



KAJIAN PERKEMBANGAN TEKNOLOGI MONITORING LENDUTAN JEMBATAN BERBASIS INTERNET OF THINGS (IOT) MENUJU SMART BRIDGE INFRASTRUCTURE

Nurjanah^{1*}, Intan Safitri¹, Agung Yoga Pranata²

¹Teknologi Rekayasa Kontruksi Jalan dan Jembatan-Rekayasa Kontruksi-Politeknik Negeri Tanah Laut

²Teknik Sipil-Teknik Sipil dan Kebumihan-Politeknik Negeri Banjarmasin

Alamat korespondensi :

email: nurjanah@politala.ac.id

Abstract

Bridge condition monitoring is a critical aspect of ensuring the safety, reliability, and service life of transportation infrastructure. Conventional inspection methods have limitations in providing real-time and continuous data on structural conditions. This study aims to examine Internet of Things (IoT)-based bridge deflection monitoring technology, evaluate its effectiveness, and identify future development directions. The method used was a Systematic Literature Review (SLR), analyzing scientific articles from 2021 to 2025 obtained from the Scopus, ScienceDirect, Springer, IEEE Xplore, and MDPI databases based on predetermined inclusion and exclusion criteria. The results of the study indicate that the integration of digital sensors, Wireless Sensor Networks (WSN), cloud computing, Artificial Intelligence (AI), and digital twins can improve the accuracy, real-time capabilities, and sustainability of monitoring compared to conventional methods. Furthermore, the development of bridge monitoring systems has shifted toward a predictive approach capable of detecting and predicting potential damage early on and supporting maintenance planning. Thus, the implementation of IoT contributes to realizing the concept of Smart Bridge Infrastructure that is safer, more efficient, and more sustainable.

Keywords: *Internet of Things; Structural Health Monitoring; bridge deflection; Digital Twin; Artificial Intelligence*

Abstrak

Pemantauan kondisi jembatan merupakan aspek penting dalam menjamin keselamatan, keandalan, dan umur layanan infrastruktur transportasi. Metode inspeksi konvensional memiliki keterbatasan dalam menyediakan data kondisi struktur secara real-time dan berkelanjutan. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji teknologi pemantauan lendutan jembatan berbasis Internet of Things (IoT), mengevaluasi efektivitasnya, serta mengidentifikasi arah pengembangan di masa depan. Metode yang digunakan adalah Systematic Literature Review (SLR) dengan menganalisis artikel ilmiah periode 2021–2025 yang diperoleh dari database Scopus, ScienceDirect, Springer, IEEE Xplore, dan MDPI berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan. Hasil kajian menunjukkan bahwa integrasi sensor digital, Wireless Sensor Network (WSN), cloud computing, Artificial Intelligence (AI), dan digital twin mampu meningkatkan akurasi, kemampuan real-time, dan keberlanjutan pemantauan dibandingkan metode konvensional. Selain itu, perkembangan sistem monitoring jembatan telah bergeser menuju pendekatan prediktif yang mampu mendeteksi dan memprediksi potensi kerusakan secara dini serta mendukung perencanaan pemeliharaan. Dengan demikian, penerapan IoT berkontribusi dalam mewujudkan konsep Smart Bridge Infrastructure yang lebih aman, efisien, dan berkelanjutan.

Kata kunci: *Internet of Things; Structural Health Monitoring; lendutan jembatan; Digital Twin; Artificial Intelligence*

PENDAHULUAN

Jembatan merupakan infrastruktur transportasi yang memiliki peran strategis dalam mendukung konektivitas wilayah, mobilitas masyarakat, serta distribusi barang dan jasa. Kerusakan atau kegagalan struktur jembatan dapat menyebabkan terganggunya aktivitas ekonomi, meningkatnya biaya transportasi, bahkan berpotensi menimbulkan korban jiwa. Oleh karena itu,

pemantauan kondisi struktur jembatan secara berkala menjadi kebutuhan penting untuk menjamin keamanan, kenyamanan, dan keberlanjutan fungsi layanan infrastruktur transportasi (Saidin et al., 2022).

Salah satu parameter utama dalam evaluasi kinerja struktur jembatan adalah lendutan (*deflection*). Lendutan mencerminkan respons struktur terhadap beban yang bekerja dan dapat digunakan sebagai indikator awal terjadinya penurunan kekakuan, degradasi material, maupun kerusakan struktural. Peningkatan lendutan yang melebihi batas pelayanan dapat mengindikasikan adanya penurunan kapasitas struktur sehingga diperlukan tindakan pemeliharaan atau rehabilitasi yang tepat (Deng et al., 2023). Namun demikian, metode inspeksi jembatan yang masih banyak diterapkan saat ini umumnya menggunakan pengamatan visual dan pengukuran periodik secara manual. Metode tersebut memiliki keterbatasan berupa kebutuhan waktu yang relatif lama, biaya operasional yang tinggi, ketergantungan pada sumber daya manusia, serta ketidakmampuan menyediakan data kondisi struktur secara kontinu dan real-time (Sonbul & Rashid, 2023).

Perkembangan teknologi digital mendorong lahirnya konsep Structural Health Monitoring (SHM) yang memanfaatkan sensor dan sistem komunikasi data untuk memantau kondisi struktur secara berkelanjutan. Dalam beberapa tahun terakhir, implementasi Internet of Things (IoT) pada sistem SHM menjadi salah satu topik penelitian yang berkembang pesat karena mampu mengintegrasikan sensor, jaringan komunikasi nirkabel, cloud computing, dan sistem analisis data dalam satu platform monitoring yang terhubung secara real-time (Geetha et al., 2024). Teknologi ini memungkinkan pengelola infrastruktur memperoleh informasi kondisi jembatan secara cepat sehingga potensi kerusakan dapat dideteksi lebih dini.

Berbagai penelitian terdahulu telah mengembangkan sistem monitoring jembatan berbasis IoT dengan beragam pendekatan. Park et al. (2022) mengembangkan sistem monitoring jembatan berbasis cloud yang mampu mengirimkan data sensor secara real-time melalui jaringan LTE. Deng et al. (2023) melakukan kajian perkembangan teknologi SHM pada jembatan dan menunjukkan peningkatan penggunaan sensor digital dalam pemantauan struktur. Chen et al. (2024) meneliti optimasi penempatan sensor pada Wireless Sensor Network (WSN) untuk meningkatkan efektivitas monitoring jembatan. Selain itu, Rahita et al. (2024) menunjukkan bahwa tren penelitian SHM berbasis IoT mulai mengarah pada integrasi kecerdasan buatan (Artificial Intelligence/AI) dan teknologi digital twin guna meningkatkan kemampuan prediksi kerusakan struktur.

Ruang lingkup kajian ini dibatasi pada jembatan tipe girder (*beam bridge* dan *box girder bridge*) dengan bentang pendek hingga menengah yang umumnya menggunakan parameter lendutan sebagai salah satu indikator utama dalam evaluasi kinerja struktur. Pada tipe jembatan ini, pengukuran lendutan dapat digunakan untuk mengidentifikasi perubahan kekakuan struktur, degradasi material, maupun indikasi awal kerusakan struktural. Sebaliknya, jembatan tipe *cable-stayed* dan *suspension bridge* tidak menjadi fokus kajian karena memerlukan parameter monitoring yang lebih kompleks, seperti gaya kabel (*cable force*), tegangan kabel, respons dinamis multi-mode, serta pengaruh interaksi aerodinamis yang tidak dapat direpresentasikan hanya melalui pengukuran lendutan. Oleh karena itu, pembatasan kajian pada jembatan girder dilakukan untuk memperoleh pembahasan yang lebih spesifik dan mendalam mengenai perkembangan teknologi monitoring lendutan berbasis Internet of Things (IoT) (Catbas et al., 2022; Deng et al., 2023).

Meskipun berbagai penelitian telah menunjukkan keberhasilan penerapan IoT dalam monitoring jembatan, sebagian besar penelitian masih berfokus pada pengembangan perangkat keras, metode komunikasi data, atau evaluasi sensor secara terpisah. Kajian yang secara khusus membahas perkembangan teknologi monitoring lendutan jembatan berbasis IoT secara komprehensif, meliputi aspek sensor, Wireless Sensor Network (WSN), cloud computing, Artificial Intelligence (AI), dan digital twin dalam satu kerangka kajian yang terintegrasi masih relatif terbatas. Kondisi ini menunjukkan adanya kesenjangan penelitian (*research gap*) yang perlu dikaji lebih lanjut.

Berdasarkan kondisi tersebut, kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada penyusunan kajian literatur yang mengintegrasikan perkembangan teknologi monitoring lendutan jembatan berbasis IoT dari berbagai aspek teknologi modern, termasuk sensor monitoring, WSN, cloud computing, AI, dan digital twin, serta mengidentifikasi peluang pengembangan menuju konsep

smart bridge infrastructure. Kajian ini diharapkan dapat memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai arah perkembangan teknologi monitoring jembatan masa depan.

Permasalahan yang diangkat dalam penelitian ini adalah bagaimana perkembangan teknologi monitoring lendutan jembatan berbasis IoT dalam lima tahun terakhir, bagaimana efektivitas teknologi yang digunakan, serta tantangan yang masih dihadapi dalam implementasinya pada infrastruktur modern. Kajian ini menjadi penting mengingat kebutuhan sistem monitoring yang mampu memberikan data kondisi struktur secara real-time, akurat, dan berkelanjutan untuk mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan jembatan yang lebih efektif dan efisien.

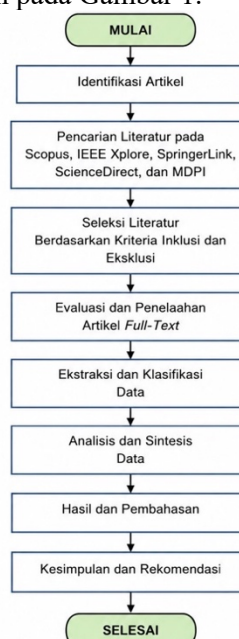
Tujuan penelitian ini adalah menganalisis perkembangan teknologi monitoring lendutan jembatan berbasis *Internet of Things* (IoT) berdasarkan hasil penelitian terkini, mengevaluasi efektivitas berbagai teknologi yang digunakan dalam sistem monitoring, serta mengidentifikasi tantangan dan peluang pengembangan teknologi menuju sistem Structural Health Monitoring yang lebih cerdas, adaptif, dan berkelanjutan.

METODE PENELITIAN

Pengumpulan data dilakukan melalui proses identifikasi, seleksi, evaluasi, dan sintesis artikel yang relevan dengan topik penelitian menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR). Pencarian literatur dilakukan pada database Scopus, ScienceDirect, SpringerLink, IEEE Xplore, dan MDPI dengan menggunakan kata kunci “bridge deflection monitoring”, “Internet of Things for bridge monitoring”, “Structural Health Monitoring”, “Wireless Sensor Network”, dan “real-time bridge monitoring”.

Artikel yang diperoleh kemudian diseleksi berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi. Kriteria inklusi meliputi: (1) artikel dipublikasikan pada periode 2021–2025, (2) membahas teknologi monitoring jembatan berbasis Internet of Things (IoT), Structural Health Monitoring (SHM), Wireless Sensor Network (WSN), cloud computing, Artificial Intelligence (AI), atau digital twin, (3) tersedia dalam bentuk full-text, dan (4) diterbitkan pada jurnal internasional bereputasi atau prosiding konferensi ilmiah. Adapun kriteria eksklusi meliputi artikel yang tidak berkaitan dengan monitoring jembatan, artikel duplikat, artikel yang tidak tersedia secara lengkap, serta publikasi yang tidak memenuhi rentang tahun yang telah ditetapkan.

Selanjutnya dilakukan evaluasi terhadap artikel yang lolos seleksi untuk memastikan kesesuaian dengan tujuan penelitian. Artikel yang memenuhi seluruh kriteria digunakan sebagai sumber data dalam proses ekstraksi, klasifikasi, dan sintesis informasi. Prosedur penelitian disusun secara sistematis sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Metode Systematic Literature Review (SLR)

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan proses seleksi literatur yang dilakukan pada database scopus, sciencedirect, springer, iee xplora, dan mdpi, diperoleh 42 artikel yang memenuhi kriteria inklusi dan relevan dengan topik monitoring lendutan jembatan berbasis internet of things (iot). Artikel yang dianalisis berasal dari periode 2021–2025 dan mencakup berbagai aspek structural health monitoring (shm), seperti teknologi sensor, wireless sensor network (wsn), cloud computing, artificial intelligence (ai), serta digital twin.

Hasil sintesis menunjukkan bahwa perkembangan teknologi monitoring jembatan telah mengalami perubahan signifikan dari sistem inspeksi konvensional menuju sistem monitoring otomatis berbasis IoT yang mampu menyediakan data kondisi struktur secara real-time dan berkelanjutan. Integrasi sensor digital, komunikasi nirkabel, penyimpanan data berbasis cloud, dan kecerdasan buatan menjadi faktor utama yang mendorong peningkatan efektivitas monitoring jembatan modern.

1. **Rekapitulasi Penelitian Monitoring Jembatan Berbasis IoT**
Tabel 1 menyajikan ringkasan beberapa penelitian yang menjadi dasar dalam kajian ini.

Tabel 1. Rekapitulasi Penelitian Monitoring Jembatan Berbasis IoT

No	Penulis	Tahun	Jenis Jembatan (Revisi yang benar)	Bentang (m)	Metode/Teknologi	Hasil Utama
1	Park et al.	2022	Jembatan Gelagar Beton Prategang (Prestressed Concrete Girder Bridge)	30–50	IoT Sensor dan Cloud Server	Monitoring real-time dengan delay < 2 detik
2	Saidin et al.	2022	Jembatan Gelagar Beton Bertulang	20–60	Vibration-Based SHM	Getaran efektif mendeteksi kerusakan awal
3	Ahmad et al.	2023	Jembatan Gelagar Baja / Beton	30–80	Energy Harvesting	Mengurangi konsumsi energi sensor
4	Geetha et al.	2024	Jembatan Gelagar Beton	20–100	IoT-Based Monitoring	Monitoring otomatis real-time
5	Chen et al.	2024	Jembatan Gelagar Beton / Baja	30–120	Wireless Sensor Network	Efektivitas meningkat 18%
6	Yang et al.	2024	Jembatan Gelagar (fokus sensor struktur)	20–100	Sensor Calibration	Akurasi sensor meningkat

Berdasarkan Tabel 1 terlihat bahwa penelitian awal lebih banyak berfokus pada penggunaan sensor dan komunikasi data, sedangkan penelitian terbaru mulai mengintegrasikan Artificial Intelligence dan Digital Twin sebagai sistem prediksi kerusakan struktur.

Rentang bentang yang ditampilkan pada Tabel 1 merupakan rentang representatif yang dirangkum dari berbagai penelitian yang direview. Informasi tersebut digunakan untuk

menunjukkan cakupan penerapan teknologi monitoring pada berbagai jenis dan ukuran jembatan yang menjadi objek penelitian terdahulu.

2. Perkembangan Teknologi Monitoring Lendutan Jembatan Berbasis IoT

Hasil kajian menunjukkan bahwa penggunaan IoT dalam monitoring jembatan meningkat secara signifikan selama lima tahun terakhir. Peningkatan ini didorong oleh kebutuhan pemantauan struktur secara real-time yang tidak dapat dipenuhi oleh metode inspeksi konvensional.

Pada sistem monitoring berbasis IoT, sensor dipasang pada titik-titik kritis struktur untuk mengukur parameter seperti lendutan, getaran, regangan, suhu, dan percepatan. Data yang diperoleh kemudian dikirim melalui jaringan komunikasi nirkabel menuju server cloud untuk diproses dan disimpan. Teknologi ini memungkinkan pengelola infrastruktur memantau kondisi jembatan dari jarak jauh secara berkelanjutan.

Temuan ini sejalan dengan penelitian Geetha et al. (2024) yang menyatakan bahwa IoT mampu meningkatkan efisiensi monitoring karena proses pengambilan data tidak lagi bergantung pada inspeksi manual. Dibandingkan dengan metode konvensional, sistem berbasis IoT memberikan kecepatan akses data yang lebih tinggi serta memungkinkan deteksi dini terhadap perubahan perilaku struktur.

Peningkatan penggunaan IoT terjadi karena biaya perangkat sensor dan mikrokontroler semakin murah serta tersedianya berbagai platform komunikasi seperti Wi-Fi, LoRa, LTE, dan MQTT yang mendukung pengiriman data secara cepat dan stabil.

3. Analisis Kinerja Sensor Monitoring Lendutan

Sensor merupakan komponen utama dalam sistem monitoring jembatan. Berdasarkan hasil kajian, accelerometer menjadi sensor yang paling banyak digunakan karena mampu mengukur respons dinamis struktur akibat beban kendaraan maupun faktor lingkungan.

Tabel 2. Sensor Pendukung Monitoring Lendutan Jembatan

No	Sensor	Parameter	Hubungan dengan Lendutan
1	Accelerometer	Getaran	Digunakan untuk estimasi lendutan dinamis
2	Strain Gauge	Regangan	Digunakan untuk menghitung deformasi dan validasi lendutan
3	LVDT	Lendutan	Pengukuran lendutan secara langsung
4	Vision-Based Camera	Lendutan	Pengukuran lendutan non-contac

Hasil sintesis menunjukkan bahwa LVDT memiliki tingkat akurasi paling tinggi untuk mengukur lendutan secara langsung. Namun, biaya instalasi dan pemeliharaan yang tinggi menyebabkan penggunaannya terbatas pada penelitian tertentu.

Sebaliknya, accelerometer lebih banyak digunakan karena mudah dipasang dan memiliki biaya operasional yang relatif rendah. Walaupun demikian, sensor ini tidak mengukur lendutan secara langsung sehingga memerlukan proses integrasi matematis yang berpotensi menghasilkan kesalahan pengukuran.

Penelitian Yang et al. (2024) menunjukkan bahwa proses kalibrasi sensor yang tepat mampu meningkatkan akurasi monitoring secara signifikan. Temuan ini mengindikasikan bahwa kualitas data monitoring tidak hanya dipengaruhi oleh jenis sensor yang digunakan, tetapi juga oleh metode kalibrasi dan pengolahan datanya.

Meskipun fokus utama kajian adalah lendutan, parameter getaran dan regangan tetap digunakan karena keduanya merupakan respon turunan dari deformasi struktur. Getaran digunakan untuk analisis dinamis yang kemudian dapat diintegrasikan menjadi estimasi lendutan, sedangkan regangan digunakan untuk validasi perubahan deformasi pada elemen struktur. Oleh karena itu,

kombinasi ketiga parameter tersebut memberikan hasil monitoring yang lebih komprehensif dalam sistem SHM berbasis IoT.

4. Efektivitas Wireless Sensor Network (WSN)

Perkembangan Wireless Sensor Network (WSN) memberikan dampak besar terhadap sistem monitoring jembatan modern. Teknologi ini memungkinkan banyak sensor bekerja secara bersamaan tanpa memerlukan kabel komunikasi yang kompleks.

Hasil penelitian Chen et al. (2024) menunjukkan bahwa optimasi penempatan sensor mampu meningkatkan efektivitas monitoring hingga 18% dibandingkan metode konvensional. Hal tersebut terjadi karena distribusi sensor yang lebih baik memungkinkan perubahan kondisi struktur terdeteksi secara lebih akurat.

Selain meningkatkan fleksibilitas instalasi, WSN juga mampu menurunkan biaya konstruksi dan pemeliharaan sistem monitoring. Namun demikian, beberapa penelitian masih menemukan kendala berupa kehilangan data akibat gangguan sinyal, keterbatasan daya baterai, dan sinkronisasi waktu antar sensor.

Kondisi tersebut menjadi alasan berkembangnya teknologi energy harvesting sebagaimana dilaporkan Ahmad et al. (2023). Teknologi ini memanfaatkan getaran jembatan sebagai sumber energi sehingga mampu memperpanjang umur operasional sensor tanpa perlu penggantian baterai secara berkala.

5. Integrasi Artificial Intelligence dan Digital Twin

Salah satu perkembangan paling signifikan dalam monitoring jembatan adalah integrasi *Artificial Intelligence* (AI) dan *Digital Twin*.

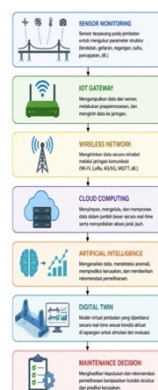
Pada penelitian terdahulu, sistem monitoring hanya berfungsi mengumpulkan dan menampilkan data hasil pengukuran. Namun pada penelitian terbaru, AI digunakan untuk mengidentifikasi pola kerusakan berdasarkan data historis sehingga potensi kegagalan struktur dapat diprediksi sebelum terjadi kerusakan serius.

Rios et al. (2023) menjelaskan bahwa digital twin merupakan representasi virtual dari jembatan fisik yang diperbarui secara real-time berdasarkan data sensor lapangan. Dengan adanya digital twin, kondisi jembatan dapat disimulasikan dan dievaluasi secara terus-menerus tanpa harus melakukan inspeksi langsung.

Integrasi AI dan digital twin menghasilkan sistem monitoring yang lebih cerdas karena mampu memberikan rekomendasi pemeliharaan berdasarkan kondisi aktual struktur. Temuan ini menunjukkan bahwa monitoring jembatan masa depan tidak lagi hanya bersifat reaktif, tetapi berkembang menjadi sistem prediktif dan preventif.

6. Hubungan IoT, Sensor, Cloud Computing, AI, dan Digital Twin

Perkembangan teknologi monitoring jembatan modern menunjukkan adanya integrasi berbagai teknologi dalam satu sistem yang saling terhubung, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2 berikut :



Gambar 2. Diagram Arsitektur Sistem Monitoring Jembatan Berbasis IoT Menuju Smart Bridge Infrastrukture

Pada sistem tersebut, sensor berfungsi sebagai pengumpul data lapangan, sedangkan IoT bertindak sebagai media komunikasi data. *Cloud computing* digunakan untuk penyimpanan dan pengolahan data dalam jumlah besar. *Artificial Intelligence* melakukan analisis dan prediksi kerusakan, sedangkan Digital Twin menyediakan model virtual yang menggambarkan kondisi struktur secara real-time.

7. Implikasi Pengembangan Monitoring Jembatan Masa Depan

Hasil kajian menunjukkan bahwa arah pengembangan teknologi monitoring jembatan bergerak menuju konsep *Smart Bridge Infrastructure* yang mengintegrasikan *IoT*, *Artificial Intelligence*, *Digital Twin*, *cloud computing*, dan teknologi komunikasi generasi baru.

Implikasi utama dari perkembangan ini adalah meningkatnya kemampuan deteksi dini kerusakan, pengurangan biaya inspeksi manual, peningkatan keselamatan pengguna jembatan, serta optimalisasi program pemeliharaan infrastruktur. Selain itu, penggunaan teknologi prediktif memungkinkan pengelola jembatan melakukan tindakan perbaikan sebelum terjadi kegagalan struktur sehingga umur layanan jembatan dapat diperpanjang dan biaya rehabilitasi dapat ditekan.

8. Temuan Utama dan Kebaruan Penelitian

Temuan utama kajian ini menunjukkan bahwa integrasi *IoT*, *Wireless Sensor Network*, *Artificial Intelligence*, dan *Digital Twin* mampu meningkatkan efektivitas monitoring lendutan jembatan secara signifikan dibandingkan dengan metode konvensional. Teknologi tersebut memungkinkan monitoring dilakukan secara real-time, berkelanjutan, dan berbasis prediksi.

Kebaruan (*novelty*) penelitian ini terletak pada penyajian sintesis komprehensif yang mengintegrasikan perkembangan sensor monitoring, komunikasi data, *cloud computing*, *Artificial Intelligence*, dan *Digital Twin* dalam satu kerangka analisis yang utuh. Kajian ini memberikan gambaran tentang perkembangan teknologi monitoring jembatan dari sistem pengukuran sederhana menuju konsep *Smart Bridge Infrastructure* yang adaptif, cerdas, dan berorientasi pada prediksi kerusakan di masa depan.

KESIMPULAN

Kajian ini difokuskan pada penerapan teknologi monitoring berbasis IoT pada jembatan tipe girder dengan bentang pendek hingga menengah, dimana lendutan merupakan salah satu parameter utama dalam evaluasi kinerja struktur.

Berdasarkan hasil kajian literatur, penerapan Internet of Things (IoT) pada sistem monitoring lendutan jembatan telah memberikan perkembangan yang signifikan dalam bidang Structural Health Monitoring (SHM). Integrasi sensor digital, *Wireless Sensor Network* (WSN), *cloud computing*, dan sistem komunikasi data memungkinkan pemantauan kondisi struktur dilakukan secara real-time, berkelanjutan, dan lebih akurat dibandingkan metode inspeksi konvensional. Berbagai teknologi sensor seperti *accelerometer*, *strain gauge*, *displacement sensor*, dan *vision-based monitoring* terbukti mampu meningkatkan kemampuan deteksi perubahan perilaku struktur sehingga potensi kerusakan dapat diketahui lebih dini dan mendukung peningkatan keselamatan serta keandalan jembatan.

Hasil kajian juga menunjukkan bahwa arah perkembangan teknologi monitoring jembatan saat ini telah bergeser menuju integrasi *Artificial Intelligence* (AI) dan *Digital Twin* yang tidak hanya berfungsi sebagai sistem pemantauan, tetapi juga sebagai alat prediksi kerusakan dan pendukung pengambilan keputusan pemeliharaan. Temuan ini menunjukkan bahwa konsep *Smart Bridge Infrastructure* memiliki potensi besar untuk diterapkan pada pengelolaan infrastruktur jembatan di masa depan. Oleh karena itu, penelitian selanjutnya perlu difokuskan pada pengembangan sistem monitoring yang lebih cerdas, hemat energi, aman, dan adaptif melalui integrasi AI, *Digital Twin*, *Edge Computing*, *Blockchain*, serta pengujian langsung pada jembatan aktual guna meningkatkan efektivitas dan keberlanjutan sistem monitoring berbasis IoT.

DAFTAR PUSTAKA

Behnke, I. and Austad, H. (2023) 'Real-time performance of industrial IoT communication technologies: A review', *Sensors*, 23(15), pp. 1–25. <https://doi.org/10.3390/s23156784>

Catbas, F.N., Susoy, M. and Frangopol, D.M. (2022) 'Structural health monitoring and damage assessment of bridges: Current practice and future trends', *Structure and Infrastructure Engineering*, 18(5), pp. 643–661.

Chen, G., Li, Y., Wang, H. and Zhao, X. (2024) 'Wireless sensor placement optimization for bridge health monitoring: A critical review', *Buildings*, 14(2), pp. 1–22. <https://doi.org/10.3390/buildings14020385>

Deng, Z., Zhang, Y., Liu, J. and Wang, X. (2023) 'The current development of structural health monitoring for bridges: A review', *Buildings*, 13(11), pp. 1–28. <https://doi.org/10.3390/buildings13112852>

Geetha, M.N., Kumar, S. and Rajesh, P. (2024) 'A review on IoT based bridge monitoring systems', *International Journal of Research in Engineering, Science and Management*, 7(3), pp. 45–52.

Gong, C., Li, X. and Chen, Y. (2022) 'Internet of Things-based structural health monitoring system for bridge infrastructure', *Automation in Construction*, 138, 104273. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104273>

Karakostas, C., Moschonas, I. and Vayas, I. (2024) 'Seismic assessment of bridges through structural health monitoring: A state-of-the-art review', *Bulletin of Earthquake Engineering*, 22(4), pp. 1857–1885. <https://doi.org/10.1007/s10518-023-01745-7>

Khan, M.M., Rehman, M.A. and Rehman, S. (2023) 'Bridge vibration energy harvesting for wireless IoT-based structural health monitoring systems: A review', *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 34(12), pp. 1523–1541. <https://doi.org/10.1177/1045389X231154321>

Park, J., Kim, H. and Lee, S. (2022) 'Development of IoT sensor and cloud-based server for bridge long-term monitoring', *Sensors*, 22(18), pp. 1–18. <https://doi.org/10.3390/s22186792>

Rahita, A.C., Setiawan, B. and Nugroho, A. (2024) 'Internet of Things (IoT) in structural health monitoring: A decade of research trends', *Instrumentation Measure Métrologie*, 23(2), pp. 119–132. <https://doi.org/10.18280/i2m.230205>

Rios, A.J., Perez, M. and Hernandez, F. (2023) 'Bridge management through digital twin-based anomaly detection systems: A systematic review', *Frontiers in Built Environment*, 9, 1178534. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2023.1178534>

Saidin, S.S., Hamid, N.A. and Abdullah, M. (2022) 'Application of vibration-based techniques in bridge structural health monitoring', *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 16(1), pp. 1–18. <https://doi.org/10.1186/s40069-022-00533-5>

Sonbul, O.S. and Rashid, M. (2023a) 'Algorithms and techniques for the structural health monitoring of bridges: Systematic literature review', *Sensors*, 23(5), pp. 1–35. <https://doi.org/10.3390/s23052345>

Sonbul, O.S. and Rashid, M. (2023b) 'Towards the structural health monitoring of bridges using wireless sensor networks: A systematic study', *Sensors*, 23(11), pp. 1–29. <https://doi.org/10.3390/s23115218>

Yang, Y., Zhang, W., Li, P. and Liu, H. (2024) 'Research progress on calibration of bridge structural health monitoring sensing systems', *Advances in Bridge Engineering*, 5(1), pp. 1–17. <https://doi.org/10.1186/s43251-024-00108-4>

Ye, X.W., Su, Y.H. and Han, J.P. (2022) 'A state-of-the-art review on vision-based displacement and deflection monitoring of civil infrastructure', *Smart Structures and Systems*, 29(2), pp. 145–166.

Zhang, C., Li, H., Ou, J. and Zhou, Z. (2023) 'Bridge deflection monitoring techniques and applications: A comprehensive review', *Measurement*, 218, 113126.

Zhou, L., Wang, J. and Chen, H. (2021) 'Vision-based bridge deflection monitoring using deep learning and image processing techniques', *Measurement*, 182, 109743. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.109743>