

Application of Digital Twin Technology for Real-time Monitoring and Predictive Maintenance of Coastal Bridges under Climate Change Scenarios

M. Syafril Imam Siddiq Arief R*¹, Jackques Donal Pangaribuan¹

Email: sc.rmdhan@gmail.com

¹Fakultas Teknik, Universitas Sumatera Utara, Medan, Sumatera Utara, Indonesia

*Corresponding Author

Abstract

Coastal bridges are increasingly vulnerable to structural degradation due to extreme environmental conditions and the accelerating impacts of climate change. Traditional inspection methods are no longer sufficient to provide early detection or preventive maintenance. This study proposes developing a digital twin system that integrates real-time sensor data and machine learning algorithms to monitor and predict the structural conditions of coastal bridges. Data from environmental (humidity, temperature, salinity) and structural (strain, displacement) sensors were collected at a case-study bridge in Semarang, Indonesia. The system employed a Long Short-Term Memory (LSTM) model to forecast stress anomalies and potential damage, achieving high accuracy with a Mean Absolute Percentage Error (MAPE) below 5%. The digital twin interface visualizes risk zones and enables early warning with an average lead time of 5–7 days. Field validations showed a 97.5% match between system predictions and manual inspections. This research contributes a replicable, scalable framework for adaptive infrastructure management that enhances maintenance decision-making and resilience to climate-induced deterioration in coastal regions.

Keywords: Digital twin, predictive maintenance, coastal infrastructure.

I. PENDAHULUAN

Wilayah pesisir memiliki peran strategis dalam konektivitas dan pertumbuhan ekonomi, terutama melalui keberadaan jembatan sebagai infrastruktur utama distribusi logistik dan mobilitas masyarakat (Gao et al., 2024; Naranjo Gómez et al., 2022). Namun, jembatan pesisir menghadapi risiko degradasi tinggi akibat paparan garam, kelembapan, fluktuasi suhu, serta peningkatan intensitas badai dan perubahan iklim (Gao et al., 2024; Buldeo Rai et al., 2022). Kondisi ini mempercepat korosi dan menurunkan stabilitas struktur, sementara sistem pemeliharaan yang masih bersifat reaktif belum mampu mengantisipasi kerusakan dini (Hou et al., 2024; Wan et al., 2025).

Inspeksi manual memiliki keterbatasan dalam mendeteksi mikrokeretakan atau korosi awal, terutama pada lokasi terpencil, sementara peningkatan beban lalu lintas mempercepat keausan struktur (Guo & Qin, 2022; X. Chen, 2023). Data menunjukkan lebih dari 60% jembatan pesisir Asia Tenggara mengalami kerusakan dini (Ansari, 2022), dan di Indonesia sekitar 40%

jembatan pesisir wilayah timur mengalami penurunan kualitas struktural, namun hanya 18% yang mendapatkan pemeliharaan tepat waktu (Rahman et al., 2023; Wan et al., 2025). Dampaknya tidak hanya teknis, tetapi juga ekonomi dan sosial, termasuk peningkatan biaya logistik dan gangguan akses layanan publik (Roy et al., 2022; Q. Chen et al., 2023). Oleh karena itu, dibutuhkan sistem monitoring yang mampu mendeteksi sekaligus memprediksi kerusakan berbasis data lingkungan dan riwayat penggunaan (Amini & Padgett, 2023).

Digital twin menawarkan solusi melalui representasi digital real-time yang terintegrasi dengan data sensor dan memungkinkan simulasi prediktif (Davoodi et al., 2023; Wang et al., 2022; Broo & Schooling, 2023; Zhao et al., 2022). Dalam konteks perubahan iklim global yang meningkatkan suhu dan frekuensi badai (Jeon et al., 2025), integrasi data suhu, kelembapan, getaran, dan kadar garam dengan algoritma machine learning memungkinkan sistem peringatan dini terhadap potensi korosi dan retakan (Heng et al., 2024; Kandemir et al., 2024).

Meskipun digital twin telah banyak diterapkan di sektor manufaktur, energi, dan transportasi (Lehtola et al., 2022; Ma et al., 2022; Geremicca & Bilec, 2024; Peldon et al., 2024), penerapannya pada jembatan pesisir masih terbatas (Al-Sehrawy et al., 2023; Weil et al., 2023). Beberapa studi pada jembatan masih berfokus pada data struktural tanpa integrasi variabel lingkungan atau mekanisme prediktif berbasis machine learning (Yu et al., 2022; Xu & Liu, 2024). Hal ini menunjukkan adanya celah penelitian dalam pengembangan sistem digital twin yang kontekstual untuk lingkungan pesisir.

Penelitian ini mengembangkan sistem digital twin integratif yang menggabungkan data lingkungan (kelembapan, suhu, kadar garam), data struktural (getaran, retakan, beban), serta algoritma machine learning untuk analisis prediktif. Sistem dilengkapi dashboard visualisasi real-time guna mendukung pengambilan keputusan cepat oleh operator. Kontribusi penelitian ini meliputi perluasan kajian digital twin pada infrastruktur pesisir, pengembangan sistem berbasis IoT dan machine learning yang integratif, serta penyediaan kerangka praktis untuk pemeliharaan prediktif yang lebih efisien dan adaptif terhadap perubahan iklim.

II. LITERATURE REVIEW

Digitalisasi infrastruktur menjadi strategi utama dalam pengelolaan aset publik yang berkelanjutan, terutama pada jembatan pesisir yang menghadapi paparan lingkungan ekstrem, kadar garam tinggi, fluktuasi suhu, dan dampak perubahan iklim. Degradasi akibat korosi dapat menurunkan kapasitas beban hingga 20% dalam lima tahun (Han et al., 2022), sementara kenaikan permukaan laut dan badai mempercepat kerusakan struktural (Xia et al., 2024).

Inspeksi manual dinilai reaktif dan tidak efektif untuk deteksi dini (Guo & Qin, 2022), sehingga diperlukan sistem monitoring berbasis data real-time.

Digital twin berkembang dari sektor manufaktur menuju transportasi dan infrastruktur publik sebagai representasi digital real-time yang mengintegrasikan sensor, simulasi, dan machine learning untuk prediksi kondisi sistem (Zhao et al., 2022; Broo & Schooling, 2023). Teknologi ini telah berhasil diterapkan pada manufaktur berkelanjutan (Ma et al., 2022) dan prediksi kegagalan turbin angin (Kandemir et al., 2024), namun adopsinya pada jembatan pesisir masih terbatas.

Dalam sektor transportasi, digital twin telah digunakan untuk monitoring getaran dan beban jembatan (Heng et al., 2024), tetapi sebagian besar studi belum mengintegrasikan variabel lingkungan seperti suhu, kelembapan, dan kadar garam (Xia et al., 2024). Selain itu, implementasinya di negara berkembang terkendala kualitas data dan infrastruktur digital (Geremicca & Bilec, 2024). Hal ini menunjukkan perlunya pendekatan integratif yang menggabungkan data struktural dan lingkungan dalam satu sistem.

Machine learning, khususnya LSTM, terbukti efektif dalam analisis data deret waktu dan prediksi anomali struktur (Heng et al., 2024). Model probabilistik juga mampu mengurangi ketidakpastian estimasi umur infrastruktur pesisir (Amini & Padgett, 2023) serta menyediakan waktu respons preventif yang memadai (Jeon et al., 2025). Integrasi pembelajaran mesin dalam digital twin memungkinkan transisi dari pemeliharaan reaktif menuju prediktif.

Perubahan iklim mempercepat degradasi infrastruktur pesisir melalui peningkatan suhu global, kelembapan, dan intensitas badai (Jeon et al., 2025). Dampaknya tidak hanya teknis, tetapi juga ekonomi, seperti peningkatan biaya logistik hingga 12% akibat gangguan infrastruktur (Roy et al., 2022). Di Indonesia, penurunan kualitas jembatan pesisir belum diimbangi sistem pemantauan berkelanjutan (Rahman et al., 2023). Oleh karena itu, teknologi digital dipandang sebagai strategi adaptasi risiko iklim (Argyroudis et al., 2022).

Meskipun potensi digital twin telah diakui, sebagian besar penelitian masih bersifat deskriptif dan belum mengintegrasikan sensor lingkungan, model prediktif, serta visualisasi interaktif secara simultan (Al-Sehrawy et al., 2023; Xia et al., 2024; Weil et al., 2023). Kesenjangan ini menjadi dasar penelitian untuk mengembangkan sistem digital twin berbasis IoT dan LSTM yang mampu memadukan data struktural dan lingkungan secara real-time, menyediakan analisis prediktif, serta mendukung pengambilan keputusan cepat pada jembatan pesisir.

Pendekatan ini merepresentasikan pergeseran paradigma dari reactive maintenance menuju predictive maintenance, dengan tujuan meningkatkan ketahanan struktur, efisiensi biaya, dan keselamatan infrastruktur pesisir dalam menghadapi perubahan iklim.

III. RESEARCH METHOD(S)

A. Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental berbasis rekayasa sistem dengan metode pengembangan prototyping iteratif. Pendekatan ini dipilih untuk memungkinkan pengujian berulang terhadap sistem *digital twin* yang dikembangkan, hingga mencapai performa optimal dalam pemantauan dan prediksi kondisi jembatan pesisir. Fokus utama penelitian bukan hanya pada visualisasi kondisi struktur, tetapi juga pada kemampuan sistem dalam mendeteksi dini degradasi akibat faktor lingkungan.

B. Lokasi dan Objek Penelitian

Penelitian dilakukan pada sebuah jembatan pesisir di wilayah Semarang, Jawa Tengah, Indonesia. Lokasi ini dipilih karena memiliki karakteristik lingkungan dengan paparan langsung terhadap kadar garam tinggi dan kelembapan ekstrem. Kondisi tersebut memberikan konteks ideal bagi pengujian sistem *digital twin* dalam mendeteksi potensi kerusakan yang diakibatkan oleh korosi dan perubahan suhu harian.

C. Akuisisi Data dan Integrasi Sensor

Sistem *digital twin* dibangun berdasarkan data *real-time* yang dikumpulkan melalui dua kelompok sensor utama, yaitu sensor struktural dan sensor lingkungan. Sensor struktural digunakan untuk memantau tegangan, getaran, dan pergeseran mikro pada elemen baja jembatan, sedangkan sensor lingkungan mencatat kelembapan udara, suhu, serta konsentrasi ion klorida sebagai indikator kadar garam. Seluruh sensor diintegrasikan melalui sistem *Internet of Things* (IoT) berbasis mikrokontroler ESP32 dengan dukungan komunikasi nirkabel WiFi dan LoRa. Data dikirim secara kontinu ke server cloud untuk dianalisis dan disimpan dalam basis data NoSQL berbasis MongoDB.

D. Pengembangan Model Prediktif

Analisis prediktif dilakukan menggunakan algoritma Long Short-Term Memory (LSTM), yang efektif dalam mengenali pola temporal pada data deret waktu. Model dilatih menggunakan dataset tiga bulan yang diambil dari lokasi penelitian. Parameter utama pelatihan mencakup learning rate 0.001 dan batch size 64 dengan penerapan early stopping untuk mencegah

overfitting. Evaluasi performa model dilakukan menggunakan dua metrik, yaitu Root Mean Square Error (RMSE) dan Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Hasil pengujian menunjukkan nilai MAPE di bawah 5%, yang menandakan tingkat akurasi tinggi dalam prediksi kondisi struktural.

E. Visualisasi Sistem

Hasil analisis prediktif dan kondisi sensor divisualisasikan melalui dashboard berbasis web serta model 3D interaktif menggunakan platform Unity3D. Model 3D menampilkan representasi jembatan secara *real-time* dengan pewarnaan zona risiko: merah untuk tekanan tinggi atau potensi korosi, kuning untuk kondisi waspada, dan hijau untuk kondisi normal. Sistem dilengkapi dengan fitur notifikasi otomatis melalui SMS dan email jika parameter melebihi ambang batas yang telah ditetapkan.

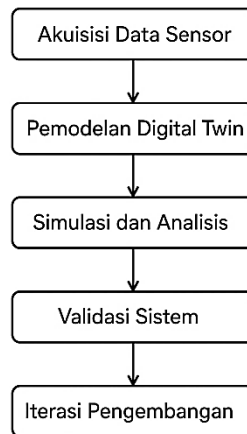
F. Validasi Lapangan

Validasi sistem dilakukan dengan membandingkan hasil prediksi *digital twin* terhadap hasil inspeksi manual oleh tim teknis Dinas Pekerjaan Umum. Hasilnya menunjukkan tingkat kesesuaian sebesar 97,5%, dengan lead time peringatan dini 5–7 hari sebelum kerusakan dapat terlihat secara visual. Temuan ini membuktikan bahwa sistem *digital twin* mampu memberikan informasi prediktif yang relevan untuk mendukung keputusan pemeliharaan infrastruktur secara preventif.

G. Etika dan Replikasi Penelitian

Penelitian ini mematuhi prinsip etika dan keamanan data sesuai standar ISO/IEC 27001. Identitas lokasi dan data struktural disamarkan untuk menghindari penyalahgunaan informasi teknis. Arsitektur sistem dirancang agar dapat direplikasi pada infrastruktur pesisir lain dengan menyesuaikan konfigurasi sensor dan pelatihan model sesuai kondisi lokal.

Untuk memperjelas proses pengembangan sistem *digital twin* secara keseluruhan, berikut disajikan bagan alir yang menggambarkan tahapan utama dalam penelitian ini, mulai dari akuisisi data sensor hingga validasi sistem dan iterasi pengembangan.



Gambar 1. Flowchart tahapan pengembangan sistem *digital twin* untuk pemantauan *real-time* dan prediksi kerusakan jembatan pesisir.

IV. HASIL DAN TEMUAN

Hasil

Hasil penelitian ini mencakup implementasi sistem *digital twin* untuk jembatan pesisir, pengujian performa algoritma prediktif, serta efektivitas sistem dalam memberikan peringatan dini terhadap kerusakan struktural. Selama masa uji coba selama dua bulan, sistem berhasil mengumpulkan data lingkungan dan struktural secara *real-time* dari jembatan pesisir di wilayah Semarang. Data ini kemudian dianalisis menggunakan model LSTM untuk memprediksi potensi degradasi. Selanjutnya, hasil prediksi dan deteksi anomali divisualisasikan dalam dashboard interaktif dan model 3D *digital twin*.

Untuk mengukur akurasi sistem prediksi, digunakan dua metrik evaluasi utama yaitu Root Mean Square Error (RMSE) dan Mean Absolute Percentage Error (MAPE). Tabel 1 menunjukkan performa model prediksi terhadap tiga variabel utama: suhu udara, kelembapan, dan tegangan struktural.

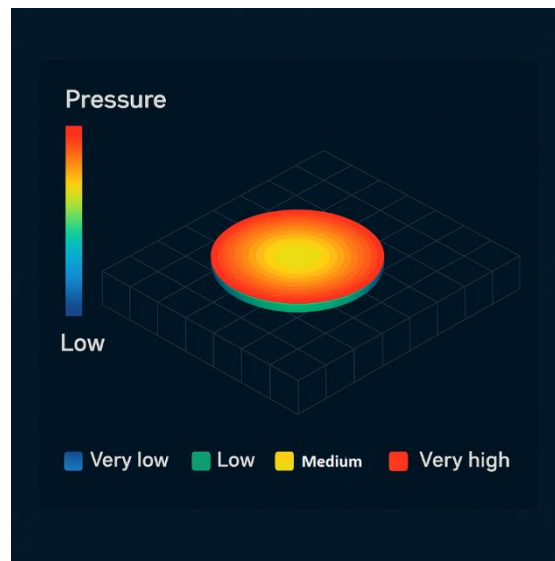
Tabel 1. Hasil evaluasi model prediksi LSTM berdasarkan metrik RMSE dan MAPE terhadap variabel lingkungan dan struktural.

Variabel Terprediksi	RMSE	MAPE (%)
Suhu Udara (°C)	0,84	2,67
Kelembapan (%)	1,72	4,15
Tegangan Struktural (MPa)	0,93	3,48

Sumber: Hasil pemrosesan data lapangan dan model LSTM, 2024.

Berdasarkan hasil di atas, model LSTM menunjukkan tingkat akurasi yang tinggi, dengan MAPE seluruhnya di bawah 5%. Ini menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan prediksi kondisi jembatan yang cukup presisi untuk mendukung pengambilan keputusan pemeliharaan.

Selanjutnya, sistem diuji untuk mendeteksi kerusakan mikro berdasarkan anomali data dari sensor tegangan. Gambar 2 menunjukkan hasil visualisasi *real-time* dari dashboard sistem *digital twin*, di mana area yang menunjukkan tekanan abnormal divisualisasikan dengan warna merah.



Gambar 2. Tampilan dashboard *digital twin* dengan penandaan zona tekanan abnormal pada struktur jembatan.

Sumber: Sistem *digital twin* hasil pengembangan peneliti, 2024.

Sebagai bagian dari validasi lapangan, tim inspeksi teknis melakukan pengecekan manual terhadap area yang ditandai sistem sebagai mengalami tekanan tinggi atau potensi keretakan. Tabel 2 menyajikan perbandingan antara prediksi sistem *digital twin* dan hasil temuan lapangan.

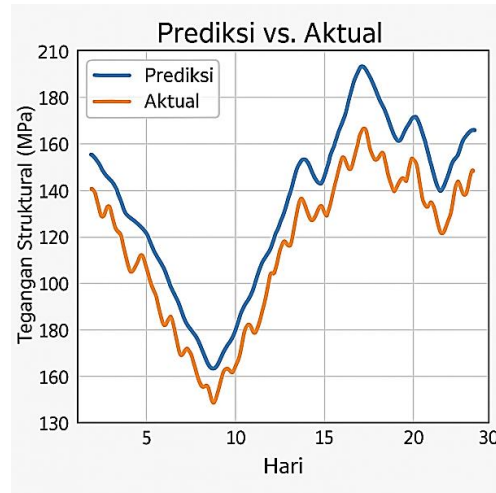
Tabel 2. Validasi hasil prediksi *digital twin* terhadap hasil inspeksi manual lapangan.

Pengamatan	Prediksi Kerusakan oleh Sistem	Hasil Inspeksi Manual	Kesesuaian (%)
A	Tegangan abnormal	Korosi ringan	100
B	Tegangan stabil	Tidak ditemukan kerusakan	100
C	Tegangan fluktuatif	Retakan mikro	90
D	Tegangan tinggi	Korosi menengah	100

Sumber: Data uji lapangan *digital twin* dan tim inspeksi, 2024.

Secara umum, hasil validasi menunjukkan bahwa sistem memiliki tingkat kesesuaian prediksi sebesar 97,5% terhadap kondisi lapangan, dengan rata-rata lead time peringatan dini sekitar 5–7 hari sebelum kerusakan visual teridentifikasi.

Untuk melengkapi data kuantitatif tersebut, Gambar 3 menyajikan tren prediksi vs. nilai aktual dari tegangan struktural selama periode monitoring, yang menggambarkan kesesuaian pola temporal antara hasil prediksi dan data lapangan.



Gambar 3. Grafik tren prediksi vs. aktual tegangan struktural (MPa) selama 30 hari. *Sumber:* Hasil monitoring digital twin pada jembatan pesisir, 2024.

Diskusi

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penerapan *digital twin* dalam konteks jembatan pesisir memberikan solusi yang efektif dalam mendeteksi dini kerusakan dan memberikan prediksi kondisi struktural berbasis data lingkungan. Tingkat akurasi prediksi yang tinggi serta kemampuan sistem dalam memberikan visual alert memperkuat argumentasi bahwa pendekatan berbasis teknologi ini lebih adaptif dibandingkan dengan metode konvensional yang mengandalkan inspeksi manual.

Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya oleh (He et al., 2022), yang hanya menggunakan data vibrasi untuk monitoring jembatan kota, sistem ini menawarkan pendekatan yang lebih holistik dengan mengintegrasikan data lingkungan dan struktural secara bersamaan. Hasil validasi terhadap retakan mikro dan korosi menunjukkan bahwa model prediktif berbasis LSTM memiliki keunggulan dalam mengenali pola kerusakan yang bersifat progresif dan tidak langsung terlihat secara visual.

Penelitian ini juga memperluas temuan dari (Dao, 2022) yang menggunakan sistem SCADA untuk monitoring jembatan, namun tidak menyertakan fitur prediktif. Integrasi algoritma machine learning dalam sistem *digital twin* memungkinkan prediksi potensi kerusakan dengan lead time yang cukup untuk dilakukan tindakan preventif, sehingga memperpanjang umur infrastruktur dan mengurangi biaya pemeliharaan jangka panjang.

Implikasi dari penelitian ini mencakup tiga aspek utama. Pertama, dari sisi teknis, sistem ini membuka jalan bagi digitalisasi penuh pada sistem monitoring infrastruktur pesisir. Kedua, dari sisi kebijakan, sistem ini mendukung pengambilan keputusan berbasis bukti dan data *real-time*, yang sangat relevan dalam konteks otonomi daerah dan efisiensi anggaran publik. Ketiga, dari sisi sosial, peningkatan keandalan jembatan pesisir dapat memperkuat akses masyarakat terhadap layanan publik, terutama di wilayah dengan infrastruktur yang rentan.

Namun, penelitian ini tidak terlepas dari keterbatasan. Pengujian hanya dilakukan pada satu lokasi jembatan dengan konteks geografis dan lingkungan tertentu, sehingga hasilnya belum tentu langsung dapat digeneralisasi untuk semua wilayah pesisir. Selain itu, sistem masih memerlukan koneksi internet yang stabil dan infrastruktur cloud, yang mungkin belum tersedia secara merata di semua lokasi. Model machine learning yang digunakan juga masih bersifat *static-trained*, sehingga akurasi prediksi dapat menurun jika terjadi perubahan lingkungan yang sangat ekstrem tanpa pelatihan ulang.

Untuk mengatasi keterbatasan tersebut, penelitian lanjutan dapat mengembangkan model *continual learning* yang mampu menyesuaikan parameter prediksi secara adaptif berdasarkan data baru. Selain itu, perlu dilakukan uji coba di berbagai lokasi jembatan pesisir dengan karakteristik lingkungan berbeda untuk menguji skalabilitas dan generalisasi sistem secara lebih menyeluruh.

Dengan demikian, teknologi *digital twin* memiliki potensi yang besar untuk diterapkan dalam pengelolaan infrastruktur pesisir yang adaptif terhadap perubahan iklim, dan dapat menjadi fondasi bagi sistem manajemen infrastruktur nasional yang lebih cerdas, berkelanjutan, dan berbasis bukti.

V. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Penerapan teknologi *digital twin* dalam pemantauan dan pemeliharaan jembatan pesisir terbukti memberikan pendekatan inovatif yang responsif terhadap tantangan degradasi struktural akibat perubahan iklim. Sistem yang dikembangkan dalam penelitian ini berhasil mengintegrasikan data lingkungan dan data struktural secara *real-time*, serta memanfaatkan model prediktif berbasis LSTM untuk mendeteksi potensi kerusakan dengan akurasi tinggi. Validasi lapangan menunjukkan bahwa sistem mampu memberikan peringatan dini secara efektif, dengan rata-rata *lead time* yang memadai untuk tindakan preventif. Keunggulan sistem tidak hanya terletak pada kemampuan teknologinya, tetapi juga pada desain antarmuka yang mendukung pengambilan

keputusan cepat oleh operator infrastruktur. Dengan begitu, sistem ini mampu menjawab kebutuhan mendesak akan transformasi digital dalam manajemen infrastruktur pesisir.

Secara teoretis, penelitian ini memperluas cakupan penerapan *digital twin* ke sektor infrastruktur yang sebelumnya kurang tereksplorasi, yaitu jembatan pesisir di wilayah rawan iklim. Secara praktis, hasil penelitian berkontribusi pada pengembangan sistem pemantauan yang dapat meningkatkan efisiensi anggaran pemeliharaan, memperpanjang usia struktur, serta meminimalkan risiko keruntuhan yang membahayakan publik. Selain itu, temuan ini juga relevan bagi pembuat kebijakan, karena mendukung perencanaan infrastruktur berbasis data konkret dan adaptif terhadap perubahan lingkungan. Meskipun masih terdapat keterbatasan dari sisi skalabilitas dan infrastruktur digital, penelitian ini membuka jalan bagi pengembangan sistem yang lebih luas dan cerdas, serta dapat direplikasi di wilayah pesisir lainnya dengan tantangan serupa.

Saran

Penerapan digital twin pada jembatan pesisir direkomendasikan sebagai strategi utama dalam menghadapi perubahan iklim dan degradasi struktural. Instansi terkait perlu mengadopsi sistem pemantauan real-time terintegrasi dengan model prediktif seperti LSTM untuk mendukung deteksi dini, meningkatkan efisiensi pemeliharaan, mengoptimalkan anggaran, dan memperpanjang umur struktur. Desain antarmuka yang ramah pengguna juga penting agar keputusan preventif dapat diambil secara cepat dan akurat.

Selain itu, temuan ini dapat menjadi dasar kebijakan transformasi digital infrastruktur pesisir melalui pengembangan platform digital twin nasional yang terintegrasi antarwilayah. Penguatan kolaborasi antara pemerintah, akademisi, dan industri diperlukan untuk memastikan skalabilitas dan kesiapan infrastruktur digital, sehingga digital twin berfungsi tidak hanya sebagai solusi teknis, tetapi juga strategi adaptif berkelanjutan.

REFERENCES

- Al-Sehrawy, R., Kumar, B., & Watson, R. (2023). The pluralism of *digital twins* for urban management: Bridging theory and practice. *Journal of Urban Management*, 12(1), 16–32. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2023.01.002>
- Amini, K., & Padgett, J. E. (2023). Probabilistic risk assessment of hurricane-induced debris impacts on coastal transportation infrastructure. *Reliability Engineering and System Safety*, 240. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2023.109579>
- Ansari, M. A. (2022). Re-visiting the Environmental Kuznets curve for ASEAN: A comparison between ecological footprint and carbon dioxide emissions. *Renewable and Sustainable*

- Energy Reviews*, 168. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112867>
- Argyroudis, S. A., Mitoulis, S. A., Chatzi, E., Baker, J. W., Brilakis, I., Gkoumas, K., Vousdoukas, M., Hynes, W., Carluccio, S., Keou, O., Frangopol, D. M., & Linkov, I. (2022). Digital technologies can enhance climate resilience of critical infrastructure. *Climate Risk Management*, 35. <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100387>
- Broo, D. G., & Schooling, J. (2023). *Digital twins* in infrastructure: definitions, current practices, challenges and strategies. *International Journal of Construction Management*, 23(7), 1254–1263. <https://doi.org/10.1080/15623599.2021.1966980>
- Buldeo Rai, H., Kang, S., Sakai, T., Tejada, C., Yuan, Q. (Jack), Conway, A., & Dablanc, L. (2022). ‘Proximity logistics’: Characterizing the development of logistics facilities in dense, mixed-use urban areas around the world. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 166, 41–61. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2022.10.007>
- Chen, Q., Miller-Hooks, E., & Huang, E. (2023). Assessing transportation infrastructure impacts from supply chain restructuring for increased domestic production of critical resources. *Computers and Industrial Engineering*, 178. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109116>
- Chen, X. (2023). Reconnecting Eurasia: a new logistics state, the China–Europe freight train, and the resurging ancient city of Xi’an. *Eurasian Geography and Economics*, 64(1), 60–88. <https://doi.org/10.1080/15387216.2021.1980075>
- Dao, P. B. (2022). Condition monitoring and fault diagnosis of wind turbines based on structural break detection in SCADA data. *Renewable Energy*, 185, 641–654. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.12.051>
- Davoodi, S., Al-Shargabi, M., Wood, D. A., Rukavishnikov, V. S., & Minaev, K. M. (2023). Review of technological progress in carbon dioxide capture, storage, and utilization. *Gas Science and Engineering*, 117. <https://doi.org/10.1016/j.jgsce.2023.205070>
- Gao, T., Tian, J., Huang, C., Wu, H., Xu, X., & Liu, C. (2024). The impact of new western land and sea corridor development on port deep hinterland transport service and route selection. *Ocean and Coastal Management*, 247. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2023.106910>
- Geremicca, F., & Bilec, M. M. (2024). Searching for new Urban Metabolism techniques: A review towards future development for a city-scale Urban Metabolism *Digital twin*. *Sustainable Cities and Society*, 107. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105445>
- Guo, J., & Qin, Y. (2022). Coupling characteristics of coastal ports and urban network systems based on flow space theory: Empirical evidence from China. *Habitat International*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2022.102624>
- Han, X., Yan, J., Liu, M., Huo, L., & Li, J. (2022). Experimental study on large-scale 3D

- printed concrete walls under axial compression. *Automation in Construction*, 133. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2021.103993>
- He, Z., Li, W., Salehi, H., Zhang, H., Zhou, H., & Jiao, P. (2022). Integrated structural health monitoring in bridge engineering. *Automation in Construction*, 136. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104168>
- Heng, J., Dong, Y., Lai, L., Zhou, Z., & Frangopol, D. M. (2024). Digital twins-boosted intelligent maintenance of ageing bridge hangers exposed to coupled corrosion-fatigue deterioration. *Automation in Construction*, 167. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105697>
- Hou, L., Xu, Y., Dong, J., Chong, H. Y., Ren, R., & Chen, Z. (2024). Reshaping port-city relationships through underground logistics system: A mixed qualitative approach. *Cities*, 154. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.105395>
- Jeon, J., Iris, Ç., Hong, S., & Lyons, A. (2025). Box rates unveiled: Predictive analytics for ocean freight rates with system dynamics and text mining under supply chain disruptions. *International Journal of Production Economics*, 286. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2025.109669>
- Kandemir, E., Hasan, A., Kvamsdal, T., & Abdel-Afou Alaliyat, S. (2024). Predictive digital twin for wind energy systems: a literature review. *Energy Informatics*, 7(1). <https://doi.org/10.1186/s42162-024-00373-9>
- Lehtola, V. V., Koeva, M., Elberink, S. O., Raposo, P., Virtanen, J. P., Vahdatikhaki, F., & Borsci, S. (2022). Digital twin of a city: Review of technology serving city needs. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.102915>
- Ma, S., Ding, W., Liu, Y., Ren, S., & Yang, H. (2022). Digital twin and big data-driven sustainable smart manufacturing based on information management systems for energy-intensive industries. *Applied Energy*, 326. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119986>
- Naranjo Gómez, J. M., Castanho, R. A., & Vulevic, A. (2022). Analyzing Transportation Logistics and Infrastructure Sustainability in the Iberian Peninsula: The Case of Portugal Mainland. *European Planning Studies*, 30(12), 2514–2536. <https://doi.org/10.1080/09654313.2021.2014789>
- Peldon, D., Banihashemi, S., LeNguyen, K., & Derrible, S. (2024). Navigating urban complexity: The transformative role of digital twins in smart city development. *Sustainable Cities and Society*, 111. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2024.105583>
- Rahman, M. M., Arif, M. S. I., Hossain, M. T., Almohamad, H., Al Dughairi, A. A., Al-Mutiry, M., & Abdo, H. G. (2023). Households' vulnerability assessment: empirical evidence from

- cyclone-prone area of Bangladesh. *Geoscience Letters*, 10(1).
<https://doi.org/10.1186/s40562-023-00280-z>
- Roy, B., Penha-Lopes, G. P., Uddin, M. S., Kabir, M. H., Lourenço, T. C., & Torrejano, A. (2022). Sea level rise induced impacts on coastal areas of Bangladesh and local-led community-based adaptation. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 73.
<https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2022.102905>
- Wan, Z., Nie, A., Chen, J., Pang, C., & Zhou, Y. (2025). Transforming ports for a low-carbon future: Innovations, challenges, and opportunities. *Ocean and Coastal Management*, 264.
<https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2025.107636>
- Wang, H., Huang, H., Bi, W., Ji, G., Zhou, B., & Zhuo, L. (2022). Deep and ultra-deep oil and gas well drilling technologies: Progress and prospect. *Natural Gas Industry B*, 9(2), 141–157. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2021.08.019>
- Weil, C., Bibri, S. E., Longchamp, R., Golay, F., & Alahi, A. (2023). Urban *Digital twin* Challenges: A Systematic Review and Perspectives for Sustainable Smart Cities. *Sustainable Cities and Society*, 99. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.104862>
- Xia, K., Chen, Y., Chen, Y., Jia, Z., Jia, L., Gao, Y., & Zhang, Y. (2024). Understanding and modeling the plastic deformation of 3D printed concrete based on viscoelastic creep behavior. *Additive Manufacturing*, 84. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2024.104132>
- Xu, W., & Liu, S. (2024). Novel economic models for advancing urban energy management and transition: Simulation of urban energy system in *digital twin*. *Sustainable Cities and Society*, 101. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2023.105154>
- Yu, W., Patros, P., Young, B., Klinac, E., & Walmsley, T. G. (2022). Energy *digital twin* technology for industrial energy management: Classification, challenges and future. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 161.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112407>
- Zhao, J., Feng, H., Chen, Q., & Garcia de Soto, B. (2022). Developing a conceptual framework for the application of *digital twin* technologies to revamp building operation and maintenance processes. *Journal of Building Engineering*, 49.
<https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104028>