruktur. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi MEMS Tiltmeter IoT, UAV fotogrametri, dan WebGIS mampu menghasilkan sistem SHM yang ekonomis, adaptif, dan berkelanjutan untuk mendukung keselamatan jembatan di kawasan pesisir Indonesia.

## BAB III PENUTUP

### 3.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian mengenai sistem monitoring deformasi Jembatan Barombong berbasis integrasi sensor MEMS Tiltmeter IoT dan UAV fotogrametri untuk *Structural Health Monitoring* (SHM) biaya rendah, diperoleh beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem SHM berbasis integrasi MEMS Tiltmeter IoT dan UAV fotogrametri berhasil dikembangkan dan mampu melakukan monitoring deformasi jembatan secara real-time, kontinu, dan terintegrasi melalui dashboard WebGIS.
2. Sensor MEMS Tiltmeter IoT menunjukkan kinerja yang baik dalam merekam perubahan rotasi struktur dengan interval pengamatan setiap 5 menit dan tingkat keberhasilan transmisi data lebih dari 95% menggunakan protokol MQTT berbasis IoT.
3. UAV fotogrametri RTK mampu menghasilkan model tiga dimensi (*3D model*) dan *Digital Elevation Model* (DEM) dengan ketelitian vertikal sekitar  $\pm 3-5$  cm sehingga layak digunakan untuk analisis deformasi dan ekstraksi lendutan vertikal struktur jembatan.
4. Integrasi data MEMS Tiltmeter, UAV fotogrametri, dan Total Station menggunakan metode *Extended Kalman Filter* (EKF) berhasil meningkatkan kestabilan dan akurasi estimasi deformasi dengan nilai RMSE sebesar  $\pm 0.58$  mm dan korelasi sebesar 0.96 terhadap data referensi Total Station.
5. Hasil analisis menunjukkan bahwa deformasi Jembatan Barombong dipengaruhi secara signifikan oleh beban kendaraan berat dan kondisi lingkungan pesisir, khususnya fluktuasi pasang surut Selat Makassar serta karakteristik tanah lunak reklamasi.
6. Sistem peringatan dini berbasis WebGIS dan notifikasi otomatis WhatsApp berhasil mendeteksi kondisi deformasi secara real-time berdasarkan threshold lendutan struktur sehingga mendukung proses mitigasi risiko dan pemeliharaan preventif jembatan.
7. Berdasarkan analisis *Total Cost of Ownership* (TCO), sistem SHM yang dikembangkan memiliki efisiensi biaya lebih dari 85% dibandingkan sistem SHM konvensional, sehingga berpotensi menjadi solusi monitoring deformasi jembatan yang ekonomis dan berkelanjutan di Indonesia.
8. Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa integrasi MEMS Tiltmeter IoT, UAV fotogrametri, EKF, dan WebGIS mampu menghasilkan sistem *Structural Health Monitoring* biaya rendah yang efektif, adaptif, dan

layak diterapkan pada jembatan bentang menengah, khususnya pada kawasan pesisir dengan risiko deformasi tinggi seperti Jembatan Barombong Makassar.

### 3.2 Implikasi untuk Dinas Bina Marga Sulsel

Hasil penelitian mengenai sistem monitoring deformasi jembatan berbasis integrasi MEMS Tiltmeter IoT dan UAV fotogrametri memiliki berbagai implikasi strategis bagi Dinas Bina Marga dan Bina Konstruksi Provinsi Sulawesi Selatan, khususnya dalam upaya peningkatan keselamatan, efisiensi pemeliharaan, dan modernisasi sistem pengawasan infrastruktur jembatan. Implementasi teknologi *Structural Health Monitoring* (SHM) biaya rendah yang dikembangkan pada penelitian ini dapat menjadi solusi inovatif dalam mendukung pengelolaan jembatan secara lebih adaptif, preventif, dan berbasis data real-time. Beberapa implikasi penting penelitian ini bagi Dinas Bina Marga Sulsel adalah sebagai berikut:

1. Peningkatan Sistem Monitoring Infrastruktur
2. Deteksi Dini Kerusakan Struktur.
3. Efisiensi Biaya Pemeliharaan Jembatan.
4. Penguatan Basis Data Infrastruktur Digital.
5. Dukungan terhadap Konsep Smart Infrastructure.
6. Peningkatan Respons Mitigasi Risiko.
7. Penerapan pada Jembatan Pesisir dan Tanah Lunak.
8. Mendukung Program Pemeliharaan Berbasis Kondisi (*Condition-Based Maintenance*).
9. Peluang Pengembangan Sistem Monitoring Terintegrasi Provinsi.
10. Peningkatan Kapasitas Teknologi dan SDM.

Secara keseluruhan, penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan teknologi MEMS Tiltmeter IoT, UAV fotogrametri, EKF, dan WebGIS memiliki potensi besar untuk mendukung modernisasi sistem pengelolaan jembatan di Sulawesi Selatan secara lebih efektif, ekonomis, dan berkelanjutan. Sistem ini diharapkan dapat menjadi model awal pengembangan *Structural Health Monitoring* berbasis teknologi rendah biaya untuk infrastruktur jembatan di Indonesia.

### REFERENSI

- [1] AASHTO LRFD, *Bridge Design Specifications (SI)*, no. September. 2017.
- [2] A. Abazeed and K. Maciuk, "Comprehensive review of advancements in low-cost sensor technologies for bridge deformation monitoring," *Surv. Rev.*, vol. 6265, pp. 1–14, 2026, doi: 10.1080/00396265.2025.2608386.
- [3] Agisoft LCC St.Peterburg - Russia, "Agisoft Metashape User Manual Standard Edition," p. 139, 2019, [Online]. Available: [https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro\\_1\\_5\\_en.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/metashape-pro_1_5_en.pdf)
- [4] C. Boller, *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. 2009. doi: 10.1002/9780470061626.
- [5] J. M. W. Brownjohn, "Structural health monitoring of civil infrastructure.," *Philos. Trans. Ser. A, Math. Phys. Eng. Sci.*, vol. 365, no. 1851, pp. 589–622, Feb. 2007, doi: 10.1098/rsta.2006.1925.
- [6] X. Cai, "The application of extended kalman filtering based on SLAM," *Appl. Comput. Eng.*, vol. 12, no. 1, pp. 46–51, 2023, doi: 10.54254/2755-2721/12/20230293.
- [7] B. Erfianto, V. Juntriesta, and M. Adrian, "Inframap Webgis As A Solution For Mapping Infrasturture By Applying Thematic Feature

- Map In," vol. 7, no. 3, pp. 1–10, 2023.
- [8] C. Farrar and K. Worden, *Structural Health Monitoring A Machine Learning Perspective*. 2013. doi: 10.1002/9781118443118.
- [9] D. Hartono and S. Darmawan, "Pemanfaatan Unmanned Aerial Vehicle (UAV) untuk Percepatan Pemetaan.," *Reka Geomatika No.1 /*, vol. 2018, no. 1, pp. 30–40, 2018.
- [10] J. Hutson, J. Weber, and A. Russo, "Digital Twins and Cultural Heritage Preservation: A Case Study of Best Practices and Reproducibility in Chiesa dei SS Apostoli e Biagio," *Art Des. Rev.*, vol. 11, no. 01, pp. 15–41, 2023, doi: 10.4236/adr.2023.111003.
- [11] R. E. Kalman, "A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems," *J. Basic Eng.*, vol. 82, no. 1, pp. 35–45, Mar. 1960, doi: 10.1115/1.3662552.
- [12] J. B. Konstruksi *et al.*, "Mitigasi Bencana Banjir Pada Daerah Aliran Sungai (DAS) Baringeng Di Dusun Maccini Desa Panaikang Kabupaten Sinjai Provinsi Sulawesi Selatan," *Int. J. Disaster Risk Sci.*, vol. 7, no. 1, pp. 11–22, 2024, doi: 10.1007/s13753-016-0081-x.
- [13] M. Maboudi *et al.*, "Very high resolution bridge deformation monitoring using UAV-based photogrammetry," *J. Civ. Struct. Heal. Monit.*, vol. 15, no. 8, pp. 3489–3508, 2025, doi: 10.1007/s13349-025-01001-0.
- [14] C. A. Nathasia, A. Muliastari, and S. E. P, "Evaluasi Perbandingan Struktur Jembatan Akibat Beban Lalu Lintas Standar dan Kendaraan Angkutan Barang Over Dimension Over Load ( ODOL ) pada Jembatan KCM Wisma Asri Bekasi," vol. 3, no. 3, 2026.
- [15] A. Rahman and S. H. Purwono, "Analisis Dampak Lalu Lintas dan Biaya Operasional Kendaraan Akibat Kerusakan Jembatan pada Jalan Antar Provinsi ( Studi Kasus Jembatan Glagah , Yogyakarta )," *Snti.Ft.Ugm.Ac.Id*, pp. 1–7, 2024, [Online]. Available: [https://snti.ft.ugm.ac.id/wp-content/uploads/sites/25/2024/02/SNTI-2024\\_Dampak-Ekonomi-dan-Lalu-Lintas-Akibat-Kerusakan-Jembatan.pdf](https://snti.ft.ugm.ac.id/wp-content/uploads/sites/25/2024/02/SNTI-2024_Dampak-Ekonomi-dan-Lalu-Lintas-Akibat-Kerusakan-Jembatan.pdf)
- [16] M. A. Rahman and N. Nugraha, "Analisis Kinerja Lalu Lintas Pada Pembangunan Jembatan Cipamurayan," *J. Tek. Sipil Cendekia*, vol. 3, no. 1, pp. 1–12, 2022, doi: 10.51988/jtsc.v3i1.40.
- [17] Raka Angga Prawir, Bambang Darmo Yuwono, and Bambang Sudarsono, "Studi Deformasi Waduk Pendidikan Diponegoro," *J. Geod. Undip*, vol. 7, pp. 232–242, 2018.
- [18] D. Sebastian *et al.*, "Efisiensi Metode Monitoring Kesehatan Struktur Jembatan Berbasis Iot Di Indonesia," vol. 18, no. 3, pp. 197–207, 2025, doi: 10.24002/jts.v18i3.10373.
- [19] SNI 8460, "Persyaratan Perancangan Geoteknik," *Standar Nas. Indones.*, vol. 8460, pp. 1–323, 2017.
- [20] M. P. Sureshkumar and G. Vennila, "Structural Health Monitoring Using Iot," *Int. Res. J. Multidiscip. Technovation*, vol. 1, no. 6, pp. 144–147, 2019, doi: 10.34256/irjmtcon17.
- [21] K. Tommy Hendryarto, "Implementation of Internet of Things (IoT) Technology in Construction Monitoring," *Civ. Eng. Sci. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 21–33, 2025.