

# Optimasi Pengelolaan Pemeliharaan Jembatan di Era Digital melalui Internet of Things (IoT): Tinjauan Pustaka Berbasis PRISMA

N.B.Laksono<sup>1\*</sup>, Y.latief<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departemen Teknik Sipil, Universitas Indonesia, Depok, INDONESIA

\*Corresponding author: naufalbudilaksono@gmail.com

## INTISARI

Penelitian ini mengkaji penerapan Internet of Things (IoT) dalam manajemen pemeliharaan jembatan. Melalui analisis menggunakan VOSviewer, enam kluster utama diidentifikasi, mulai dari teknologi sensor hingga kebijakan dan regulasi. Kluster pertama menyoroti sensor dan teknologi yang digunakan untuk mengumpulkan data kondisi jembatan secara real-time. Kluster kedua membahas analisis data kompleks dan penerapan kecerdasan buatan untuk memprediksi masalah potensial. Kluster ketiga menekankan pemeliharaan dan perawatan jembatan dengan memanfaatkan pemantauan kondisi dan perawatan prediktif. Kluster keempat menyoroti keamanan dan privasi data dalam implementasi IoT pada jembatan. Kluster kelima menekankan penerapan IoT dalam industri konstruksi dan manufaktur jembatan. Terakhir, Kluster keenam menyoroti kebijakan dan regulasi yang diperlukan untuk implementasi IoT yang aman dan bertanggung jawab pada jembatan. Penelitian ini memberi masukan untuk fokus pada pengembangan dan pelaksanaan solusi praktis berbasis IoT untuk manajemen pemeliharaan jembatan, termasuk uji coba teknologi IoT di lapangan dan evaluasi dampaknya pada kinerja jembatan secara menyeluruh, serta memperhatikan keamanan, privasi, dan interoperabilitas dalam desain sistem IoT untuk jembatan.

**Kata kunci:** Internet of Things (IoT), Manajemen Jembatan, Pemeliharaan Infrastruktur, Analisis Data Sensor, Kebijakan Regulasi.

## 1 PENDAHULUAN

Pemeliharaan jembatan merupakan aspek krusial dalam memastikan keamanan dan keberlangsungan infrastruktur transportasi yang vital bagi suatu negara (Harywijaya et al., 2020). Namun, secara konvensional, pemeliharaan jembatan sering kali melibatkan proses yang mahal (Abdillah et al., 2017), kompleks (Alshibani et al., 2023), dan sering kali tidak efisien (Lee & Lee, 2014). Metode tradisional seperti inspeksi rutin berbasis manusia dan perbaikan berkala sering kali rentan terhadap keterlambatan dalam pendeteksian kerusakan atau kebutuhan perawatan yang mendesak (Bowman & Moran, 2017). Selain itu, metode ini juga memiliki keterbatasan dalam hal pengumpulan data yang akurat dan real-time mengenai kondisi jembatan (Jeong et al., 2018), sehingga menghambat kemampuan untuk mengambil tindakan preventif yang tepat waktu.

Dalam beberapa tahun terakhir, perkembangan teknologi *Internet of Things* (IoT) telah membuka potensi baru dalam pengelolaan infrastruktur (Yaïci et al., 2021), termasuk jembatan (Geetha et al., 2024). IoT menawarkan berbagai solusi inovatif untuk memantau dan memelihara jembatan secara lebih efektif dan efisien. Contoh penerapan teknologi IoT termasuk penggunaan sensor yang terpasang pada struktur jembatan untuk mengukur tegangan (Burgos et al., 2020), deformasi, dan kondisi lingkungan sekitarnya secara real-time (Keleko et al., 2022). Data yang dihasilkan oleh sensor-sensor ini dapat diolah secara otomatis dan dianalisis menggunakan sistem komputerisasi untuk mendeteksi kerusakan atau pola perilaku yang tidak normal (He et al., 2022).

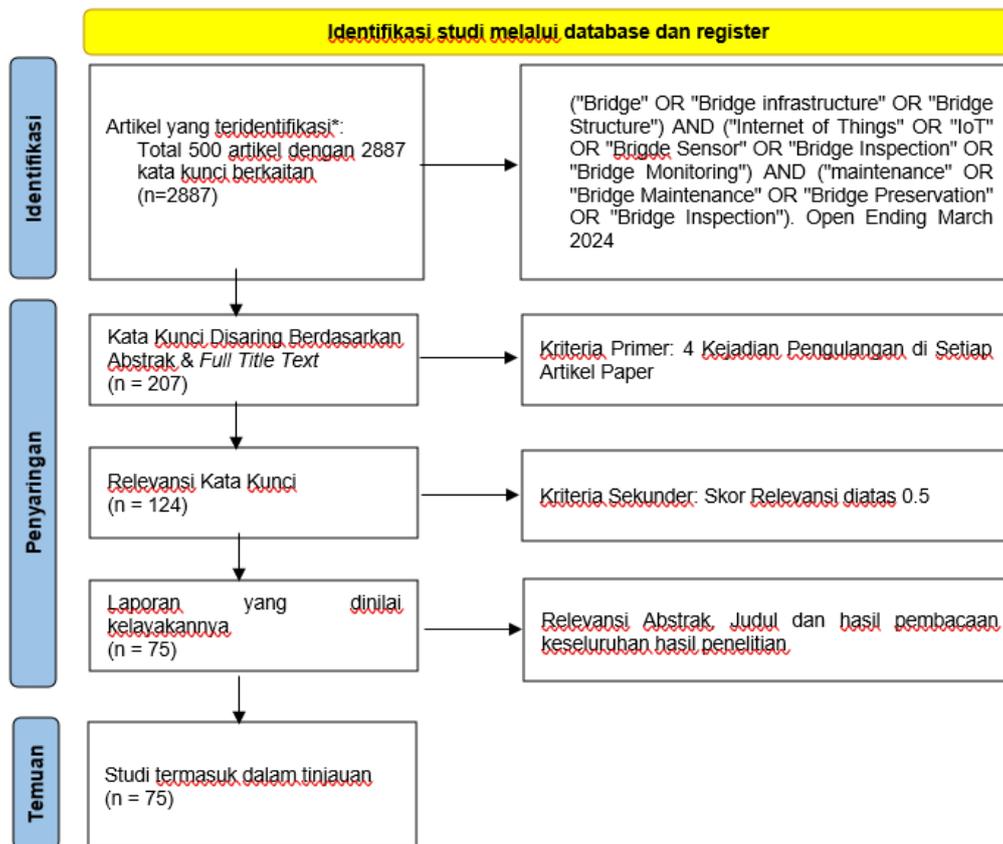
Tujuan dari penelitian ini adalah untuk melakukan tinjauan artikel berbasis protokol *Preferred Reporting Items for Systemic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA) guna mengembangkan strategi optimal dalam pengimplementasian IoT pada manajemen pemeliharaan jembatan. Dengan menggali temuan-temuan dari penelitian terdahulu, peneliti bertujuan untuk mengidentifikasi keberhasilan, tantangan, dan peluang dalam penerapan teknologi IoT dalam pemeliharaan jembatan. Dengan demikian, diharapkan penelitian ini dapat memberikan kontribusi penting dalam upaya meningkatkan efektivitas, efisiensi, dan keamanan infrastruktur jembatan, serta memperkuat pemahaman kita tentang bagaimana teknologi IoT dapat dioptimalkan dalam konteks ini.

## 2 METODOLOGI PENELITIAN

Dalam penelitian ini, peneliti menggunakan teknik review literatur sistematis dengan memanfaatkan protokol *Preferred Reporting Items for Systemic Reviews and Meta-Analyses* (PRISMA). Pendekatan ini diakui secara luas

memiliki kerangka kerja review literatur sistematis yang transparan, konsisten, dan komprehensif (Page et al., 2021). Protokol ini melibatkan tiga tahapan, yaitu perencanaan, review, dan pelaporan. Tahap perencanaan meliputi elemen-elemen seperti tujuan studi, pertanyaan studi, kata kunci, serta kriteria inklusi dan eksklusi. Seperti yang dijelaskan, tujuan studi adalah untuk menyajikan sebuah review yang membantu memahami proses implementasi teknologi IoT dalam manajemen pemeliharaan jembatan. Penting untuk dicatat bahwa ruang lingkup review ini memiliki fokus khusus pada implementasi IoT dalam pemeliharaan jembatan, yang mengecualikan tinjauan kategori teknologi lainnya.

Untuk memaksimalkan jumlah literatur yang relevan, peneliti menggunakan berbagai kata kunci pencarian yang meliputi teknologi IoT yang mapan dan berkembang, sehingga memastikan inklusivitas dokumen-dokumen yang terkumpul dari basis data. Mesin pencari *Publish or Perish* digunakan untuk mengeksplorasi publikasi online yang relevan dari basis data Scopus dengan rentang publikasi sejak tahun 2010 dikarenakan trend riset IoT berkembang sejak tahun 2010 (Srivastava & Pandey, 2022). Pada bulan maret 2024, *query* pencarian dilakukan menggunakan operasi Boolean berikut: (judul atau abstrak atau kata kunci) berisi ("Bridge" OR "Bridge infrastructure" OR "Bridge Structure") AND ("Internet of Things" OR "IoT" OR "Bridge Sensor" OR "Bridge Inspection" OR "Bridge Monitoring") AND ("maintenance" OR "Bridge Maintenance" OR "Bridge Preservation" OR "Bridge Inspection").



Gambar 1. Alur Metodologi Penelitian Berbasis PRISMA protokol *Preferred Reporting Items for Systemic Reviews and Meta-Analyses*

Untuk mempersempit hasil pencarian, kriteria inklusi dan eksklusi primer diterapkan untuk membatasi artikel yang dipilih menjadi artikel peer-reviewed berbahasa Inggris yang dipublikasikan dalam jurnal dan artikel berbentuk full-text yang tersedia secara online. Selama fase screening, kriteria inklusi dan eksklusi sekunder digunakan untuk mengeliminasi artikel awal sebanyak 2887 kata kunci ditemukan dalam 500 artikel. Jumlah temuan kemudian dikurangi menjadi 207 kata kunci berdasarkan kriteria inklusi yakni 4 kali pengulangan kata kunci yang relevan terhadap tujuan penelitian serta sebanyak 75 kata kunci tersisa berdasarkan kriteria eksklusi agar lebih focus dan spesifik pada pengimplementasian IoT untuk manajemen pemeliharaan jembatan. Selanjutnya, abstrak dan kata kunci dinilai untuk menentukan relevansinya dengan pertanyaan penelitian, memandu inklusi dalam analisis final. Selama tinjauan terhadap artikel yang menggunakan teknologi IoT untuk manajemen pemeliharaan jembatan, peneliti mengamati pola berulang di mana pada studi ini terdapat 6 kluster utama yang berkaitan dengan pengimplementasian IoT pada peningkatan kinerja pemeliharaan jembatan.



untuk mencegah kerusakan yang lebih besar. Selain itu, pemeliharaan prediktif berdasarkan prediksi AI dan ML memungkinkan identifikasi dini terhadap masalah potensial, sehingga tindakan perbaikan dapat dilakukan sebelum terjadi kerusakan yang signifikan. Dengan memanfaatkan analisis data sensor, perawatan preskriptif dapat direkomendasikan berdasarkan kondisi spesifik jembatan, membantu dalam pengambilan keputusan yang lebih efektif dan efisien.

Kluster keempat, Kluster Keamanan dan Privasi, menyoroti pentingnya aspek keamanan dan privasi data dalam implementasi IoT untuk jembatan. Sistem IoT pada jembatan rentan terhadap serangan siber dan akses yang tidak sah yang dapat membahayakan keamanan dan integritas data (Abiodun et al., 2021). Oleh karena itu, perlindungan keamanan siber dan privasi data menjadi sangat penting. Teknologi keamanan siber digunakan untuk melindungi sistem IoT dari serangan siber, sedangkan teknologi enkripsi data digunakan untuk mengamankan data sensor saat transmisi dan penyimpanan (Babiceanu & Seker, 2016). Selain itu, otentikasi dan otorisasi diperlukan untuk memastikan bahwa hanya pengguna yang sah yang dapat mengakses data dan sistem IoT. Dengan mengimplementasikan langkah-langkah keamanan yang tepat, risiko terhadap integritas dan kerahasiaan data dapat diminimalkan.

Kluster kelima, Kluster Industri dan Manufaktur, menekankan pada aplikasi IoT dalam industri konstruksi dan manufaktur jembatan. Manufaktur cerdas dan pembangunan cerdas memungkinkan penggunaan teknologi IoT untuk meningkatkan efisiensi dan produktivitas dalam proses pembuatan dan konstruksi jembatan (Agnisarman et al., 2019). Selain itu, manajemen rantai pasokan menjadi lebih efisien dengan adanya teknologi IoT, yang memungkinkan pelacakan dan pengelolaan yang lebih baik terhadap bahan dan komponen yang digunakan dalam pembuatan jembatan. Integrasi teknologi IoT dengan sistem manufaktur dan industri jembatan menciptakan lingkungan kerja yang lebih terhubung dan efisien (Barasa et al., 2023).

Kluster keenam, Kluster Kebijakan dan Regulasi, menyoroti perlunya kebijakan dan regulasi yang diperlukan untuk implementasi IoT yang aman dan bertanggung jawab pada jembatan. Standar dan regulasi harus ditetapkan untuk memastikan keamanan dan interoperabilitas sistem IoT yang digunakan dalam manajemen pemeliharaan jembatan (Jiang et al., 2019). Selain itu, kerjasama dan kemitraan antara berbagai pemangku kepentingan, termasuk pemerintah, industri, dan masyarakat sipil, diperlukan untuk mendukung implementasi yang sukses.

### 3.2 Optimasi & Strategi Implementasi IoT pada Manajemen Pemeliharaan Jembatan

Berdasarkan hasil penelitian didapatkan 6 kluster utama yang dapat digunakan untuk mengoptimasi implementasi penerapan IoT pada manajemen pemeliharaan jembatan. Implementasi Internet of Things (IoT) dalam manajemen pemeliharaan jembatan memerlukan pendekatan terpadu yang melibatkan berbagai strategi untuk memaksimalkan efisiensi dan efektivitasnya, diantaranya:

1. Integrasi Teknologi Sensor dan Jaringan: Menggunakan teknologi sensor nirkabel dan jaringan sensor nirkabel (WSN) untuk mengumpulkan data kondisi jembatan secara real-time (Alahi et al., 2023). Hal ini memungkinkan pengawasan terus-menerus yang menjadi dasar bagi strategi perawatan dan pemeliharaan.
2. Analisis Data dan Kecerdasan Buatan: Menerapkan analisis data yang cermat dengan memanfaatkan kecerdasan buatan (AI) dan pembelajaran mesin (ML) (Weinstein et al., 2018; H. Yang & Xia, 2023). Dengan demikian, data yang dikumpulkan dari sensor IoT dapat diinterpretasikan secara tepat waktu, memungkinkan identifikasi dini terhadap masalah potensial dan pengambilan keputusan yang lebih cerdas dalam perawatan jembatan.
3. Perawatan Proaktif Berbasis Prediksi: Melakukan pemeliharaan dan perawatan jembatan secara proaktif berdasarkan prediksi AI dan ML (Abbassi et al., 2022). Dengan menganalisis data kondisi jembatan secara terus-menerus, dapat dibuat prediksi yang akurat terkait potensi masalah dan kebutuhan perawatan, sehingga tindakan perbaikan dapat dilakukan sebelum terjadi kerusakan yang signifikan.
4. Pengamanan Data dan Sistem: Memastikan keamanan data dan sistem melalui implementasi teknologi keamanan siber, enkripsi data, serta otentikasi pengguna (Kalinin et al., 2021). Langkah-langkah keamanan ini penting untuk melindungi integritas dan kerahasiaan data yang dikumpulkan dan diproses oleh sistem IoT.

5. Kolaborasi Antar-Sektor: Membangun kerjasama lintas sektor antara pemerintah, industri, dan masyarakat sipil untuk mendukung implementasi IoT yang sukses (Adel, 2023). Hal ini mencakup penetapan standar dan regulasi yang tepat serta pendidikan masyarakat tentang manfaat dan risiko teknologi IoT dalam manajemen pemeliharaan jembatan.

Dengan menerapkan strategi ini secara holistik, diharapkan penggunaan IoT dalam manajemen pemeliharaan jembatan dapat memberikan dampak yang signifikan dalam meningkatkan keamanan, efisiensi, dan keberlanjutan infrastruktur jembatan.

#### 4 KESIMPULAN & SARAN

Dari hasil penelitian ini, dapat disimpulkan bahwa implementasi Internet of Things (IoT) dalam manajemen pemeliharaan jembatan menjanjikan berbagai manfaat yang signifikan. Analisis menggunakan VOSviewer telah mengidentifikasi enam kluster utama yang mencakup berbagai aspek teknologi dan aplikasi IoT yang relevan. Kluster-kluster ini memberikan pandangan yang komprehensif tentang bagaimana teknologi IoT dapat diterapkan untuk meningkatkan pemeliharaan, perawatan, dan pemeriksaan jembatan secara efisien dan efektif. Saran untuk penelitian selanjutnya adalah untuk melakukan studi yang lebih mendalam dalam masing-masing kluster, dengan fokus pada pengembangan dan implementasi solusi-solusi praktis berbasis IoT dalam konteks manajemen pemeliharaan jembatan. Hal ini meliputi pengujian dan validasi teknologi IoT yang diusulkan dalam lingkungan nyata, serta penilaian terhadap dampaknya terhadap kinerja jembatan secara keseluruhan. Selain itu, penting untuk mempertimbangkan aspek-aspek keamanan, privasi, dan interoperabilitas dalam desain dan implementasi sistem IoT untuk jembatan.

#### REFERENSI

- Abbassi, R., Arzaghi, E., Yazdi, M., Aryai, V., & ... (2022). Risk-based and predictive maintenance planning of engineering infrastructure: Existing quantitative techniques and future directions. *Process Safety and ...*, *Query date: 2024-04-09 06:08:55*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957582022006589>
- Abdillah, R., As'ad, S., & Sangadji, S. (2017). Allocation Priority Determination System for Provincial Bridge Maintenance Fund in Special Region of Yogyakarta By Examining Physical Conditions, Operational Cost and Volume of Traffic. *International Journal of Science and Applied Science: Conference Series*, 2, 300. <https://doi.org/10.20961/ijscascs.v2i1.16732>
- Abiodun, O., Abiodun, E., Alawida, M., & ... (2021). A review on the security of the internet of things: Challenges and solutions. *Wireless Personal ...*, *Query date: 2024-04-09 06:08:55*. <https://doi.org/10.1007/s11277-021-08348-9>
- Adel, A. (2023). Unlocking the future: Fostering human-machine collaboration and driving intelligent automation through industry 5.0 in smart cities. *Smart Cities*, *Query date: 2024-04-12 04:23:52*. <https://www.mdpi.com/2624-6511/6/5/124>
- Agnisarman, S., Lopes, S., Madathil, K., Piratla, K., & ... (2019). A survey of automation-enabled human-in-the-loop systems for infrastructure visual inspection. *Automation in ...*, *Query date: 2024-04-09 06:08:55*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580518303248>
- Alahi, M., Sukkuea, A., Tina, F., Nag, A., & ... (2023). Integration of IoT-enabled technologies and artificial intelligence (AI) for smart city scenario: Recent advancements and future trends. *Sensors*, *Query date: 2024-04-12 04:23:52*. <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/11/5206>
- Alshibani, A., Abu Saa, A. S., Hassanain, M. A., Bubshait, A., & Shash, A. (2023). Decision Support Model for Allocating Maintenance Budgets for Bridges. *Applied Sciences*, 13(17), 9679. <https://doi.org/10.3390/app13179679>
- Babiceanu, R., & Seker, R. (2016). Big Data and virtualization for manufacturing cyber-physical systems: A survey of the current status and future outlook. *Computers in Industry*, *Query date: 2024-04-09 06:08:55*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0166361516300471>
- Barasa, W., Aspar, W. A. N., Sukamdo, P., Purnomo, D. A., Harjono, M. S., Nadi, M. A. B., & Adibroto, A. (2023). Monitoring displacement, strain, and acceleration of a steel railway bridge. *Ain Shams Engineering Journal*, 14(11), 102521. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2023.102521>
- Bowman, M., & Moran, L. (2017). *Bridge Preservation Treatments and Best Practices*. Purdue University. <http://docs.lib.purdue.edu/jtrp/1639/>
- Burgos, D. T., Vargas, R. G., Pedraza, C., & ... (2020). Damage identification in structural health monitoring: A brief review from its implementation to the use of data-driven applications. *Sensors*, *Query date: 2024-04-09 06:08:55*. <https://www.mdpi.com/1424-8220/20/3/733>

- Byun, N., Han, W. S., Kwon, Y. W., & Kang, Y. J. (2021). Development of BIM-Based Bridge Maintenance System Considering Maintenance Data Schema and Information System. *Sustainability*, 13(9), 4858. <https://doi.org/10.3390/su13094858>
- Bzai, J., Alam, F., Dhafer, A., Bojović, M., Altowaijri, S., & ... (2022). Machine learning-enabled internet of things (iot): Data, applications, and industry perspective. *Electronics*, Query date: 2024-04-09 06:08:55. <https://www.mdpi.com/2079-9292/11/17/2676>
- Chassiakos, A. P., Vagiotas, P., & Theodorakopoulos, D. D. (2005). A knowledge-based system for maintenance planning of highway concrete bridges. *Advances in Engineering Software*, 36(11), 740–749. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2005.03.020>
- Chen, G., Shi, W., Yu, L., Huang, J., Wei, J., & Wang, J. (2024). Wireless Sensor Placement Optimization for Bridge Health Monitoring: A Critical Review. *Buildings*, Query date: 2024-04-09 06:08:55. <https://www.mdpi.com/2075-5309/14/3/856>
- Geetha, M., Sinchana, V., Priya, S., & ... (2024). A Review on IoT Based Bridge Monitoring Systems. ... *Journal of Research ...*, Query date: 2024-04-09 06:08:55. <https://journal.ijresm.com/index.php/ijresm/article/view/2960>
- Harywijaya, W., Afifuddin, M., & Isya, M. (2020). PENILAIAN KONDISI JEMBATAN MENGGUNAKAN BRIDGE MANAGEMENT SYSTEM (BMS) DAN BRIDGE CONDITION RATING (BCR). *Jurnal Arsip Rekayasa Sipil Dan Perencanaan*, 3(1), 80–88. <https://doi.org/10.24815/jarsp.v3i1.16462>
- He, Z., Li, W., Salehi, H., Zhang, H., Zhou, H., & Jiao, P. (2022). Integrated structural health monitoring in bridge engineering. *Automation in Construction*, Query date: 2024-04-09 06:08:55. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580522000413>
- Jeong, Y., Kim, W., Lee, I., & Lee, J. (2018). Bridge inspection practices and bridge management programs in China, Japan, Korea, and U.S. *Journal of Structural Integrity and Maintenance*, 3(2), 126–135. <https://doi.org/10.1080/24705314.2018.1461548>
- Jiang, S., Jiang, L., Han, Y., Wu, Z., & Wang, N. (2019). OpenBIM: An enabling solution for information interoperability. *Applied Sciences*, Query date: 2024-04-09 06:08:55. <https://www.mdpi.com/2076-3417/9/24/5358>
- Kalinin, M., Krundyshev, V., & Zegzhda, P. (2021). Cybersecurity risk assessment in smart city infrastructures. *Machines*, Query date: 2024-04-12 04:23:52. <https://www.mdpi.com/2075-1702/9/4/78>
- Keleko, A., Kamsu-Foguem, B., Ngouna, R., & Tongne, A. (2022). Artificial intelligence and real-time predictive maintenance in industry 4.0: A bibliometric analysis. *AI and Ethics*, Query date: 2024-04-09 06:08:55. <https://doi.org/10.1007/s43681-021-00132-6>
- Lee, D.-Y., & Lee, M.-J. (2014). A Study of the Asset Valuation Method for Efficient Road Facility Maintenance. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, 13(2), 279–286. <https://doi.org/10.3130/jaabe.13.279>
- Page, M. J., McKenzie, J. E., Bossuyt, P. M., Boutron, I., Hoffmann, T. C., Mulrow, C. D., Shamseer, L., Tetzlaff, J. M., Akl, E. A., Brennan, S. E., Chou, R., Glanville, J., Grimshaw, J. M., Hróbjartsson, A., Lalu, M. M., Li, T., Loder, E. W., Mayo-Wilson, E., McDonald, S., ... Moher, D. (2021). The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. *Systematic Reviews*, 10(1), 89. <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01626-4>
- Srivastava, N., & Pandey, P. (2022). Internet of things (IoT): Applications, trends, issues and challenges. *Materials Today: Proceedings*, 69, 587–591. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.09.490>
- Weinstein, J. C., Sanayei, M., & Brenner, B. R. (2018). Bridge Damage Identification Using Artificial Neural Networks. *Journal of Bridge Engineering*, 23(11), 04018084. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001302](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001302)
- Yaïci, W., Krishnamurthy, K., Entchev, E., & Longo, M. (2021). Recent advances in Internet of Things (IoT) infrastructures for building energy systems: A review. *Sensors*, Query date: 2024-04-09 06:08:55. <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/6/2152>
- Yang, H., & Xia, M. (2023). Advancing Bridge Construction Monitoring: AI-Based Building Information Modeling for Intelligent Structural Damage Recognition. *Applied Artificial Intelligence*, 37(1), 2224995. <https://doi.org/10.1080/08839514.2023.2224995>
- Yang, J., Xiang, F., Li, R., Zhang, L., Yang, X., Jiang, S., & ... (2022). Intelligent bridge management via big data knowledge engineering. *Automation in ...*, Query date: 2024-04-09 06:08:55. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926580521005690>