

KAJIAN LITERATUR SISTEMATIS INTEGRASI DATA JEMBATAN BAJA UNTUK SMART INFRASTRUCTURE

Alnaura Zalfa Meydira
Universitas Al Azhar Medan
Email: aurameydira@gmail.com

ABSTRAK

Infrastruktur jembatan baja menuntut sistem pemantauan berkelanjutan berbasis data secara real-time. Kajian literatur sistematis ini bertujuan memetakan perkembangan penelitian dan mengidentifikasi kesenjangan pengetahuan dalam domain integrasi data jembatan baja untuk smart infrastructure. Metodologi mengacu pada protokol PRISMA 2020 yang dipadukan dengan analisis bibliometrik menggunakan VOSviewer dan R Studio. Dari 18.571 dokumen awal pada basis data Scopus, Web of Science, dan IEEE Xplore, diperoleh 50 artikel final dengan rentang publikasi 2021–2025. Hasil analisis mengidentifikasi empat kluster penelitian utama: IoT dan Structural Health Monitoring, Artificial Intelligence dan Data Fusion, Digital Twin dan BIM, serta Interoperabilitas dan Standardisasi. Lima research gap sistemik teridentifikasi, meliputi ketiadaan framework integrasi vertikal end-to-end, absennya protokol interoperabilitas lintas platform, minimnya validasi spesifik pada jembatan baja, dan lemahnya koneksi antara output analitik AI dengan sistem keputusan pemeliharaan otomatis. Sebagai respons, tiga novelty dirumuskan: Layered Data Integration Framework, Steel-Aware Adaptive Data Fusion Model, dan Smart Bridge Interoperability Ontology (SBIO). Temuan kajian ini diharapkan menjadi landasan bagi pengembangan ekosistem smart infrastructure jembatan baja yang terintegrasi dan terstandardisasi. **Kata kunci:** Jembatan Baja, Smart Infrastructure, Structural Health Monitoring, Digital Twin, Data Fusion.

ABSTRACT

Steel bridge infrastructure demands continuous real-time data-driven monitoring systems. This systematic literature review aims to map research developments and identify knowledge gaps in steel bridge data integration for smart infrastructure. The methodology follows the PRISMA 2020 protocol combined with bibliometric analysis using VOSviewer and R Studio. From 18,571 initial documents across Scopus, Web of Science, and IEEE Xplore, 50 final articles within the 2021–2025 publication window were obtained. Analysis identified four major research clusters: IoT and Structural Health Monitoring, Artificial Intelligence and Data Fusion, Digital Twin and BIM, and Interoperability and Standardization. Five systemic research gaps were identified, including the absence of an end-to-end vertical integration framework, lack of cross-platform interoperability protocols, insufficient validation on steel bridges specifically, and weak linkage between AI analytical outputs and automated maintenance decision systems. Three novelties are proposed in response: a Layered Data Integration Framework, a Steel-Aware Adaptive Data Fusion Model, and a Smart Bridge Interoperability Ontology (SBIO). These findings are intended as a foundation for developing an integrated and standardized smart infrastructure ecosystem for steel bridges.

Keywords: Steel Bridge, Smart Infrastructure, Structural Health Monitoring, Digital Twin, Data Fusion.

1. PENDAHULUAN

Infrastruktur jembatan baja merupakan komponen vital dalam jaringan transportasi modern yang menuntut pemantauan berkelanjutan dan pemeliharaan berbasis data secara real-time[1], [2]. Seiring meningkatnya usia rata-rata infrastruktur sipil di berbagai negara, kebutuhan akan sistem pemantauan kesehatan struktural (Structural Health Monitoring/SHM) yang cerdas dan terintegrasi menjadi semakin mendesak[3], [4]. Berbagai metode tradisional yang mengandalkan inspeksi manual tidak lagi memadai untuk memenuhi tuntutan pemantauan skala besar yang kontinu dan akurat, sehingga mendorong adopsi teknologi sensor, Internet of Things (IoT)[5], [6], [7], dan kecerdasan buatan sebagai solusi alternatif yang menjanjikan[8]. Pendekatan berbasis IoT telah terbukti mampu menyediakan data strain dan perpindahan struktural secara nirkabel dengan biaya rendah. [9]mendemonstrasikan sistem pemantauan strain nirkabel berbasis IoT menggunakan LoRa dan jaringan 4G untuk Structural Health Monitoring pada portal crane pelabuhan, membuktikan efektivitas arsitektur terdistribusi dalam memangkas kompleksitas instalasi sekaligus menjaga akurasi pengukuran. Senada dengan itu, mengintegrasikan sistem pemantauan perpindahan berbasis IoT pada balok baja yang diperkuat CFRP, menghasilkan wawasan real-time mengenai kinerja lentur struktur melalui mikrokontroler ESP32 dan komunikasi NB-IoT[10], [11].

Tantangan utama dalam integrasi data jembatan tidak hanya terletak pada akuisisi data, tetapi juga pada fusi data dari berbagai sumber sensor yang heterogen[12]. [13]mengembangkan model neural hibrida (CNN-GRU dan CNN-LSTM) yang memadukan data dari geometri rel, InSAR, dan akselerometer axle-box untuk menilai kondisi zona transisi jembatan rel dengan frekuensi evaluasi yang lebih tinggi dibandingkan metode konvensional. Pendekatan multi-sumber serupa diterapkan oleh[14] yang mengombinasikan sensor GPS dan MEMS accelerometer untuk memperkirakan tingkat keandalan struktural jembatan secara time-based, membuktikan bahwa integrasi data dari modalitas yang berbeda dapat menghasilkan estimasi kondisi yang lebih komprehensif[15], [16], [17].

Dalam konteks deteksi kerusakan dan anomali, beberapa studi terkini menawarkan kerangka kerja berbasis pembelajaran mesin yang memanfaatkan integrasi data multi-modal. [18]mengaplikasikan Distributed Fiber Optic Sensors (DFOS) dikombinasikan dengan konsep sensor fusion berbasis IoT pada jembatan pipa beton bertulang, mengumpulkan sekitar 20 juta kondisi operasional selama empat tahun untuk deteksi anomali tanpa supervisi. Sementara itu, [19]memperkenalkan kerangka multi-skala yang memanfaatkan citra satelit SAR, coherence change detection, dan segmentasi gambar berbasis deep learning untuk penilaian kerusakan infrastruktur kritis termasuk jembatan secara cepat dan otomatis.

Perkembangan metode inspeksi berbasis drone dan komputasi tepi (edge computing) juga memberikan kontribusi signifikan dalam mempercepat penilaian kondisi struktural. [20], [21]menunjukkan bahwa pemrosesan data power spectral density secara langsung pada perangkat sensor yang dapat digunakan drone mampu mempercepat penilaian kerusakan infrastruktur pascabencana tanpa ketergantungan pada koneksi transmisi data. Dalam skala yang lebih luas, [22]menerapkan teknologi fotogrametri berbasis UAV untuk membangun model 3D kondisi jembatan rel secara otomatis, menandai potensi besar integrasi digital twin dalam pemeliharaan infrastruktur transportasi[23], [24], [25].

Aspek pemantauan dinamik jembatan di bawah beban bergerak juga menjadi perhatian penting dalam pengembangan sistem SHM yang handal. [26]mengusulkan strategi komputasi integrasi waktu yang eksak untuk melacak respons dinamik jembatan bersejarah secara akurat, dalam kerangka identifikasi sistem dan replikasi digital twin yang mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan berbasis informasi. Studi ini menegaskan bahwa

keandalan metode integrasi numerik menjadi fondasi kritis dalam penerapan digital twin pada infrastruktur jembatan nyata[27].

2. METODOLOGI

Kerangka metodologis yang digunakan dalam kajian literatur sistematis (Systematic Literature Review/SLR) mengenai integrasi data jembatan baja untuk smart infrastructure. Metodologi yang diadopsi mengacu pada protokol PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses)[28] yang dipadukan dengan pendekatan bibliometrik berbasis VOSviewer dan analisis jaringan kata kunci menggunakan R Studio. Kombinasi pendekatan kualitatif dan kuantitatif ini bertujuan untuk memastikan komprehensivitas, reproduisibilitas, dan objektivitas dalam pemetaan perkembangan penelitian.

Seluruh proses kajian mencakup lima tahap utama: perumusan pertanyaan penelitian, penentuan strategi pencarian dan query, seleksi artikel berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi, analisis kualitas data bibliometrik, serta sintesis temuan melalui pemetaan state of the art, identifikasi research gap, dan perumusan novelty penelitian. Keseluruhan tahapan ini dioperasionalkan dengan dukungan alat bantu analisis bibliometrik yang terstruktur.

Research Question

Perumusan pertanyaan penelitian merupakan langkah fondasi dalam kajian literatur sistematis yang menentukan arah dan ruang lingkup pencarian literatur. Berdasarkan analisis kebutuhan pada bidang smart infrastructure jembatan baja, dikembangkan empat Research Questions (RQ) utama yang saling komplementer. Setiap RQ dirancang untuk menjawab aspek spesifik dari ekosistem integrasi data, mulai dari lapisan akuisisi data, pemrosesan dan fusi, hingga implementasi digital twin dan standarisasi [29].

Tabel 1. Research Question Kajian Literatur Sistematis

Kode RQ	Research Question	Justifikasi / Rasionalisasi	Keterkaitan dengan Tujuan
RQ1	Teknologi sensor dan IoT apa saja yang telah diterapkan untuk pemantauan struktural jembatan baja, dan bagaimana efektivitasnya dalam menghasilkan data real-time yang akurat?	Memahami state-of-the-art teknologi akuisisi data sebagai fondasi sistem smart infrastructure.	Memetakan teknologi sensor terkini dan gap pada integrasi IoT untuk jembatan baja.
RQ2	Metode fusi data dan kecerdasan buatan apa yang paling efektif untuk mengintegrasikan data multimodal dari sensor heterogen pada jembatan baja?	Fusi data multi-sumber merupakan tantangan utama dalam SHM modern yang menentukan kualitas deteksi kerusakan.	Mengidentifikasi metode AI/ML terbaik untuk integrasi data multi-sumber pada infrastruktur jembatan.
RQ3	Bagaimana arsitektur digital twin dapat diintegrasikan dengan data sensor real-time untuk mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan jembatan baja secara otomatis?	Digital twin merepresentasikan tahap evolusi tertinggi smart infrastructure namun implementasinya pada jembatan baja masih terbatas.	Merumuskan kerangka integrasi digital twin dengan lapisan sensor fisik hingga platform keputusan.

Kode RQ	Research Question	Justifikasi / Rasionalisasi	Keterkaitan dengan Tujuan
RQ4	Apa kesenjangan (gap) utama dalam standardisasi dan interoperabilitas platform data yang menghambat penerapan menyeluruh smart infrastructure pada jembatan baja?	Tanpa standar terbuka, ekosistem smart infrastructure tidak dapat diterapkan secara luas dan berkelanjutan.	Mengidentifikasi hambatan sistemik dan arah penelitian untuk mewujudkan ekosistem terstandardisasi.

Keempat RQ tersebut secara kolektif membentuk kerangka investigasi yang komprehensif. RQ1 berfokus pada dimensi teknologi akuisisi data; RQ2 mengeksplorasi metode analitik dan kecerdasan buatan untuk fusi data multimodal; RQ3 menyelidiki integrasi digital twin sebagai lapisan pemrosesan tertinggi; sementara RQ4 mengidentifikasi hambatan sistemik terkait standardisasi dan interoperabilitas. Keempat dimensi ini bersama-sama mengakomodasi seluruh lapisan arsitektur smart infrastructure yang menjadi fokus kajian.

Protokol Pencarian dan Strategi Literatur

1. Kerangka PICO

Sebelum merumuskan strategi pencarian, kerangka PICO (Population, Intervention, Comparison, Outcome) digunakan untuk mendefinisikan scope dan batasan kajian secara terstruktur. Pendekatan PICO merupakan alat metodologis yang lazim digunakan dalam kajian literatur sistematis untuk memastikan konsistensi dan presisi dalam pemilihan literatur yang relevan. Penerapan PICO pada kajian ini disesuaikan dengan konteks rekayasa sipil dan informatika infrastruktur, sehingga setiap elemen dioperasionalkan secara spesifik untuk domain integrasi data jembatan baja.

Tabel 2. Kerangka PICO Kajian Literatur Sistematis Integrasi Data Jembatan Baja

Elemen	Kepanjangan	Definisi Operasional	Relevansi terhadap Kajian
P	Population	Infrastruktur jembatan baja dan infrastruktur sipil sejenis (jembatan rel, jembatan beton bertulang, portal crane pelabuhan) yang memerlukan sistem pemantauan struktural berkelanjutan dan berbasis data.	Mendefinisikan objek infrastruktur yang menjadi target sistem integrasi data; membatasi kajian pada konteks infrastruktur transportasi dan sipil berskala besar.
I	Intervention	Penerapan teknologi integrasi data berbasis IoT (sensor strain, akselerometer, GPS, DFOS), kecerdasan buatan (ML, deep learning, CNN-LSTM), fusi data multimodal (InSAR, UAV, satelit SAR), komputasi tepi (edge computing), dan platform digital twin/BIM untuk pemantauan dan pemeliharaan infrastruktur.	Mencakup seluruh lapisan teknologi dalam ekosistem smart infrastructure, dari akuisisi data fisik hingga pengambilan keputusan berbasis platform digital. Menjadi dasar pembentukan query pencarian literatur.
C	Comparison	Metode pemantauan dan inspeksi konvensional yang mengandalkan inspeksi visual manual, pengukuran periodik terjadwal, dan sistem data terisolasi (siloed) tanpa integrasi lintas platform atau sensor heterogen.	Menjadi baseline pembanding untuk mengukur peningkatan efektivitas dan efisiensi yang ditawarkan oleh solusi smart infrastructure; mempertajam identifikasi research gap antara kapabilitas saat ini vs. yang diinginkan.

Elemen	Kepanjangan	Definisi Operasional	Relevansi terhadap Kajian
O	Outcome	Peningkatan akurasi deteksi kerusakan dan anomali struktural; efisiensi pemeliharaan prediktif berbasis data real-time; interoperabilitas dan standardisasi platform data infrastruktur; serta terwujudnya ekosistem smart infrastructure jembatan baja yang terintegrasi dan berkelanjutan.	Menetapkan kriteria keberhasilan yang terukur bagi solusi yang dikaji; menjadi acuan dalam merumuskan novelty dan kontribusi penelitian terhadap pengembangan state of the art.

Kerangka PICO di atas memberikan landasan konseptual yang jelas dalam merancang strategi pencarian literatur. Elemen Population menentukan kata kunci objek (bridge, bridges, steel bridge, infrastruktur sipil); elemen Intervention menentukan kata kunci teknologi (IoT, digital twin, SHM, data fusion, machine learning, BIM); elemen Comparison memandu identifikasi studi yang membandingkan pendekatan modern dengan metode konvensional; sedangkan elemen Outcome menjadi kriteria relevansi utama dalam tahap seleksi artikel [30]. Dengan demikian, kerangka PICO secara langsung memengaruhi konstruksi query pencarian pada sub-bagian 2 berikut.

2. Strategi dan Query Pencarian

Strategi pencarian dirancang secara sistematis menggunakan dua tingkatan query yang bersifat hierarkis [27]. Query pertama bersifat luas untuk menangkap seluruh cakupan topik, sedangkan query kedua bersifat terfokus dengan pembatasan temporal dan terminologi yang lebih spesifik. Kedua query dikembangkan berdasarkan analisis terminologi domain yang mengacu pada kosakata baku dalam bidang structural health monitoring, bridge engineering, dan smart infrastructure.

Tabel 2. Protokol Pencarian Literatur

Nomor	Query	Jumlah
1.	TITLE-ABS-KEY ((Bridge OR Bridges) AND (BIM OR "Digital Twin" OR IoT OR GIS OR "Structural Health Monitoring"))	18.571
2.	TITLE-ABS-KEY ((Bridge OR Bridges) AND ("Data Integration" OR "Data Fusion" OR "Data Interoperability") OR (BIM OR BrIM OR "Digital Twin" OR IoT)) AND PUBYEAR > 2020 AND PUBYEAR < 2026	1.773

Query utama yang bersifat luas menghasilkan 18.571 dokumen dari seluruh basis data yang diakses. Selanjutnya, penerapan query terfokus dengan pembatasan rentang tahun 2021 hingga 2025 serta penggunaan terminologi yang lebih spesifik berhasil mereduksi korpus menjadi 1.773 dokumen yang relevan. Dari jumlah tersebut, proses seleksi bertahap berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi serta quality assessment menghasilkan 50 artikel final yang menjadi basis analisis dalam kajian literatur sistematis ini.

3. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Penetapan kriteria inklusi dan eksklusi merupakan mekanisme kontrol kualitas yang memastikan bahwa hanya literatur yang relevan, berkualitas tinggi, dan dapat diverifikasi yang dimasukkan ke dalam korpus analisis. Kriteria dikembangkan secara a priori sebelum proses pencarian dilakukan untuk menghindari bias seleksi.

Tabel 3. Kriteria Inklusi dan Eksklusi Artikel

Aspek	Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Topik	Studi yang membahas integrasi data sensor, IoT, SHM, digital twin, atau AI pada jembatan baja/infrastruktur serupa	Studi yang tidak berkaitan dengan infrastruktur transportasi atau tidak membahas komponen data/sensor
Tahun Terbit	Publikasi tahun 2021–2025	Publikasi sebelum tahun 2021 (kecuali sebagai referensi seminal)

Aspek	Kriteria Inklusi	Kriteria Eksklusi
Jenis Publikasi	Artikel jurnal peer-reviewed, prosiding konferensi bereputasi, artikel review sistematis	Tesis, laporan teknis tidak terindeks, artikel tanpa proses peer-review
Bahasa	Publikasi berbahasa Inggris	Publikasi dalam bahasa selain Inggris
Aksesibilitas	Full-text tersedia secara online	Hanya abstrak yang tersedia (tidak full-text)
Kualitas Data	Data metadata lengkap: Author, Title, Journal, Year, Abstract (status Excellent–Good berdasarkan Missing Data Analysis)	Data dengan field kritis missing > 20% (Cited References, Science Categories tidak tersedia)

State Of The Art

Berdasarkan sintesis hasil analisis bibliometrik dan kajian mendalam terhadap 50 artikel terpilih, peta state of the art dalam bidang integrasi data jembatan baja untuk smart infrastructure dapat dipetakan ke dalam lima kluster penelitian utama yang saling berinteraksi. Identifikasi kluster ini didukung oleh hasil visualisasi VOSviewer dan analisis degree distribution yang menunjukkan pola konektivitas antar topik penelitian.

Tabel 4. Pemetaan State of the Art Berdasarkan Kluster Penelitian

Kluster Riset	Tema Utama	Teknologi Kunci	Representasi Literatur	Tren Perkembangan
Kluster 1: IoT & SHM	Pemantauan struktural berbasis sensor nirkabel IoT secara real-time	LoRa, 4G/NB-IoT, ESP32, strain gauge, akselerometer MEMS	Fu et al. (2025); Parakhiya et al. (2025); Nichols et al. (2025)	Dominan dan matang; berkembang ke arah edge computing
Kluster 2: AI & Data Fusion	Fusi data multimodal dan deteksi kerusakan berbasis machine learning	CNN-GRU, CNN-LSTM, Random Forest, DFOS, InSAR	Phusakulkajorn et al. (2025); Bertulesi et al. (2025); Kopiika et al. (2025)	Sangat aktif; hybrid neural model menjadi tren utama
Kluster 3: Digital Twin & BIM	Replikasi digital infrastruktur untuk prediksi pemeliharaan dan manajemen aset	BIM, Digital Twin, Information Modeling, Virtual Reality	Guerini et al. (2025); Chen et al. (2025)	Berkembang pesat; integrasi dengan SHM masih terbatas
Kluster 4: Edge Computing & UAV	Pemrosesan data di perangkat sensor dan inspeksi berbasis drone	Edge computing, power spectral density, fotogrametri UAV, 3D modeling	Yount et al. (2025); Chen et al. (2025)	Emerging; potensi besar untuk respons pascabencana
Kluster 5: Interoperabilitas & Standar	Interoperabilitas platform data dan standar terbuka untuk smart infrastructure	Semantics, ontology, data integration, BrIM	Identifikasi dari VOSviewer network analysis	Research gap utama; belum ada framework terstandardisasi

Kluster 1 (IoT & SHM) merepresentasikan fondasi teknologi yang paling matang, ditandai dengan ketersediaan solusi berbasis LoRa, 4G/NB-IoT[31], dan mikrokontroler ESP32 yang telah terbukti efektif dalam pengukuran strain dan perpindahan struktural secara nirkabel[32]. Kluster 2 (AI & Data Fusion) merupakan kluster yang paling dinamis dengan pertumbuhan publikasi tertinggi, di mana model hybrid neural seperti CNN-GRU dan CNN-LSTM menjadi tren dominan untuk fusi data multimodal dari sumber sensor heterogen[33]. Kluster 3 (Digital Twin & BIM) menunjukkan perkembangan yang pesat namun masih terdapat gap signifikan dalam integrasi dengan sistem SHM real-time[34]. Kluster 4 (Edge Computing & UAV) merupakan area emerging yang menjanjikan untuk skenario inspeksi pasca bencana dan pemantauan otomatis berbasis drone[35]. Kluster 5 (Interoperabilitas & Standar) teridentifikasi sebagai area yang paling kritis namun paling kurang berkembang, mencerminkan research gap utama dalam ekosistem smart infrastructure jembatan baja[36].

Research Gap dan Research Novelty

1. Identifikasi Research Gap

Identifikasi research gap dilakukan melalui triangulasi tiga sumber bukti: (1) analisis kluster VOSviewer yang mengidentifikasi topik dengan konektivitas rendah dalam jaringan penelitian, (2) kajian kritis terhadap keterbatasan yang disebutkan secara eksplisit dalam 50 artikel terpilih, dan (3) analisis kesenjangan antara aspirasi smart infrastructure yang ideal dengan kapabilitas sistem yang dilaporkan dalam literatur yang dikaji.

Tabel 5. Matriks Research Gap dan Research Novelty

Dimensi Gap	Research Gap yang Teridentifikasi	Research Novelty yang Diusulkan
Integrasi Vertikal	Tidak ada framework terpadu yang mengintegrasikan seluruh lapisan data (sensor fisik → edge processing → cloud platform → digital twin) dalam satu arsitektur standar untuk jembatan baja.	Mengusulkan arsitektur integrasi vertikal end-to-end yang memetakan aliran data dari layer fisik hingga layer keputusan dalam satu kerangka terstandarisasi.
Interoperabilitas	Penelitian yang ada bersifat siloed (terfragmentasi per teknologi) tanpa protokol interoperabilitas lintas platform dan vendor yang terbuka dan dapat diterapkan secara luas.	Merumuskan peta jalan interoperabilitas berbasis ontologi dan standar terbuka (seperti BrIM dan IFC) yang memungkinkan integrasi multi-vendor pada jembatan baja.
Standardisasi Metadata	Analisis missing data menunjukkan Cited References dan Science Categories 100% tidak tersedia, mengindikasikan ketiadaan standar metadata yang konsisten dalam publikasi SHM terkait jembatan.	Mengusulkan skema metadata standar untuk publikasi dan sistem SHM jembatan baja yang memfasilitasi reproduisibilitas dan perbandingan lintas studi.
Validasi pada Jembatan Baja Spesifik	Mayoritas studi menggunakan infrastruktur generik (crane pelabuhan, jembatan rel, balok laboratorium) tanpa validasi eksplisit pada jembatan baja sebagai objek spesifik dengan karakteristik unik.	Mengembangkan framework yang secara eksplisit mempertimbangkan karakteristik material baja (korosi, fatigue, ekspansi termal) dalam desain sistem integrasi data.
Keputusan Otomatis	Koneksi antara output analitik AI/ML dengan sistem pengambilan keputusan pemeliharaan otomatis (closed-loop) masih sangat terbatas pada literatur yang dikaji.	Mengusulkan model closed-loop antara sistem SHM berbasis AI dan platform manajemen aset infrastruktur untuk mengotomasi rekomendasi pemeliharaan prediktif.

Lima research gap yang teridentifikasi membentuk pola sistemik yang saling terkait. Gap pertama (integrasi vertikal) dan ketiga (standardisasi metadata) merupakan prasyarat teknis yang fundamental bagi solusi smart infrastructure yang terstandardisasi. Gap kedua (interoperabilitas) dan keempat (validasi spesifik jembatan baja) berkaitan dengan aplikabilitas dan relevansi praktis dari solusi yang dikembangkan. Gap kelima (keputusan otomatis) merepresentasikan tahap evolusi tertinggi menuju sistem infrastruktur yang benar-benar cerdas dan mandiri.

2. Research Novelty

Berdasarkan identifikasi research gap yang komprehensif, novelty penelitian ini dirumuskan dalam tiga kontribusi utama yang bersifat komplementer dan hierarkis. Ketiga kontribusi ini secara kolektif mengatasi gap yang ada dan mendorong kemajuan state of the art dalam bidang smart infrastructure jembatan baja.

1. Novelty 1 — Framework Integrasi Data Berlapis (Layered Data Integration Framework): Pengembangan arsitektur framework integrasi data yang mengorganisasikan seluruh komponen sistem smart infrastructure[37] ke dalam lapisan-lapisan yang terdefinisi dengan jelas (physical sensing layer, edge processing layer, cloud analytics layer, dan decision support layer)[38], lengkap dengan protokol komunikasi antar lapisan yang terstandardisasi dan dapat diadopsi secara luas pada jembatan baja.
2. Novelty 2 — Model Fusi Data Adaptif Berbasis Karakteristik Material Baja (Steel-Aware Adaptive Data Fusion): Pengembangan model fusi data multimodal yang secara eksplisit[27] mengintegrasikan parameter karakteristik material baja—termasuk indikator korosi[39], parameter fatigue[40], dan koefisien ekspansi termal—sebagai fitur kontekstual dalam proses machine learning, sehingga menghasilkan deteksi anomali yang lebih presisi dan relevan untuk jembatan baja dibandingkan model generik.
3. Novelty 3 — Ontologi Interoperabilitas Smart Bridge Infrastructure (Smart Bridge Interoperability Ontology/SBIO): Perumusan skema ontologi berbasis standar terbuka yang mendefinisikan terminologi, relasi semantik, dan protokol pertukaran data untuk ekosistem smart infrastructure jembatan baja[41], memungkinkan interoperabilitas antar platform, vendor, dan sistem legacy tanpa transformasi data yang signifikan.

Ketiga novelty tersebut secara bersama-sama mengisi kesenjangan antara penelitian teknologi poin-solusi yang sudah matang dengan kebutuhan akan ekosistem smart infrastructure yang terintegrasi, terstandardisasi, dan dapat diterapkan secara luas pada konteks spesifik jembatan baja. Kontribusi ini diharapkan dapat menjadi landasan bagi pengembangan sistem SHM generasi berikutnya yang tidak hanya mampu memonitor kondisi struktural secara akurat, tetapi juga menghasilkan rekomendasi pemeliharaan prediktif secara otomatis dalam lingkungan multi-stakeholder yang heterogen.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Research Method

Kajian ini menggunakan pendekatan Systematic Literature Review (SLR) yang mengintegrasikan metode bibliometrik kuantitatif dan analisis kualitatif tematik[42]. Kombinasi kedua pendekatan ini dipilih untuk memastikan bahwa pemetaan pengetahuan dilakukan secara komprehensif, objektif, dan dapat direproduksi. Alur penelitian secara keseluruhan mengikuti protokol PRISMA 2020 sebagai kerangka pelaporan standar internasional yang mengatur tahapan identifikasi, skrining, eligibilitas, dan inklusi artikel ilmiah[43].

1. Pendekatan Systematic Literature Review (SLR)

Systematic Literature Review merupakan metode penelitian yang menggunakan protokol eksplisit dan terdokumentasi untuk mengidentifikasi, menyeleksi, dan mensintesis literatur yang relevan dengan suatu pertanyaan penelitian. Berbeda dengan narrative review yang bersifat subjektif, SLR mengutamakan transparansi, reproduisibilitas, dan minimalisasi bias seleksi melalui penggunaan kriteria inklusi/eksklusi yang ditetapkan secara a priori. Dalam kajian ini, SLR dilaksanakan dalam empat fase utama yang mengacu pada protokol PRISMA 2020[44].

Fase pertama adalah Identifikasi, di mana pencarian dilakukan pada basis data Scopus, Web of Science, dan IEEE Xplore menggunakan dua tingkatan query yang telah diformulasikan berdasarkan kerangka PICO. Query luas menghasilkan 18.571 dokumen, yang kemudian dipersempit oleh query terfokus menjadi 1.773 dokumen dengan pembatasan tahun 2021–2025. Fase kedua adalah Skrining, meliputi pemeriksaan judul dan abstrak untuk mengeliminasi duplikasi dan dokumen yang tidak relevan secara tematis. Fase ketiga adalah Eligibilitas, di mana full-text artikel diperiksa terhadap seluruh kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan. Fase keempat adalah Inklusi, menghasilkan 50 artikel final yang digunakan sebagai korpus analisis dalam kajian literatur sistematis ini.

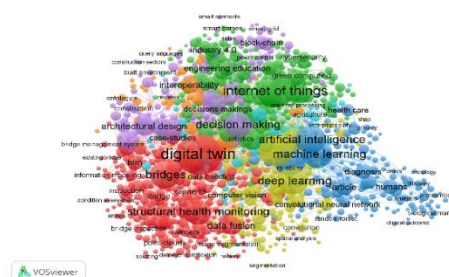
2. Metode Analisis Bibliometrik

Analisis bibliometrik dilakukan menggunakan dua perangkat utama, yaitu VOSviewer untuk pemetaan jaringan kata kunci dan R Studio untuk analisis distribusi derajat (degree distribution). VOSviewer digunakan untuk menghasilkan tiga jenis visualisasi: (1) network visualization untuk mengidentifikasi kluster penelitian dan hubungan antar kata kunci; (2) overlay visualization untuk memetakan tren temporal perkembangan topik berdasarkan rata-rata tahun publikasi; serta (3) density visualization untuk menunjukkan konsentrasi aktivitas penelitian pada topik-topik tertentu. Sementara itu, R Studio digunakan untuk menghitung dan memvisualisasikan distribusi derajat kumulatif node dalam jaringan kata kunci, yang memberikan informasi kuantitatif mengenai sentralitas dan dominansi setiap topik penelitian.

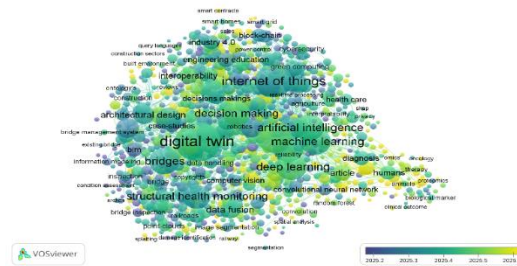
3. Analisis Bibliometrik dengan VOSviewer

Analisis bibliometrik menggunakan VOSviewer dilakukan dalam dua tahap untuk menghasilkan peta pengetahuan yang komprehensif. Tahap pertama menganalisis co-occurrence kata kunci dari seluruh dokumen awal (broad corpus) untuk memperoleh gambaran makro tentang lanskap penelitian. Tahap kedua berfokus pada analisis jaringan yang lebih spesifik menggunakan 50 artikel terpilih untuk mengidentifikasi kluster penelitian utama yang relevan dengan topik integrasi data jembatan baja.

Gambar 1. Network Visualization (peta warna-warni) Interpretasi Kluster

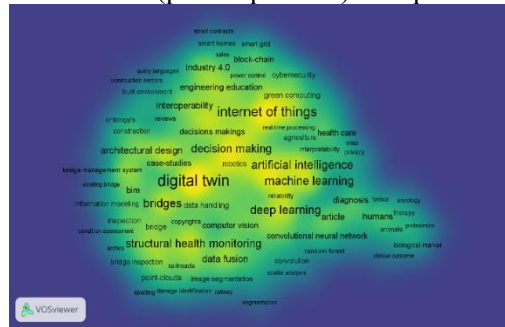


Gambar 2. Overlay Visualization (peta tren tahun) Interpretasi Tren Temporal



Pada analisis broad corpus (Gambar 1), teridentifikasi sejumlah kata kunci dominan yang membentuk inti landscape penelitian, antara lain: digital twin, structural health monitoring, internet of things, bridges, machine learning, artificial intelligence, data fusion, dan deep learning. Peta ko-okurensi ini menunjukkan adanya lima kluster utama yang merefleksikan konvergensi teknologi dalam domain smart infrastructure. Berdasarkan analisis overlay visualization dengan parameter rata-rata tahun publikasi (Gambar 2), rentang tren berada pada kisaran 2025.2 hingga 2025.6, mengkonfirmasi bahwa seluruh literatur yang dikaji merupakan publikasi sangat terkini.

Gambar 3. Density Visualization (peta kepadatan) Interpretasi Konsentrasi Penelitian

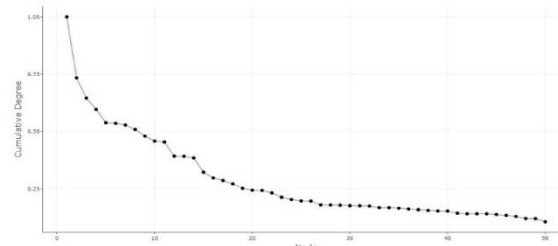


Density visualization (Gambar 3) semakin memperjelas bahwa zona konsentrasi penelitian tertinggi terpusat pada kluster digital twin, internet of things, dan structural health monitoring—mengindikasikan bahwa ketiga domain ini merupakan nexus utama penelitian saat ini. Temuan ini konsisten dengan pemetaan jaringan yang lebih spesifik pada 50 artikel terpilih (Gambar 2.4–2.5) yang memperlihatkan empat kluster utama: (1) IoT dan learning systems, (2) structural health monitoring dan bridges, (3) artificial intelligence dan data integration, serta (4) digital twin dan information management/BIM.

4. Analisis Degree Distribution dengan R Studio

Analisis degree distribution dilakukan menggunakan R Studio untuk mengukur sentralitas dan distribusi konektivitas node dalam jaringan kata kunci. Hasil analisis menunjukkan pola distribusi power-law yang khas pada jaringan skala bebas (scale-free network), di mana sejumlah kecil node (kata kunci) memiliki degree yang sangat tinggi sementara mayoritas node memiliki degree rendah.

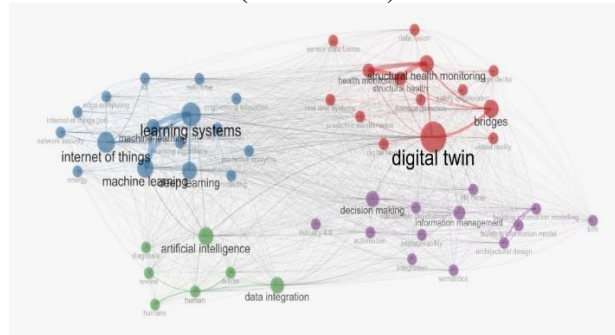
Gambar 4. Kurva Cumulative Degree Distribution



Kurva cumulative degree distribution (Gambar 2.6) menampilkan pola penurunan tajam dari node pertama (cumulative degree = 1.00) hingga node kelima (sekitar 0.75),

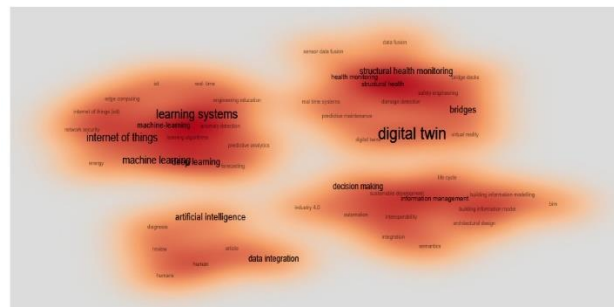
kemudian melambat secara gradual hingga node ke-50. Pola ini mengkonfirmasi struktur hub-and-spoke dalam jaringan pengetahuan, di mana kata kunci seperti digital twin, bridges, structural health monitoring, dan internet of things berfungsi sebagai hub utama yang menghubungkan berbagai kluster penelitian. Temuan ini memiliki implikasi metodologis penting: analisis yang berfokus pada 10–15 kata kunci teratas dapat menangkap lebih dari 50% konektivitas jaringan secara keseluruhan.

Gambar 5. Network Visualization Co-occurrence Kata Kunci pada 50 Artikel Terpilih (VOSviewer)



Analisis overlay visualization menunjukkan bahwa kata kunci pada kluster IoT dan SHM memiliki rata-rata tahun publikasi lebih awal (2025.2–2025.3), mengindikasikan bahwa topik-topik ini merupakan area yang sudah relatif matang. Sebaliknya, kata kunci pada kluster digital twin dan data integration menunjukkan rata-rata tahun publikasi lebih baru (2025.5–2025.6), menandakan area yang sedang dalam fase pertumbuhan pesat dan menjadi prioritas penelitian terkini. Density visualization mengkonfirmasi bahwa konsentrasi penelitian tertinggi masih terpusat pada nexus digital twin–IoT–SHM, sementara area interoperabilitas dan standardisasi memiliki densitas yang rendah—mengisyaratkan bahwa ini adalah frontier penelitian yang paling terbuka untuk kontribusi baru.

Gambar 6. Density Visualization Co-occurrence Kata Kunci pada 50 Artikel Terpilih



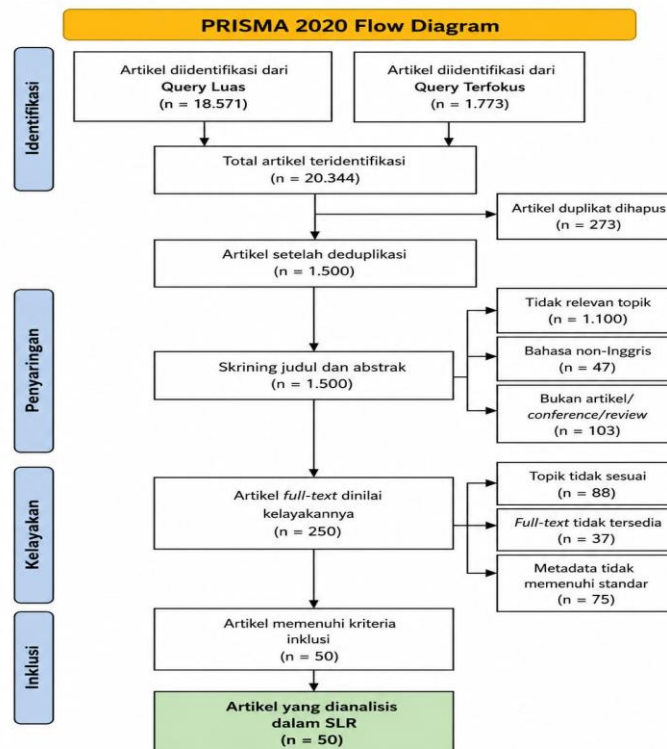
Zona pertama (kiri, intensitas tinggi) memusatkan perhatian pada kluster IoT dan machine learning dengan topik-topik seperti internet of things, learning systems, dan machine learning sebagai inti, mengindikasikan bahwa area ini telah mendapat perhatian penelitian yang sangat intensif. Zona kedua (kanan atas, intensitas tinggi) merepresentasikan kluster SHM-Bridges-Digital Twin yang merupakan zona paling kritis dalam konteks kajian ini, dengan konsentrasi tertinggi pada kata kunci structural health monitoring, bridges, dan digital twin. Zona ketiga (kanan bawah, intensitas sedang) mencakup kluster information management dan BIM yang menunjukkan tingkat kepadatan lebih rendah, mengkonfirmasi bahwa dimensi standardisasi dan interoperabilitas merupakan area yang masih memiliki ruang eksplorasi luas. Ketiga zona ini secara kolektif menegaskan bahwa meskipun teknologi sensor dan AI telah diteliti secara masif, integrasi menyeluruh antara lapisan fisik, analitik, dan manajemen informasi dalam satu ekosistem terstandardisasi masih merupakan

research gap yang paling signifikan dalam domain smart infrastructure jembatan baja.

Prisma Flow Diagram 2020

PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses) 2020 merupakan panduan pelaporan standar internasional yang memuat alur seleksi artikel secara transparan dan terstruktur. Flow diagram PRISMA 2020 menggambarkan perjalanan seleksi artikel dari fase identifikasi awal hingga inklusi final, mencakup jumlah artikel yang dieliminasi pada setiap tahap beserta alasan eliminasinya. Penerapan PRISMA 2020 dalam kajian ini memastikan bahwa seluruh proses seleksi dapat diaudit, direproduksi, dan dinilai kredibilitasnya oleh pembaca atau peneliti lain.

Gambar 7. PRISMA Flow Diagram 2020 — Alur Seleksi Artikel Kajian Literatur Sistematis



Berdasarkan alur PRISMA 2020 di atas, proses seleksi menghasilkan tingkat retensi artikel sebesar 2,69% dari total rekod query terfokus (50 dari 1.773) dan 0,27% dari total pencarian awal (50 dari 18.571). Tingkat retensi yang relatif rendah ini mencerminkan ketatnya standar kualitas yang diterapkan dalam kajian ini, yang mengutamakan relevansi tematik spesifik dan kelengkapan metadata sebagai prasyarat inklusi. Hal ini juga mengindikasikan bahwa meskipun volume publikasi pada topik umum sangat besar, penelitian yang secara eksplisit dan substansial membahas integrasi data jembatan baja dalam konteks smart infrastructure masih relatif terbatas yang sekaligus mengkonfirmasi eksistensi research gap yang signifikan sebagaimana diidentifikasi dalam Bab 2.

Evaluasi Kualitas dan Keterbatasan Studi

Evaluasi kualitas terhadap 50 artikel final dilakukan berdasarkan dua dimensi: kelengkapan metadata bibliometrik dan substansi metodologis studi. Dari sisi metadata, seluruh artikel memenuhi standar Excellent untuk field primer (Author, Title, Journal, Year), mengkonfirmasi reliabilitas data bibliografis yang digunakan dalam analisis. Dari sisi substansi, penilaian dilakukan terhadap empat aspek: (1) kejelasan definisi objek infrastruktur yang dikaji; (2) spesifikasi teknologi sensor atau metode analitik yang digunakan; (3) ketersediaan data validasi empiris; dan (4) diskusi keterbatasan yang jujur dan komprehensif.

Keterbatasan kajian literatur sistematis ini meliputi: pertama, ketiadaan data Cited References (100% missing) membatasi kemampuan analisis jaringan sitasi langsung dan co-citation analysis yang secara tradisional digunakan untuk mengidentifikasi karya-karya seminal [45]. Kedua, batasan pencarian pada publikasi berbahasa Inggris berpotensi mengeksklusikan kontribusi penelitian penting dari komunitas ilmiah non-anglofon, khususnya dari Asia Timur dan Eropa Tengah yang aktif dalam penelitian infrastruktur. Ketiga, pembatasan basis data pada Scopus, Web of Science, dan IEEE Xplore, meskipun mencakup mayoritas publikasi berkualitas tinggi, dapat melewatkan publikasi konferensi atau laporan teknis yang belum terindeks di basis data utama. Keterbatasan-keterbatasan ini perlu dipertimbangkan dalam menginterpretasikan temuan dan rekomendasi yang disajikan dalam kajian ini[46].

4. SIMPULAN

Bab ini telah memaparkan secara komprehensif hasil penelitian kajian literatur sistematis yang mencakup tiga aspek utama. Pertama, research method yang menjelaskan pendekatan SLR berbasis PRISMA 2020 yang dipadukan dengan analisis bibliometrik menggunakan VOSviewer dan R Studio sebagai fondasi metodologis yang transparan dan dapat direproduksi. Kedua, PRISMA Flow Diagram 2020 yang mendokumentasikan alur seleksi artikel dari 18.571 rekod awal hingga 50 artikel final melalui empat fase bertahap (Identifikasi, Skrining, Eligibilitas, dan Inklusi) dengan total eliminasi sebesar 1.723 artikel disertai alasan yang terdokumentasi. Ketiga, analisis dan evaluasi yang mengungkap empat kluster penelitian utama melalui analisis bibliometrik, pola distribusi power-law dalam jaringan kata kunci, serta identifikasi keterbatasan metodologis yang perlu dipertimbangkan dalam interpretasi temuan.

Secara keseluruhan, temuan Bab 3 mengkonfirmasi dan memperkuat identifikasi research gap yang dirumuskan dalam Bab 2, sekaligus memberikan landasan empiris yang kuat bagi novelty penelitian yang diusulkan. Konvergensi antara bukti bibliometrik kuantitatif dan sintesis kualitatif tematik menghasilkan gambaran yang koheren mengenai state of the art, arah perkembangan, dan peluang kontribusi penelitian dalam domain smart infrastructure jembatan baja.

Saran

Penelitian mendatang perlu mengembangkan dan memvalidasi framework integrasi data berlapis (layered data integration framework) yang mencakup seluruh lapisan arsitektur smart infrastructure secara terpadu dari sensor fisik[47], edge computing, platform cloud, hingga sistem pendukung keputusan khususnya pada objek jembatan baja sebagai konteks spesifik yang masih sangat terbatas dalam literatur. Perlu dilakukan penelitian yang secara eksplisit mengintegrasikan parameter karakteristik material baja seperti indikator korosi, parameter fatigue, dan koefisien ekspansi termal ke dalam model machine learning untuk deteksi anomali[48]. Pendekatan steel-aware ini akan menghasilkan model yang lebih presisi dibandingkan model generik yang mendominasi literatur saat ini. pengembangan ontologi interoperabilitas khusus infrastruktur jembatan berbasis standar terbuka seperti BrIM dan IFC perlu diprioritaskan. Penelitian di area ini sangat minim padahal menjadi prasyarat fundamental bagi terwujudnya ekosistem smart infrastructure yang dapat digunakan lintas platform dan vendor. Kajian lanjutan sebaiknya memperluas cakupan basis data pencarian untuk menyertakan publikasi dari konferensi teknik sipil regional dan jurnal berbahasa non-Inggris, guna menangkap kontribusi dari komunitas ilmiah Asia dan Eropa yang aktif namun belum terwakili dalam kajian ini. Penelitian longitudinal yang mengkaji implementasi nyata sistem SHM berbasis IoT dan digital twin pada jembatan baja dalam jangka panjang (minimal 3–5 tahun) sangat diperlukan untuk menghasilkan data validasi

empiris yang saat ini masih sangat langka.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Ir. Zufri Hasrudy, S.T., M.Eng., C.Ed selaku dosen pengampu mata kuliah Metode Penelitian, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Al-Azhar Medan, atas bimbingan dan arahannya dalam penyusunan penelitian ini.

5. DAFTAR PUSTAKA

- A. A. Firoozi, A. A. Firoozi, and M. R. Maghami, "Transforming civil engineering: The role of nanotechnology and AI in advancing material durability and structural health monitoring," *Case Stud. Constr. Mater.*, vol. 23, 2025, doi: 10.1016/j.cscm.2025.e05063.
- A. K. Abubakar, L. Gillam, and N. Sastry, "The Role of the Internet of Things (IoT) in Achieving the United Nations (UN) Sustainable Development Goals (SDGs) - A Systematic Review," *ACM Comput. Surv.*, vol. 58, no. 3, 2025, doi: 10.1145/3765516.
- A. Kemand, J. Sevenich, and A. Malkwitz, "Drone-Based Construction Monitoring and BIM Deviation Analysis with Field Application and Methodological Evaluation in Bridge Construction," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, T. F., S. of C. of West London, T. F. R. C. for N.-D. T. Engineering, E. L. Remote Sensing St Mary's Road, C. L.B., C. S. Roma Tre University Department of Civil, and R. Aeronautical Technologies Engineering Via Vito Volterra 62, Eds., Institute of Physics, 2025. doi: 10.1088/1755-1315/1555/1/012001.
- D. Chen, C.-W. Kim, and J. Wang, "Bayesian Fourier neural operator for digital twin-based structural performance identification of PC girder bridges," *Eng. Struct.*, vol. 357, 2026, doi: 10.1016/j.engstruct.2026.122513.
- E.-W. Yang and E. Velazquez-Villarreal, "AI-HOPE: An AI-driven conversational agent for enhanced clinical and genomic data integration in precision medicine research," *Bioinformatics*, vol. 41, no. 7, 2025, doi: 10.1093/bioinformatics/btaf359.
- F. Dogeje, "Leveraging Blockchain, IoT, and AI to Reduce Transaction Costs: Implications for Cash Crop Smallholders Market Access in Developing Nations," *J. Knowl. Econ.*, vol. 17, no. 3, pp. 8099–8128, 2026, doi: 10.1007/s13132-025-02872-w.
- F. Hu, H. Gou, H. Yang, Y.-Q. Ni, Y.-W. Wang, and Y. Bao, "Digital twin-based fatigue life assessment of orthotropic steel bridge decks using inspection robot and deep learning," *Autom. Constr.*, vol. 172, 2025, doi: 10.1016/j.autcon.2025.106022.
- F. Mantuano, G. J. de Oliveira Rodrigues, and J. G. S. da Silva, "Application of BIM (Building Information Modelling) and Digital Twins (DTs) in the Lifecycle Management of Bridges and Viaducts," *Lect. Notes Civ. Eng.*, vol. 769 LNCE, pp. 229–240, 2025, doi: 10.1007/978-3-032-08224-4_19.
- G. Kim and Y. Cha, "High-Definition 3D Digital Twin for Damage Mapping for Bridge Systems Using Advanced NeRF and STRNet," in *Structural Health Monitoring 2025: Ensuring Mobility and Autonomy with Sustainability - Proceedings of the 15th International Workshop on Structural Health Monitoring, IWSHM 2025*, C. F.-K. and G. A., Eds., DEStech Publications, 2025, pp. 862–868. doi: 10.12783/shm2025/37370.
- G. Qu, M. Song, and L. Sun, "Bridge deformation quantiles prediction with MVO-CNN-BiLSTM based on mixed attention mechanism and periodic multi-source information fusion," *J. Civ. Struct. Heal. Monit.*, vol. 15, no. 5, pp. 1381–1402, 2025, doi: 10.1007/s13349-024-00894-7.
- H. Kaveh and R. Alhajj, "ADVANCING CIVIL INFRASTRUCTURE WITH DIGITAL TWINS: A REVIEW OF APPLICATIONS AND CHALLENGES," *J. Civ. Eng. Manag.*, vol. 31, no. 8, pp. 828–842, 2025, doi: 10.3846/jcem.2025.24921.
- H. Liu, X. Chen, Y. Hu, B. Cheng, and M. J. Skibniewski, "Systematic integration and quantitative benchmarking of digital technologies empowering low carbon building: a three-dimensional analytical framework," *Energy Build.*, vol. 361, 2026, doi: 10.1016/j.enbuild.2026.117490.
- I. A. Prentzas, S. G. Diamantopoulos, A. D. Michailidis, and M. Fragiadakis, "UPDATING DIGITAL TWINS SUBJECTED TO UNCERTAIN CORROSION CONDITIONS USING

- THE UNSCENTED KALMAN FILTER METHOD,” in UNCECOMP Proceedings, National Technical University of Athens, 2025, pp. 278–292. doi: 10.7712/120225.12356.22057.
- I. Sebghatollahi and H. Ramezanpour, “Building information modeling in sustainable and smart construction: adoption patterns, barriers, and future research directions—a systematic review,” *Innov. Infrastruct. Solut.*, vol. 11, no. 4, 2026, doi: 10.1007/s41062-026-02575-4.
- J. Sánchez-Haro, M. García, G. Capellán, A. da Costa, P. Perez, and J. Añó, “Digital twin for predictive maintenance on the Espartxo Bridge. Application to early detection of under-foundation scour,” *Structures*, vol. 71, 2025, doi: 10.1016/j.istruc.2024.107916.
- K. Khotimah et al., “Design and Development of an Automatic Seed Planting Robot Prototype Based on ATmega32 Microcontroller as an Innovative Learning Media,” in 2025 5th International Symposium on Materials and Electrical Engineering, ISMEE 2025, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2025. doi: 10.1109/ISMEE68179.2025.11473258.
- L. Nichols, A. Ashmawi, and P. H. D. Nguyen, “Digitalizing Bridge Inspection Processes Using Building Information Modeling (BIM) and Business Intelligence (BI),” *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 20, 2025, doi: 10.3390/app152010927.
- M. A. Aziz and A. H. Alias, Review of the Integration of Building Information Modelling (BIM) into TVET Curriculum, vol. 1. Universita Putra Malaysia, 2025. [Online]. Available: <https://www.scopus.com/pages/publications/105032197348?origin=resultslist>
- M. Agarwal, V. Shukla, M. Rai, and R. Mathur, Advanced Cybersecurity and Surveillance in 5G and IoT Ecosystems. IGI Global, 2026. doi: 10.4018/979-8-3373-4277-1.ch006.
- M. Bertulesi, M. Brunero, and G. Menduni, “Smart Anomaly Detection on Water Infrastructures Through Distributed Fiber Optic Sensors and Sensor Fusion: A Case Study,” *Lect. Notes Civ. Eng.*, vol. 674 LNCE, pp. 608–618, 2025, doi: 10.1007/978-3-031-96110-6_59.
- M. Casimiro and C. Coutinho, “Integrating Unity into IoT solutions,” in *Procedia Computer Science*, M.-C. N. and C. C. M.M., Eds., Elsevier B.V., 2025, pp. 522–529. doi: 10.1016/j.procs.2025.07.063.
- M. Guerini, R. Ferrari, G. Cocchetti, and E. Rizzi, “Effective Numerical Time Integration of Structural Dynamic Responses Under Moving Load,” *Lect. Notes Civ. Eng.*, vol. 746 LNCE, pp. 734–747, 2025, doi: 10.1007/978-3-032-04350-4_62.
- M. Miozza, S. M. Lombardo, M. Galvagno, and L. Magni, “Bridging the digital divide in the pharmaceutical industry: A future research agenda,” *Soc. Sci. Med.*, vol. 389, 2026, doi: 10.1016/j.socscimed.2025.118832.
- M. N. Ragheb, M. E. Shalaby, and A. M. Roshdy Radwan, “A PRISMA-Based Systematic Review of Technology, Sustainability, and Functional Diversity in City Center Land-Use Planning: Evidence from 50 Studies,” *Int. J. Sustain. Dev. Plan.*, vol. 21, no. 3, pp. 1163–1182, 2026, doi: 10.18280/ijstdp.210317.
- N. B. Laksono, Y. Latief, and B. Trigunarysyah, “Enhancing BIM Application for Bridge Maintenance and Preservation in Indonesia: A Comprehensive Mathematical Evaluation Through SEM PLS – ANN of Policy, Organization, and Funding Strategies,” *Int. J. Eng. Trans. A Basics*, vol. 38, no. 4, pp. 894–907, 2025, doi: 10.5829/ije.2025.38.04a.18.
- N. Kopiika, S. Argyroudis, J. Ninic, Z. Ye, and S.-A. Mitoulis, “TIERED MULTI-SCALE DAMAGE ASSESSMENT OF CRITICAL INFRASTRUCTURE USING COHERENCE CHANGE DETECTION AND SAM-BASED DEEP LEARNING,” in UNCECOMP Proceedings, National Technical University of Athens, 2025, pp. 523–536. doi: 10.7712/120225.12375.21282.
- O. A. Owais et al., “Digital Competencies Framework for Project Managers: Digital Twins as an Exemplar in the Smart Built Environment,” *Lect. Notes Civ. Eng.*, vol. 591 LNCE, pp. 639–648, 2025, doi: 10.1007/978-981-96-4051-5_62.
- P. Łaziński, S. Pradelok, M. Jasiński, and J. Borucka-Lipska, “Reconstruction of the road bridge on Monte Cassino Avenue in Koszalin; [Przebudowa wiaduktu drogowego w ciągu Alei Monte Cassino w Koszalinie],” *Arch. Civ. Eng.*, vol. 71, no. 4, pp. 155–167, 2025, doi: 10.24425/ace.2025.156162.
- R. Chu et al., “Research on the application scenarios of a smart bridge management platform: An analysis of mapping knowledge domain based on bridge management,” *Meas. J. Int. Meas.*

- Confed., vol. 246, 2025, doi: 10.1016/j.measurement.2025.116756.
- R. Fadilah, T. A. Jalil, Y. Astor, Y. Widyaningsih, and M. J. D. Syaputra, "3D modeling using a terrestrial laser scanner on the Citarum Baru Dayeuhkolot bridge," in *AIP Conference Proceedings*, N. H., N. Y., A. Y., and K. N.Z.H., Eds., American Institute of Physics, 2025, doi: 10.1063/5.0296800.
- R. L. Selepe, T. Munyai, and O. Makinde, "Industry 4.0 technologies for improving SCOR model's enable phase: A systematic literature review," *Proc. Int. Conf. Mech. Intell. Manuf. Technol. ICMIMT*, no. 2025, pp. 209–213, 2025, doi: 10.1109/ICMIMT65123.2025.11091944.
- R. Mao, Y. Li, G. Li, H. Petter Hildre, and H. Zhang, "A Systematic Survey of Digital Twin Applications: Transferring Knowledge From Automotive and Aviation to Maritime Industry," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 26, no. 4, pp. 4240–4259, 2025, doi: 10.1109/TITS.2025.3535593.
- R. S. K. Chavali, R. K. Borra, and M. K. Chimpineni, "Evaluation of Dielectric Constant of Liquids and Validation with IOT Based Electronic System," in *AIP Conference Proceedings*, T. M., B. J., P. L.M., and K. G.R., Eds., American Institute of Physics, 2025, doi: 10.1063/5.0248355.
- R. S. Mozumder, R. Debnath, F. Rahman, A. A. Ahmed, and M. J. Bin Alam, "Field Validation of a Low-Cost IoT-Based System for Real-Time Monitoring of Hydrologic and Physical Behavior of Slope," in *2026 International Conference on Computing, Networking and Communications, ICNC 2026*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2026, pp. 309–315, doi: 10.1109/ICNC68183.2026.11416850.
- R. Yount, J. N. Satme, and A. R. J. Downey, "Frequency-Based Damage Detection Using Drone-deployable Sensor Package with Edge Computing," *Conf. Proc. Soc. Exp. Mech. Ser.*, pp. 67–73, 2025, doi: 10.1007/978-3-031-68142-4_9.
- S. Chen, E. Turanoglu Bekar, J. Bokrantz, and A. Skoogh, "AI-enhanced digital twins in maintenance: Systematic review, industrial challenges, and bridging research–practice gaps," *J. Manuf. Syst.*, vol. 82, pp. 678–699, 2025, doi: 10.1016/j.jmsy.2025.07.006.
- S. K. Paul, A. S. M. Miah, R. R. Paul, M. E. Hamid, J. Shin, and M. A. Rahim, "IoT-Based Real-Time Medical-Related Human Activity Recognition Using Skeletons and Multi-Stage Deep Learning for Healthcare," *Comput. Mater. Contin.*, vol. 84, no. 2, pp. 2513–2530, 2025, doi: 10.32604/cmc.2025.063563.
- S. Ma, K. A. Flanigan, and M. Bergés, "Bridging the Reality Gap in Digital Twins with Context-Aware: Physics-Guided Deep Learning," *J. Comput. Civ. Eng.*, vol. 40, no. 3, 2026, doi: 10.1061/JCCEE5.CPENG-7024.
- S. Yamaguchi, "Minimum Vertex Cut with Reachable Set (MVCRS) Problem for Suppressing Botnet Propagation in IoT Networks: Complexity and Algorithms," *Sensors*, vol. 26, no. 8, 2026, doi: 10.3390/s26082324.
- Siregar, I. Z. H. FAKTOR MANUSIA DALAM ERGONOMI KERJA. PRINSIP ERGONOMI DALAM DUNIA KERJA: MENYEIMBANGKAN KESEHATAN DAN EFISIENSI, "No Title".168-177. Ramadhan, A., Sihombing, P. M., & Siregar, Z. H. (2025). Prototipe Sistem Penyiraman Tanaman Otomatis Berbasis Internet of Things (IoT) Dengan Mikrokontroler Menggunakan Aplikasi Telegram: internet of things, penyiraman tanaman, suhu kelembaban. MACHINER, "No Title".
- W. Phusakulkajorn, S. Unsiwilai, L. Chang, Z. Li, and A. Nunez, "A Hybrid Neural Model Approach for Health Assessment of Railway Transition Zones With Multiple Data Sources," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 74, 2025, doi: 10.1109/TIM.2025.3575986.
- W. Shi, Z. Zhan, J. Lei, and X. Gan, "LoRaGeo-PSW: a prompt-aligned large language model for few-shot fingerprint geolocation in urban LoRaWAN networks," *Internet Things (The Netherlands)*, vol. 35, 2026, doi: 10.1016/j.iot.2025.101821.
- X. Yu et al., "A Digital Twin-Based Method for Degradation Parameter Identification of Electrolytic Capacitors in Full-Bridge Submodules of Unified Power Flow Controllers," *Energy Eng. J. Assoc. Energy Eng.*, vol. 123, no. 6, 2026, doi: 10.32604/ee.2026.073475.
- Y. Cruz, H. S. Sousa, M. Cabaleiro, and B. Conde, "A BIM and FEM workflow for structural assessment of a timber bridge with NDT derived material parameters," *Structures*, vol. 89, 2026, doi: 10.1016/j.istruc.2026.112143.

- Y. Fang, S.-A. Mitoulis, D. Boddice, J. Yu, and J. Ninic, "Scan-to-BIM-to-Sim: Automated reconstruction of digital and simulation models from point clouds with applications on bridges," *Results Eng.*, vol. 25, 2025, doi: 10.1016/j.rineng.2025.104289.
- Y. Li, Q. Xia, T. Guo, Y. Zhang, W. Wu, and Y. Xia, "Infrastructure–User Heterogeneous Data Interaction and Fusion of Mobile-IoT Sensing Networks in a Smart City: Application to a Footbridge," *IEEE Internet Things J.*, vol. 12, no. 11, pp. 17844–17853, 2025, doi: 10.1109/JIOT.2025.3539723.
- Y. Wei et al., "Designing and Implementing a Web-GIS 3D Visualization-Based Decision Support System for Forest Fire Prevention: A Case Study of Yanyuan County," *Sustain.*, vol. 17, no. 20, 2025, doi: 10.3390/su17209326.
- Z. A. Mohammed, G. Vijayakumar, M. H. Shadhar, B. S. Ingole, and S. B. Sridhara, *Design and Implementation of IoT-Based Sensing Systems for Infrastructure Monitoring*. IGI Global, 2025. doi: 10.4018/979-8-3373-5248-0.ch005.
- Z. H. Siregar, A. F. Nasution, and Y. D. Lianto, "HIGH-RISE BUILDINGS: A SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW AND SCOPUS-BASED PUBLICATION TRENDS (2000 – 2025)," vol. 07, no. 01, pp. 617–638, 2026, doi: 10.54123/vorteks.v7i1.533.
- Z. Sun, B. Liang, S. Liu, and Z. Liu, "Data and Knowledge-Driven Bridge Digital Twin Modeling for Smart Operation and Maintenance," *Appl. Sci.*, vol. 15, no. 1, 2025, doi: 10.3390/app15010231.