

Integrasi Data Pemeriksaan Geometri dan Estimasi Waktu–Biaya pada Perencanaan Pemeliharaan Jembatan Jalan Tol Layang MBZ

Dian, Mardiaman*, Hikma Dewita

Program Teknik Sipil Universitas Tama Jagakarsa, Jakarta Selatan, Indonesia

ARTICLE INFO

Kata Kunci:

pemeriksaan geometri;
pemeliharaan jembatan;
estimasi biaya; penjadwalan;
Jalan Tol Layang MBZ

**Correspondence email:*
mardi240967@gmail.com

Submitted: 13 Juli 2026

Revised: 01 Agustus 2026

Accepted: 02 Agustus 2026

Published: 04 Agustus 2026

ABSTRAK

Pemeliharaan jembatan berbasis kondisi memerlukan integrasi informasi mengenai kondisi aktual struktur, waktu pelaksanaan, dan biaya agar pengelolaan aset infrastruktur dapat dilakukan secara efektif dan efisien. Penelitian ini bertujuan menganalisis integrasi data pemeriksaan geometri dengan estimasi waktu dan biaya dalam perencanaan pemeliharaan Jembatan Jalan Tol Layang Sheikh Mohammed Bin Zayed (MBZ). Penelitian menggunakan pendekatan kualitatif dengan desain studi kasus. Data penelitian berupa data sekunder yang diperoleh dari kontraktor, meliputi hasil pengukuran geometri menggunakan Robotic Total Station (RTS), GPS geodetik dual frekuensi, dan waterpass digital, serta dokumen Rencana Anggaran Biaya (RAB), jadwal pelaksanaan, dan dokumen teknis lainnya. Data dikumpulkan melalui studi dokumentasi dan dianalisis menggunakan model interaktif Miles, Huberman, dan Saldaña yang meliputi kondensasi data, penyajian data, serta penarikan dan verifikasi kesimpulan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa data pemeriksaan geometri dapat diintegrasikan dengan informasi jadwal pelaksanaan dan RAB dalam satu rangkaian informasi perencanaan pemeliharaan. Kegiatan pemeriksaan geometri, pengolahan data, dan penyusunan perencanaan dilaksanakan selama 90 hari kalender dengan biaya sebesar Rp965.061.750,00. Integrasi data geometri, waktu, dan biaya menghasilkan informasi perencanaan yang lebih terstruktur untuk mendukung penerapan pemeliharaan berbasis kondisi. Namun, integrasi tersebut masih berada pada tingkat informasi perencanaan dan belum menunjukkan hubungan kuantitatif antara perubahan geometri dengan jenis, volume, durasi, dan biaya pekerjaan perbaikan fisik. Penelitian ini memperkuat penerapan konsep pemeliharaan berbasis kondisi dan manajemen aset terintegrasi serta memberikan implikasi praktis bagi pengelola jalan tol dalam meningkatkan akurasi perencanaan dan efisiensi pemeliharaan jembatan.

ABSTRACT

Keywords:

geometric inspection; bridge
maintenance; cost estimation;
scheduling; MBZ Elevated
Toll Road.

Condition-based bridge maintenance requires the integration of information on the actual structural condition, implementation time, and costs to ensure effective and efficient infrastructure asset management. This study aims to analyze the integration of geometric inspection data with time and cost estimates in the maintenance planning of the Sheikh Mohammed Bin Zayed (MBZ) Elevated Toll Road Bridge. The study employed a qualitative approach with a case study design. Secondary data were obtained from the contractor, including geometric measurement results collected using a Robotic Total Station (RTS), dual-frequency geodetic GPS, and a digital level, as well as the Bill of Quantities (BoQ), project schedule, and other technical documents. Data were collected through document analysis and analyzed using the interactive model of Miles, Huberman, and Saldaña, consisting of data condensation, data display, and conclusion drawing and verification. The results show that geometric inspection data can be integrated with project schedule and budget information within a unified maintenance-planning information framework. The geometric inspection, data processing, and preparation of the maintenance plan were completed within 90 calendar days at a total cost of IDR 965,061,750. The integration of geometric, time, and cost data provides more structured planning information to support the implementation of condition-based maintenance. However, the integration remains at the planning-information level and does not yet establish a quantitative relationship between geometric changes and the type, volume, duration, and cost of physical repair works. This study strengthens the application of condition-based maintenance and integrated asset management and provides practical implications for toll road operators in improving planning accuracy and bridge maintenance efficiency.

PENDAHULUAN

Jembatan merupakan infrastruktur transportasi yang berperan penting dalam mendukung konektivitas wilayah, mobilitas manusia, dan distribusi barang. Bertambahnya usia pelayanan, peningkatan volume lalu lintas, serta pengaruh lingkungan menyebabkan struktur jembatan mengalami perubahan kondisi secara bertahap sehingga memerlukan sistem

pemeliharaan yang berkelanjutan. Perkembangan konsep asset management telah mendorong perubahan paradigma dari corrective maintenance menuju condition-based maintenance yang menjadikan kondisi aktual struktur sebagai dasar pengambilan keputusan pemeliharaan. Pendekatan tersebut memungkinkan pengelola infrastruktur meningkatkan keselamatan struktur dan mengoptimalkan penggunaan anggaran pemeliharaan (Abdelkader et al., 2025).

Perkembangan teknologi monitoring struktur menunjukkan bahwa pengukuran deformasi, penurunan, dan pergeseran geometri menjadi bagian penting dalam pengelolaan jembatan modern. (Gao et al., 2024) menjelaskan bahwa integrasi teknologi Robotic Total Station (RTS), Global Navigation Satellite System (GNSS), sensor struktural, dan digital twin mampu meningkatkan akurasi evaluasi kondisi struktur serta mendukung operasi dan pemeliharaan jembatan berbasis kondisi. Rodriguez Polania et al. (2025) juga menunjukkan bahwa integrasi data pengukuran geometrik dengan sistem digital mampu meningkatkan efektivitas monitoring dan mendukung proses pemeliharaan yang lebih adaptif.

Dalam perspektif condition-based maintenance, kondisi aktual struktur merupakan indikator utama dalam menentukan tindakan pemeliharaan. Akosile (2025) menjelaskan bahwa ketahanan dan keberlanjutan infrastruktur jembatan sangat dipengaruhi oleh strategi preservasi dan pemeliharaan yang proaktif. Berdasarkan analisis National Bridge Inventory (NBI), penelitian tersebut menunjukkan bahwa keberhasilan pemeliharaan tidak hanya ditentukan oleh karakteristik material, tetapi juga oleh kemampuan sistem manajemen jembatan dalam mendeteksi perubahan kondisi dan menentukan strategi preservasi yang tepat. Temuan tersebut memperkuat pentingnya pemeliharaan berbasis kondisi sebagai dasar dalam mempertahankan kinerja jembatan dalam jangka panjang. Recent studies have emphasized that bridge maintenance decisions should not only rely on structural condition assessment but also integrate economic considerations and maintenance prioritization. Wiese (2026) developed a cost-driven framework using machine learning and decision theory to support optimal maintenance prioritization based on risk and economic consequences. Similarly, Omer et al. (2025) demonstrated that preventive maintenance strategies provide lower life-cycle costs and more sustainable outcomes than reactive maintenance approaches. These findings highlight the importance of integrating condition data with cost and time considerations in bridge maintenance planning.

Hille et al., (2024) menjelaskan bahwa pemeliharaan berbasis kondisi memungkinkan intervensi dilakukan secara tepat waktu sehingga risiko kerusakan yang lebih besar dapat diminimalkan. Data hasil pemeriksaan geometri yang meliputi koordinat posisi, elevasi, penurunan, dan kemiringan struktur menjadi dasar dalam menentukan jenis penanganan yang diperlukan. Oleh karena itu, pemeriksaan geometri tidak hanya berfungsi sebagai alat evaluasi kondisi struktur, tetapi juga sebagai dasar penyusunan strategi pemeliharaan.

Di Indonesia, kebutuhan pemeliharaan berbasis kondisi semakin penting seiring meningkatnya jumlah infrastruktur jalan tol layang. Jalan Tol Layang Sheikh Mohammed Bin Zayed (MBZ) merupakan salah satu jembatan jalan layang dengan panjang sekitar 36,84 km dan tingkat kompleksitas yang tinggi. Pemeriksaan geometri dilakukan secara periodik setiap tahun menggunakan Total Station Robotic, GPS geodetik dual frekuensi, dan waterpass digital untuk memantau perubahan elevasi, penurunan, kemiringan, dan pergeseran struktur. Hasil pemeriksaan tersebut menghasilkan data koordinat tiga dimensi yang menjadi dasar dalam menentukan kebutuhan pemeliharaan.

Selain kondisi struktur, aspek waktu dan biaya juga memegang peranan penting dalam perencanaan pemeliharaan. Pengendalian waktu merupakan bagian penting dalam keberhasilan pengelolaan infrastruktur. Deviasi antara progres aktual dan rencana pelaksanaan dapat menyebabkan ketidakefisienan penggunaan sumber daya serta mempengaruhi kinerja proyek secara keseluruhan. Oleh karena itu, perencanaan pemeliharaan jembatan memerlukan integrasi antara kondisi aktual struktur, waktu pelaksanaan, dan kebutuhan biaya agar keputusan pemeliharaan dapat dilakukan secara lebih efektif. Temuan serupa juga ditunjukkan oleh Pane et al. (2023) yang menyatakan bahwa pengendalian waktu proyek memerlukan identifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi pelaksanaan pekerjaan sehingga risiko deviasi jadwal dapat diminimalkan.

Roberta dan Mardiaman (2025) menjelaskan bahwa integrasi aspek waktu dan biaya diperlukan untuk meningkatkan akurasi pengendalian proyek. Keterpisahan antara informasi teknis dan aspek manajerial dapat menyebabkan ketidaksesuaian antara kondisi aktual lapangan dengan kebutuhan sumber daya yang direncanakan. Oleh karena itu, pendekatan yang mengintegrasikan informasi teknis dan pengendalian proyek menjadi semakin penting dalam pengelolaan infrastruktur.

Dalam konteks Indonesia, Laksono et al., (2025) melaporkan bahwa kinerja pemeliharaan jembatan dipengaruhi oleh kebijakan, struktur organisasi, pendanaan, dan penerapan Building Information Modeling (BIM). Analisis menggunakan SEM-PLS dan Artificial Neural Network menunjukkan bahwa sistem manajemen yang terintegrasi mampu meningkatkan efektivitas monitoring dan respons terhadap kebutuhan pemeliharaan. Temuan tersebut mendukung pentingnya integrasi data pemeriksaan dan perencanaan sumber daya dalam pengelolaan aset jembatan sehingga proses pemeliharaan dapat dilakukan secara lebih efektif dan berkelanjutan.

Creswell (2014) menjelaskan bahwa estimasi biaya pemeliharaan harus mempertimbangkan kondisi aktual struktur, volume pekerjaan, metode pelaksanaan, dan data historis sehingga penggunaan anggaran menjadi lebih efektif. Pada sisi lain, estimasi waktu merupakan bagian dari manajemen proyek yang bertujuan mengendalikan pelaksanaan

pekerjaan agar sesuai dengan target yang telah ditetapkan. Afriani et al., (2024) menunjukkan bahwa integrasi informasi pada tahapan penjadwalan dapat meningkatkan efisiensi pelaksanaan proyek. Tama et al. (2024) juga menjelaskan bahwa ketepatan estimasi biaya berpengaruh terhadap efektivitas pengendalian sumber daya proyek. Beberapa penelitian sebelumnya lebih banyak menitikberatkan pada aspek monitoring struktur, digital twin, Building Information Modeling (BIM), dan estimasi biaya secara terpisah. Gao et al. (2024) berfokus pada pengembangan digital twin untuk operasi dan pemeliharaan jembatan, sedangkan Rodriguez-Polania et al. (2025) menekankan integrasi Building Information Modeling (BIM) dalam monitoring dan evaluasi kondisi jembatan. Meskipun penelitian-penelitian tersebut memberikan kontribusi penting terhadap pengelolaan infrastruktur, sebagian besar masih membahas aspek teknis, digitalisasi, dan biaya secara terpisah sehingga keterkaitan antara data pemeriksaan geometri dengan aspek waktu dan biaya belum banyak dikaji secara terpadu. Estimasi biaya berpengaruh terhadap efektivitas pengendalian sumber daya proyek. Beberapa sumber menunjukkan bahwa studi mengenai “apa yang perlu diperbaiki” (teknis) sering tidak menyertakan bagaimana biaya pemeliharaan akan ditimbulkan dan bagaimana estimasi biaya dapat memandu prioritas pemeliharaan. Oleh karena itu, integrasi data pemeriksaan geometrik dengan perencanaan biaya bisa menjawab gap ini dan meningkatkan akurasi rencana pemeliharaan jangka panjang.

Kondisi tersebut menunjukkan adanya kesenjangan penelitian (research gap), yaitu masih terbatasnya kajian yang menghubungkan data hasil pemeriksaan geometri dengan estimasi waktu dan biaya pada kegiatan pemeliharaan jembatan, khususnya pada infrastruktur jalan tol layang dengan tingkat kompleksitas tinggi seperti Jalan Tol Layang MBZ. Permasalahan ini menyebabkan hubungan antara kondisi aktual struktur dan kebutuhan sumber daya pemeliharaan belum tergambarkan secara menyeluruh. Padahal, dalam perspektif integrated asset management, keputusan pemeliharaan tidak hanya dipengaruhi oleh kondisi teknis, tetapi juga oleh aspek biaya dan waktu pelaksanaan (Zhao et al., 2025).

Berdasarkan permasalahan tersebut, penelitian ini menawarkan unsur kebaruan berupa integrasi data pemeriksaan geometri, estimasi waktu, dan biaya dalam perencanaan pemeliharaan Jembatan Jalan Tol Layang MBZ. Berbeda dengan penelitian sebelumnya yang membahas aspek teknis, biaya, atau digitalisasi secara terpisah, penelitian ini memanfaatkan data hasil pemeriksaan geometri sebagai dasar dalam menentukan kebutuhan waktu dan biaya pemeliharaan sehingga menghasilkan perencanaan yang lebih realistis dan mendukung penerapan condition-based maintenance serta integrated asset management.

Tujuan penelitian ini adalah menganalisis integrasi data pemeriksaan geometri dan estimasi waktu-biaya dalam perencanaan pemeliharaan Jembatan Jalan Tol Layang Sheikh Mohammed Bin Zayed (MBZ). Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan kontribusi teoritis dalam pengembangan konsep condition-based maintenance dan integrated asset management, serta memberikan manfaat praktis bagi pengelola jalan tol dalam meningkatkan akurasi perencanaan, efisiensi penggunaan sumber daya, dan keberlanjutan pemeliharaan infrastruktur jembatan.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif dengan desain studi kasus (case study). Pendekatan studi kasus dipilih karena penelitian berfokus pada pemahaman secara mendalam mengenai integrasi data pemeriksaan geometri dengan estimasi waktu dan biaya dalam perencanaan pemeliharaan Jembatan Jalan Tol Layang Sheikh Mohammed Bin Zayed (MBZ). Menurut Hollweck (2014), studi kasus sesuai digunakan untuk menjelaskan fenomena yang kompleks dan kontekstual sehingga memungkinkan peneliti memperoleh gambaran menyeluruh mengenai suatu sistem, proses, atau aktivitas tertentu. Pendekatan ini dipandang sesuai dengan tujuan penelitian yang tidak berorientasi pada pengujian hipotesis, tetapi pada pemahaman keterkaitan antara kondisi geometri struktur dengan kebutuhan sumber daya pemeliharaan.

Penelitian dilaksanakan pada Jembatan Jalan Tol Layang MBZ yang merupakan salah satu jembatan jalan layang dengan tingkat kompleksitas tinggi di Indonesia. Pengumpulan data dilakukan pada tahun 2025 dengan memanfaatkan dokumen hasil pemeriksaan geometri dan dokumen pendukung yang diperoleh dari kontraktor pelaksana pemeliharaan. Pemilihan lokasi penelitian didasarkan pada karakteristik jembatan yang memiliki panjang sekitar 36,84 km serta kebutuhan pemeriksaan geometri secara periodik untuk memantau perubahan elevasi, penurunan, kemiringan, dan pergeseran struktur.

Subjek penelitian tidak berupa responden atau partisipan individu, melainkan berupa dokumen dan data teknis yang digunakan dalam pelaksanaan pemeliharaan. Sumber data penelitian terdiri atas data sekunder yang diperoleh dari kontraktor, meliputi data koordinat hasil pengukuran menggunakan TS Robotic, data pengukuran GPS geodetik dual frekuensi, data waterpass digital, gambar kerja, jadwal pelaksanaan pekerjaan, serta dokumen Rencana Anggaran Biaya (RAB). Pemilihan data dilakukan secara purposive dengan mempertimbangkan kelengkapan, kesesuaian, dan keterkaitan data terhadap tujuan penelitian. Teknik purposive sampling digunakan karena hanya dokumen yang relevan dengan kegiatan pemeriksaan geometri dan perencanaan pemeliharaan yang dijadikan sumber analisis (Saunders et al., 2026).

Teknik pengumpulan data dilakukan melalui studi dokumentasi. Creswell (2014) menjelaskan bahwa dokumentasi merupakan salah satu sumber data utama dalam penelitian kualitatif yang memungkinkan peneliti memperoleh informasi secara sistematis dari berbagai dokumen tertulis. Pada penelitian ini, dokumen yang dianalisis meliputi hasil pengukuran koordinat titik kontrol dan titik objek jembatan, data elevasi pier dan girder, jadwal pelaksanaan pekerjaan, serta rincian biaya pemeliharaan. Data tersebut kemudian dikelompokkan berdasarkan fungsi dan keterkaitannya dalam mendukung proses analisis.

Data pemeriksaan geometri yang dianalisis berupa koordinat X, Y, dan Z hasil pengukuran tahun 2025. Data tersebut digunakan untuk menggambarkan posisi horizontal dan elevasi titik pengamatan pada elemen pier. Karena penelitian tidak menganalisis koordinat pembandingan dari periode sebelumnya, data tahun 2025 tidak digunakan untuk menghitung deformasi, penurunan, kemiringan, atau pergeseran struktur. Data tersebut diposisikan sebagai data kondisi eksisting dan sebagai dasar bagi pemeriksaan pada periode berikutnya.

Validasi data dilakukan menggunakan triangulasi sumber dan audit trail. Pemeriksaan konsistensi data dilakukan dengan mencocokkan ruang lingkup kegiatan dalam laporan pemeriksaan geometri, jadwal pelaksanaan, dan dokumen RAB. Pemeriksaan ini dilakukan untuk memastikan bahwa aktivitas, durasi, dan komponen biaya merujuk pada kegiatan yang sama. Pendekatan ini bertujuan untuk meningkatkan kredibilitas dan konsistensi data yang digunakan dalam penelitian. Selain itu, audit trail diterapkan dengan mendokumentasikan seluruh tahapan pengumpulan, pengelompokan, dan pengolahan data sehingga proses penelitian dapat ditelusuri kembali secara sistematis.

Analisis data dilakukan menggunakan model interaktif Miles, Huberman, dan Saldaña (2014), yang terdiri atas tiga tahapan utama, yaitu reduksi data, penyajian data, dan penarikan kesimpulan. Tahap reduksi data dilakukan dengan mengelompokkan informasi berdasarkan kategori data geometri, data waktu pelaksanaan, dan data biaya pemeliharaan. Tahap penyajian data dilakukan dalam bentuk tabel, uraian naratif, dan hubungan antar data untuk memudahkan interpretasi.

$$TC = \sum_{i=1}^n C_i \quad (1)$$

dimana:

- TC = total biaya pemeliharaan (Rp)
- C_i = biaya masing-masing item pekerjaan
- n = jumlah item pekerjaan

Durasi kegiatan diperoleh dari dokumen jadwal pelaksanaan. Total durasi ditentukan berdasarkan rentang waktu mulai hingga selesainya kegiatan persiapan, pemeriksaan geometri, pengolahan data, dan penyusunan laporan. Berdasarkan dokumen jadwal, keseluruhan kegiatan dilaksanakan selama 90 hari kalender.

Selanjutnya, penarikan kesimpulan dilakukan melalui identifikasi keterkaitan antara kondisi geometri struktur dengan kebutuhan waktu dan biaya pemeliharaan sehingga diperoleh gambaran mengenai integrasi data dalam mendukung perencanaan pemeliharaan jembatan.

Tahapan penelitian dimulai dengan pengumpulan data sekunder dari kontraktor, dilanjutkan dengan identifikasi dan klasifikasi data hasil pemeriksaan geometri, data jadwal pelaksanaan, serta data biaya pemeliharaan. Selanjutnya dilakukan analisis keterkaitan antar data untuk memperoleh gambaran mengenai hubungan kondisi aktual struktur dengan kebutuhan sumber daya pemeliharaan.

Integrasi data dilakukan melalui pemetaan antara keluaran pemeriksaan geometri, aktivitas dalam jadwal pelaksanaan, dan informasi biaya dalam RAB. Pemetaan tersebut menghasilkan satu rangkaian informasi teknis, waktu, dan biaya untuk mendukung perencanaan pemeliharaan.

Secara konseptual, perencanaan pemeliharaan dalam penelitian ini dipandang sebagai fungsi dari integrasi data geometri, waktu pelaksanaan, dan biaya pemeliharaan sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (1).

Setelah proses pengumpulan dan klasifikasi data dilakukan, tahapan berikutnya adalah mengintegrasikan data hasil pemeriksaan geometri dengan informasi waktu pelaksanaan dan estimasi biaya pemeliharaan. Integrasi ini bertujuan untuk memperoleh gambaran yang komprehensif mengenai hubungan antara kondisi aktual struktur dengan kebutuhan sumber daya yang diperlukan dalam kegiatan pemeliharaan. Proses integrasi dilakukan secara bertahap mulai dari identifikasi kondisi struktur berdasarkan hasil pengukuran geometri, penentuan jenis pekerjaan yang sesuai, penyusunan jadwal pelaksanaan, hingga perhitungan kebutuhan biaya. Tahapan integrasi yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Tahapan Integrasi Data Geometri, Waktu, dan Biaya

Tahapan	Input Data	Output
Identifikasi kondisi struktur	Data koordinat X, Y, Z hasil TS Robotic	Informasi perubahan geometri
Penentuan jenis pekerjaan	Hasil evaluasi kondisi struktur	Jenis penanganan pemeliharaan
Penjadwalan pekerjaan	Volume pekerjaan dan metode pelaksanaan	Durasi pelaksanaan
Perhitungan biaya	Volume pekerjaan dan AHSP	Rencana Anggaran Biaya
Integrasi data	Data geometri, waktu, dan biaya	Perencanaan pemeliharaan terpadu

Tahapan integrasi data yang digunakan dalam penelitian ini disajikan pada Tabel 1. Proses tersebut menggambarkan hubungan antara data geometri, waktu pelaksanaan, dan biaya pemeliharaan sebagai dasar penyusunan perencanaan pemeliharaan berbasis kondisi.

Hasil analisis kemudian disusun dalam bentuk interpretasi yang menggambarkan peran integrasi data geometri, waktu, dan biaya dalam mendukung perencanaan pemeliharaan Jembatan Jalan Tol Layang MBZ. Pendekatan tersebut diharapkan mampu menghasilkan informasi yang komprehensif dan mendukung penerapan konsep condition-based maintenance serta integrated asset management pada infrastruktur jembatan.

HASIL

Pemeriksaan Geometri Jembatan

Pemeriksaan geometri Jembatan Jalan Tol Layang Sheikh Mohammed Bin Zayed (MBZ) tahun 2025 dilakukan untuk memperoleh gambaran kondisi aktual struktur jembatan melalui pengukuran koordinat tiga dimensi pada elemen pier dan girder. Pengukuran dilakukan menggunakan TS Robotic, GPS Geodetik Dual Frekuensi, dan waterpass digital sehingga diperoleh data koordinat X, Y, dan Z pada setiap titik pengamatan. Penggunaan alat ukur dan titik referensi yang sama setiap tahun bertujuan untuk mendeteksi perubahan elevasi, penurunan (settlement), kemiringan (tilting), dan pergeseran struktur sebagai dasar evaluasi kondisi jembatan.

Hasil pengukuran geometri menghasilkan data koordinat tiga dimensi yang merepresentasikan kondisi aktual elemen struktur jembatan. Data tersebut meliputi koordinat horizontal (X dan Y) serta elevasi (Z) yang digunakan untuk mengevaluasi kemungkinan terjadinya perubahan posisi, penurunan, maupun kemiringan struktur. Pengukuran dilakukan pada titik-titik pengamatan yang telah ditetapkan pada elemen pier dan girder dengan menggunakan titik referensi yang sama untuk menjaga konsistensi hasil pengamatan dari waktu ke waktu. Contoh hasil pengukuran geometri tahun 2025 yang diperoleh dari beberapa titik pengamatan disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Contoh Data Posisi dan Elevasi Hasil Pemeriksaan Geometri Tahun 2025

Kode Titik	X (m)	Y (m)	Elevasi Z (m)	Deskripsi
P40-TH	719.757,893	9.308.604,836	31,894	Pier
P40-BH	719.757,973	9.308.604,517	25,132	Pier

Data pada Tabel 2 menunjukkan posisi horizontal dan elevasi dua titik pengamatan pada elemen pier berdasarkan pemeriksaan tahun 2025. Data tersebut menggambarkan kondisi posisi titik pada saat pemeriksaan dan dapat digunakan sebagai data eksisting untuk pemeriksaan berikutnya. Penentuan perubahan posisi, penurunan, atau kemiringan memerlukan perbandingan dengan data periode sebelumnya menggunakan titik referensi dan prosedur pengukuran yang sama.

Hasil dokumentasi menunjukkan bahwa pengukuran dilakukan pada elemen pier dan girder sepanjang ruas Jalan Tol Layang MBZ yang memiliki panjang sekitar 36,84 km. Salah satu hasil pengukuran menunjukkan titik P40-TH memiliki koordinat X sebesar 719.757,893; Y sebesar 9.308.604,836; dan elevasi Z sebesar 31,894 m, sedangkan titik P40-BH mempunyai koordinat X sebesar 719.757,973; Y sebesar 9.308.604,517; dan elevasi Z sebesar 25,132 m. Data geometris tersebut menjadi basis informasi teknis untuk menentukan kebutuhan pemeliharaan struktur.

Estimasi Biaya Pemeriksaan Geometri dan Perencanaan Pemeliharaan

Berdasarkan dokumen Rencana Anggaran Biaya (RAB), total biaya kegiatan pemeriksaan geometri dan penyusunan perencanaan pemeliharaan Jembatan Jalan Tol Layang MBZ sebesar Rp965.061.750,00. Analisis dokumen biaya dan jadwal pelaksanaan menunjukkan bahwa kegiatan pemeliharaan tidak hanya ditentukan oleh kondisi struktur, tetapi juga dipengaruhi oleh kebutuhan sumber daya dan durasi pelaksanaan pekerjaan. Data hasil pengukuran geometri menjadi dasar dalam menentukan ruang lingkup pekerjaan yang selanjutnya berpengaruh terhadap estimasi biaya dan waktu pelaksanaan. Ringkasan parameter utama yang diperoleh dari hasil analisis biaya dan jadwal pemeliharaan disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Ringkasan Waktu dan Biaya Pemeriksaan Geometri dan Perencanaan Pemeliharaan

Uraian	Nilai
Panjang Jembatan MBZ	36,84 km
Durasi pekerjaan	90 hari kalender
Total biaya pemeliharaan	Rp965.061.750
Metode pengukuran	TS Robotic, GPS Geodetik, Waterpass Digital
Output utama	Data koordinat X, Y, Z
Ruang lingkup kegiatan	Pemeriksaan geometri dan penyusunan perencanaan pemeliharaan

Sumber: olahan data (2026)

Tabel 3 menunjukkan bahwa pelaksanaan pemeliharaan Jembatan Jalan Tol Layang MBZ memerlukan integrasi antara data teknis hasil pemeriksaan geometri dengan aspek waktu dan biaya. Durasi pelaksanaan selama 90 hari kalender dan kebutuhan biaya sebesar Rp965.061.750,00 menggambarkan bahwa kegiatan pemeliharaan memerlukan perencanaan yang sistematis untuk menjamin efektivitas pelaksanaan serta menjaga kinerja struktur jembatan secara berkelanjutan. Dengan demikian, informasi biaya dan waktu menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari hasil pemeriksaan geometri dalam mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan berbasis kondisi.

Nilai Rp965.061.750,00 merupakan biaya total yang tercantum dalam dokumen RAB kegiatan pemeriksaan geometri dan penyusunan perencanaan. Penelitian ini menggunakan nilai total tersebut sebagai informasi biaya dan tidak menganalisis proporsi masing-masing komponen biaya.

Penjadwalan Pemeriksaan Geometri dan Penyusunan Perencanaan

Berdasarkan analisis jadwal pelaksanaan, durasi total pekerjaan pemeliharaan direncanakan selama 90 hari kalender. Tahapan pekerjaan dimulai dari persiapan, pengumpulan data sekunder, pengukuran geometri, pengolahan data, hingga penyusunan laporan akhir. Berdasarkan hasil analisis jadwal pelaksanaan, kegiatan pemeliharaan Jembatan Jalan Tol Layang MBZ dilaksanakan secara sistematis melalui beberapa tahapan yang saling berkaitan. Pembagian tahapan pekerjaan dilakukan untuk memastikan seluruh aktivitas dapat berlangsung secara efektif sesuai dengan target waktu yang telah ditetapkan. Setiap tahapan memiliki fungsi yang berbeda, mulai dari persiapan dan pengumpulan data hingga pengolahan hasil pengukuran dan penyusunan laporan akhir. Rincian tahapan pelaksanaan pekerjaan pemeliharaan disajikan pada Tabel 4.

Tabel 4. Tahapan Pemeriksaan Geometri dan Penyusunan Perencanaan Pemeliharaan

Tahapan	Uraian Kegiatan	Keluaran
Persiapan	Pengumpulan data sekunder dan koordinasi	Data sekunder dan jadwal awal
Survei lapangan	Pengukuran geometri menggunakan TS Robotic	Data koordinat X, Y, Z
Pengolahan data	Analisis koordinat dan evaluasi kondisi	Informasi kondisi struktur terkini
Penyusunan laporan	Penyajian hasil dan rekomendasi	Dokumen hasil dan rekomendasi

Sumber: Data olahan (2026)

Tabel 4 menunjukkan bahwa pelaksanaan pemeliharaan dilakukan melalui tahapan yang terstruktur dan saling mendukung. Tahap pengukuran geometri menjadi aktivitas utama karena menghasilkan data kondisi aktual struktur yang selanjutnya digunakan dalam proses pengolahan dan analisis. Hasil analisis tersebut menjadi dasar dalam penyusunan rekomendasi pemeliharaan, sehingga seluruh tahapan pekerjaan membentuk suatu sistem yang terintegrasi antara aspek teknis, waktu, dan biaya. Pendekatan ini mendukung penerapan pemeliharaan berbasis kondisi yang lebih efektif dan efisien pada Jembatan Jalan Tol Layang MBZ

Integrasi Data Geometri, Waktu, dan Biaya

Tabel 5. Integrasi Data Geometri, Waktu, dan Biaya Berdasarkan Dokumen yang Dianalisis

Aspek	Data yang tersedia	Peran dalam perencanaan
Geometri	Koordinat X, Y, dan Z tahun 2025	Memberikan informasi posisi dan elevasi titik pengamatan
Waktu	Durasi keseluruhan 90 hari kalender	Menunjukkan rentang waktu pemeriksaan dan penyusunan perencanaan
Biaya	Total RAB Rp965.061.750,00	Menunjukkan kebutuhan biaya keseluruhan kegiatan
Tahapan kegiatan	Persiapan, survei lapangan, pengolahan data, dan penyusunan laporan	Menunjukkan alur pelaksanaan kegiatan
Keluaran integrasi	Data geometri, jadwal, RAB, dan laporan	Mendukung penyusunan informasi perencanaan pemeliharaan

Sumber: Data olahan (2026)

Tabel 5 menunjukkan bahwa integrasi dalam penelitian ini dilakukan pada tingkat informasi perencanaan. Data geometri memberikan informasi teknis mengenai posisi dan elevasi titik pengamatan, jadwal menunjukkan tahapan dan durasi kegiatan, sedangkan RAB menunjukkan kebutuhan biaya keseluruhan. Ketiga jenis informasi tersebut disatukan dalam satu alur pemeriksaan dan penyusunan perencanaan pemeliharaan. Integrasi ini tidak dimaksudkan untuk menunjukkan bahwa satu nilai koordinat secara langsung menghasilkan jenis dan biaya perbaikan fisik tertentu.

Hasil analisis dokumen menunjukkan bahwa data geometri, jadwal, dan biaya memiliki fungsi yang berbeda tetapi saling melengkapi dalam proses perencanaan. Data geometri memberikan informasi mengenai posisi dan elevasi titik pengamatan, jadwal menunjukkan tahapan dan durasi kegiatan, sedangkan RAB menunjukkan kebutuhan biaya keseluruhan. Integrasi dilakukan dengan menempatkan ketiga jenis informasi tersebut dalam satu rangkaian kegiatan

mulai dari persiapan, pemeriksaan lapangan, pengolahan data, hingga penyusunan laporan. Berdasarkan data yang tersedia, penelitian ini tidak menghitung hubungan kuantitatif antara perubahan geometri dengan volume atau biaya pekerjaan fisik. Oleh karena itu, hasil integrasi diposisikan sebagai integrasi informasi untuk mendukung perencanaan, bukan sebagai model penentuan biaya perbaikan berdasarkan tingkat deformasi struktur.

Pembahasan

Hasil penelitian menunjukkan bahwa pemeriksaan geometri tahunan memiliki peran penting dalam sistem pemeliharaan berbasis kondisi (condition-based maintenance). Data koordinat dan elevasi yang diperoleh melalui TS Robotic dan GPS Geodetik memberikan informasi mengenai kondisi aktual struktur sehingga kebutuhan penanganan dapat ditentukan secara lebih tepat. Temuan ini sejalan dengan Gao et al. (2024) yang menjelaskan bahwa data monitoring struktur merupakan komponen utama dalam sistem operasi dan pemeliharaan berbasis digital twin. Informasi geometri yang diperoleh secara periodik berpotensi digunakan untuk mendeteksi perubahan struktur apabila hasil pengukuran dibandingkan dengan data periode sebelumnya menggunakan titik referensi dan prosedur pengukuran yang sama.

Hasil penelitian juga menunjukkan bahwa aspek biaya tidak dapat dipisahkan dari kondisi aktual struktur. Nilai RAB sebesar Rp965.061.750,00 menunjukkan kebutuhan biaya keseluruhan kegiatan pemeriksaan geometri dan penyusunan perencanaan sebagaimana tercantum dalam dokumen yang dianalisis. Temuan ini mendukung penelitian Lee et al. (2024) yang menyatakan bahwa estimasi biaya pemeliharaan seharusnya didasarkan pada data kondisi aktual, bukan hanya berdasarkan pendekatan historis. Dengan demikian, pendekatan berbasis kondisi memungkinkan alokasi anggaran menjadi lebih efektif dan sesuai dengan kebutuhan lapangan.

Durasi 90 hari kalender menunjukkan rentang waktu yang direncanakan untuk menyelesaikan kegiatan persiapan, pemeriksaan geometri, pengolahan data, dan penyusunan laporan. (Dharyatiputri et al., 2024) menunjukkan bahwa pengendalian durasi pekerjaan dan optimasi jadwal sangat memengaruhi efektivitas pelaksanaan proyek. Pada penelitian ini, durasi pelaksanaan selama 90 hari kalender menunjukkan bahwa penjadwalan yang sistematis mendukung efisiensi pekerjaan pemeliharaan dan pengendalian sumber daya.

Temuan utama penelitian ini adalah adanya keterkaitan antara data geometri, waktu, dan biaya dalam perencanaan pemeliharaan. Sebagian besar penelitian sebelumnya hanya membahas aspek monitoring struktur atau aspek ekonomi secara terpisah. Gao et al. (2024) lebih menekankan pada digital twin, sedangkan Lee et al. (2024) berfokus pada estimasi biaya.

Sementara itu, Rodriguez-Polania et al. (2025) lebih banyak membahas integrasi BIM dalam monitoring jembatan. Penelitian ini menunjukkan bahwa data teknis, waktu, dan biaya dapat disajikan secara terpadu dalam proses perencanaan pemeliharaan. The present findings are consistent with Omer et al. (2025), who concluded that preventive maintenance strategies are economically superior to reactive interventions because they reduce whole-life costs and improve sustainability. Furthermore, Wiese (2026) emphasized that maintenance prioritization should incorporate economic consequences and risk levels to support data-driven decision making. Therefore, integrating geometric inspection results with time and cost estimation can provide a more effective basis for bridge maintenance planning.

Secara teoretis, hasil penelitian memperkuat konsep condition-based maintenance dan integrated asset management yang menempatkan kondisi aktual struktur sebagai dasar pengambilan keputusan. Integrasi data memungkinkan pengelolaan aset infrastruktur dilakukan secara lebih rasional dan berorientasi pada efisiensi sumber daya. Temuan ini juga memperlihatkan bahwa pendekatan terintegrasi dapat mengurangi ketidaksesuaian antara kondisi lapangan dengan estimasi biaya maupun jadwal pelaksanaan yang disusun sebelumnya.

Secara praktis, hasil penelitian memberikan implikasi bagi Badan Usaha Jalan Tol dan pengelola infrastruktur lainnya dalam menyusun sistem pemeliharaan berbasis data. Pemanfaatan hasil pengukuran geometri secara berkala dapat meningkatkan akurasi perencanaan, mengoptimalkan penggunaan anggaran, serta mengurangi risiko keterlambatan pekerjaan. Penelitian selanjutnya disarankan untuk mengembangkan integrasi data geometri dengan Building Information Modeling (BIM), sensor Structural Health Monitoring (SHM), dan teknologi digital twin sehingga proses pengelolaan aset jembatan dapat dilakukan secara real time dan berkelanjutan.

SIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa data pemeriksaan geometri Jembatan Jalan Tol Layang Sheikh Mohammed Bin Zayed dapat diintegrasikan dengan informasi waktu dan biaya pada tingkat perencanaan pemeliharaan. Pemeriksaan tahun 2025 menggunakan TS Robotic, GPS geodetik dual frekuensi, dan waterpass digital menghasilkan data koordinat X, Y, dan Z yang menggambarkan posisi serta elevasi titik pengamatan.

Data geometri tersebut dihubungkan dengan dokumen jadwal pelaksanaan dan Rencana Anggaran Biaya. Berdasarkan dokumen yang dianalisis, kegiatan pemeriksaan geometri dan penyusunan perencanaan dilaksanakan selama 90 hari kalender dengan biaya sebesar Rp965.061.750,00. Durasi dan biaya tersebut merupakan durasi serta

biaya kegiatan pemeriksaan, pengolahan data, dan penyusunan perencanaan, bukan durasi dan biaya pekerjaan perbaikan fisik seluruh jembatan.

Integrasi dilakukan dengan menyatukan informasi teknis hasil pemeriksaan, tahapan kegiatan dalam jadwal, dan nilai biaya dalam RAB. Hasil integrasi memberikan penyajian informasi yang lebih terstruktur untuk mendukung proses perencanaan pemeliharaan. Namun, data yang tersedia belum digunakan untuk menghitung deformasi atau menentukan hubungan kuantitatif antara perubahan geometri dengan volume dan biaya pekerjaan fisik.

Penelitian selanjutnya perlu menggunakan data pengukuran dari dua atau lebih periode, kriteria toleransi, hasil inspeksi kondisi elemen, dan rincian volume pekerjaan agar perubahan geometri dapat dihubungkan secara langsung dengan jenis penangangan, durasi, dan biaya perbaikan.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdelkader, E. M., Al-Sakkaf, A., Ebrahim, K., & Elkabalawy, M. (2025). Maintenance Budget Allocation Models of Existing Bridge Structures: Systematic Literature and Scientometric Reviews of the Last Three Decades. *Infrastructures*, 10(9), 1–70. <https://doi.org/10.3390/infrastructures10090252>
- Afriani, B., Widiasanti, I., & Wangi, I. P. (2024). Pengimplementasian Sistem Building Information Modelling Pada Tahapan Penjadwalan Gedung PUT PNJ. *Jurnal Talenta Sipil*, 7(1), 200. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v7i1.435>
- Akosile, S. S. (2025). *Enhancing Bridge Resilience and Sustainability by Assessing Material Durability and Preservation in Wet-Freeze Zones*.
- Dharyatiputri, J. F., Juwono, P. T., & Cahya, E. N. (2024). Studi Manajemen Konstruksi Bangunan Spillway dan Intake pada Bendungan Bulango Ulu Provinsi Gorontalo Menggunakan Metode Fasttrack dan Crashing. *Jurnal Talenta Sipil*, 7(2), 649. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v7i2.573>
- Gao, Y., Xiong, G., Hu, Z., Chai, C., & Li, H. (2024). Bridge Digital Twin for Practical Bridge Operation and Maintenance by Integrating GIS and BIM. *Buildings*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/buildings14123731>
- Hille, F., Herrmann, R., Schneider, R., Pitters, S., Wedel, F., & Hindersmann, I. (2024). Developing a guideline for structural health monitoring of road bridges in Germany. *Bridge Maintenance, Safety, Management, Digitalization and Sustainability - Proceedings of the 12th International Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, IABMAS 2024, 2009–2017*. <https://doi.org/10.1201/9781003483755-236>
- Hollweck, Trista, R. K. Y. (2014). Case study research design and methods. *Journal: CJPE*, 30(1), 61–103. <https://doi.org/10.3138/CJPE.BR-240>
- Creswell, J. W. (2014). *Research design: Qualitative, quantitative, and mixed methods approaches* (4th ed.).
- Laksono, N. B., Latief, Y., & Trigunaryah, B. (2025). Enhancing BIM Application for Bridge Maintenance and Preservation in Indonesia: A Comprehensive Mathematical Evaluation Through SEM PLS – ANN of Policy, Organization, and Funding Strategies. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 38(4), 894–907. <https://doi.org/10.5829/ije.2025.38.04a.18>
- Lee, G., Chang, T., & Chi, S. (2024). Data-driven bridge maintenance cost estimation framework for annual expenditure planning. *Journal of Management in Engineering*, 40(2), 04023068. <https://doi.org/10.1061/JMENEA.MEENG-5706>
- Miles, M. B., Huberman, A. M., & Saldaña, J. (2014). **Qualitative Data Analysis: A Methods Sourcebook** (3rd ed.). SAGE Publications.
- Omer, J., Haroglu, H., & Zafari, B. (2025). A new methodology to inform maintenance decisions and budget requirements for bridges. *International Journal of Sustainable Engineering*, 18(1). <https://doi.org/10.1080/19397038.2025.2514465>
- Pane, M. N., Azhar, A., & Mardiaman, M. (2023). Evaluation of the Implementation Time of The Apbn/Apbd Project at The End of The Year With A Single-Year Budget. *Jurnal Syntax Admiration*, 4(3). <https://doi.org/10.46799/jsa.v4i3.569>
- Roberta, I., & Mardiaman. (2025). Evaluasi Perbandingan Kinerja Proyek Konstruksi Pabrik Kelapa Sawit Menggunakan Metode Earned Value : Studi Kasus Dua Proyek Pabrik Kelapa Sawit. *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil Dan Perencanaan (JARSP)*, 8(3), 242–249. <https://doi.org/10.24815/jarsp.v8i3.46033>
- Rodriguez Polania, D., Tondolo, F., Osello, A., Piras, M., Di Pietra, V., & Grasso, N. (2025). Bridges monitoring and assessment using an integrated bim methodology. *Innovative Infrastructure Solutions*, 10(2). <https://doi.org/10.1007/s41062-025-01864-8>
- Saunders, M. N. K., Lewis, P., & Thornhill, A. (2026). Research methods for business students. In *Multidisciplinary Latin American Journal (MLAJ)* (Vol. 4, Issue 1). <https://doi.org/10.62131/mlaj-v4-n1-editorial>
- Tama, W. A., Permata, I. P., Hendriyani, I., & Pratiwi, R. (2024). Penerapan Building Information Modeling (BIM) untuk Pengestimasian Biaya Proyek Pembangunan Pos Jaga di SD dan SMP Terpadu Balikpapan Selatan. *Jurnal Talenta Sipil*, 7(1), 354. <https://doi.org/10.33087/talentasipil.v7i1.463>

- Wiese, T. (2026). Forecasting the fracture: a cost-driven machine learning framework for optimal bridge maintenance prioritization. *Frontiers in Built Environment*, 12(March), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2026.1685343>
- Zhao, H., Wu, W., Xia, Q., & Xia, Y. (2025). A Digital Twin Framework for Real-Time Monitoring and Full-Field Analysis of Bridges. *International Journal of Bridge Engineering, Management and Research*, 2(3), 1–19. <https://doi.org/10.70465/ber.v2i3.34>