

## PENERAPAN DIGITAL TWIN PADA PENCEGAHAN DAN PENANGGULANGAN BENCANA ALAM

Muhammad Khalifah Pratama<sup>1)</sup>, Muhammad Naufal Setiawan<sup>2)</sup>

1) Program Studi Teknik Informatika, Institut Teknologi Indonesia

E-mail: [alif.pratama2003@gmail.com](mailto:alif.pratama2003@gmail.com)

### Abstrak

Digital Twin merupakan representasi digital dari sistem fisik yang berfungsi untuk memantau, menganalisis, dan memprediksi kondisi dunia nyata secara real-time. Teknologi ini menjadi salah satu inovasi penting dalam bidang mitigasi bencana, karena mampu mengintegrasikan data dari berbagai sensor dan model simulasi untuk memperkirakan potensi kejadian bencana serta mengoptimalkan proses penanggulangannya. Artikel ini membahas konsep dasar Digital Twin, penerapannya dalam pencegahan dan penanggulangan bencana alam, serta tantangan yang dihadapi dalam implementasinya. Melalui pendekatan Digital Twin yang terintegrasi dengan teknologi Internet of Things (IoT), kecerdasan buatan (AI), dan komputasi awan (cloud computing), diharapkan sistem mitigasi bencana dapat menjadi lebih adaptif, prediktif, dan efisien.

**Kata kunci:** Digital Twin, mitigasi bencana, IoT, simulasi, prediksi bencana.

### Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara dengan tingkat risiko bencana alam tertinggi di dunia, seperti gempa bumi, banjir, letusan gunung berapi, dan tanah longsor. Kondisi geografis dan geologis yang kompleks membuat upaya pencegahan dan penanggulangan bencana memerlukan pendekatan teknologi yang lebih canggih dan adaptif. Selama ini, sistem peringatan dini dan penanganan bencana masih menghadapi keterbatasan, baik dalam hal akurasi prediksi maupun kecepatan respons di lapangan.

Seiring berkembangnya teknologi, Digital Twin atau "kembar digital" adalah teknologi yang memungkinkan kita membuat replika virtual dari dunia nyata yang selalu terhubung dan terupdate secara real-time. Teknologi ini seperti memiliki model miniatur kota atau wilayah di komputer yang dapat berubah sesuai dengan kondisi sebenarnya di lapangan. Ketika hujan turun di Jakarta, model digital Jakarta juga akan menunjukkan hujan. Ketika terjadi gempa di Yogyakarta, model digital Yogyakarta akan langsung menampilkan dampaknya.

Perkembangan teknologi Internet of Things (IoT), kecerdasan buatan, dan komputasi awan telah membuat implementasi Digital Twin menjadi semakin mungkin dan terjangkau. Sensor-sensor yang tersebar di berbagai lokasi dapat mengirimkan data secara real-time, komputer dapat mengolah data tersebut dengan cepat, dan sistem kecerdasan buatan dapat memberikan prediksi dan rekomendasi tindakan yang tepat.

### Landasan Teori

Digital Twin adalah representasi virtual dari objek, sistem, atau proses fisik yang diperbarui secara terus-menerus melalui data sensor real-time. Teknologi ini menggabungkan tiga elemen penting. Pertama, ada model fisik yang merupakan representasi matematis dari wilayah yang diamati. Kedua, ada model virtual yang merupakan replika digital yang mencerminkan kondisi real-time. Ketiga, ada koneksi data yang memungkinkan aliran informasi dua arah antara dunia nyata dan dunia digital. Teknologi pendukung Digital Twin meliputi Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), analisis data besar, dan komputasi awan.

### Metodologi Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur dengan meninjau berbagai publikasi ilmiah yang berkaitan dengan penerapan teknologi Digital Twin pada bidang mitigasi bencana. Analisis

dilakukan terhadap konsep, implementasi, dan tantangan penerapan teknologi tersebut dalam konteks pencegahan serta penanggulangan bencana alam.

### **Penerapan Digital Twin pada Pencegahan Bencana**

#### **Minimalisir Risiko Sebelum Bencana**

Pencegahan bencana dimulai jauh sebelum bencana itu benar-benar terjadi. Digital Twin berperan sebagai sistem yang terus-menerus menganalisis kondisi wilayah dan mengidentifikasi area-area yang berisiko tinggi mengalami bencana.

Sebagai contoh, Digital Twin dapat menganalisis pola curah hujan, kondisi tanah, dan topografi untuk memprediksi area mana yang paling mungkin mengalami banjir atau tanah longsor. Berdasarkan analisis ini, pemerintah dapat memutuskan di mana harus membangun tanggul, saluran drainase, atau fasilitas pengendali banjir lainnya. Studi menunjukkan bahwa pendekatan ini dapat meningkatkan akurasi prediksi risiko hingga 50% dibandingkan metode konvensional [1].

Digital Twin juga membantu dalam perencanaan pembangunan yang anti bencana. Sebelum membangun perumahan, perkantoran, atau infrastruktur lainnya, sistem dapat melakukan simulasi untuk melihat bagaimana bangunan tersebut akan bertahan jika terjadi gempa, banjir, atau bencana lainnya. Ini memungkinkan arsitek dan insinyur untuk merancang bangunan yang lebih tahan bencana.

#### **Sistem Peringatan Dini**

Digital Twin memiliki sistem peringatan dini yang tidak hanya memberitahu bahwa akan terjadi hujan, tetapi juga dapat memprediksi di mana akan terjadi banjir, seberapa tinggi air akan naik, dan berapa lama banjir akan berlangsung. Sistem ini mengintegrasikan data dari berbagai sensor cuaca, sensor air, kamera CCTV, dan bahkan media sosial untuk memberikan gambaran yang lengkap tentang kondisi terkini. Ketika sistem mendeteksi potensi bencana, ia tidak hanya memberikan peringatan, tetapi juga memberikan visualisasi dampak yang mungkin terjadi [2][3].

Misalnya, ketika sistem memprediksi akan terjadi banjir di Jakarta, ia tidak hanya mengirimkan pesan "Waspada Banjir" kepada masyarakat, tetapi juga menampilkan peta yang menunjukkan jalan-jalan mana yang akan tergenang, seberapa tinggi genangan di setiap area, dan rute alternatif yang masih bisa dilalui.

### **Penerapan Digital Twin pada Penanggulangan Bencana**

#### **Koordinasi yang Terstruktur Saat Bencana**

Ketika bencana terjadi, salah satu tantangan terbesar adalah koordinasi antar berbagai pihak yang terlibat dalam respons darurat. Polisi, pemadam kebakaran, TNI, PMI, dan berbagai organisasi lainnya sering kali bekerja dengan informasi yang berbeda-beda.

Digital Twin mengatasi masalah ini dengan menyediakan informasi yang sama untuk semua pihak. Semua tim dapat melihat situasi yang sama secara real-time, termasuk lokasi korban, kondisi jalan, ketersediaan sumber daya, dan perkembangan situasi di lapangan. Studi kasus di Kocaeli, Turki menunjukkan bahwa penggunaan Digital Twin sebagai pusat informasi bersama berhasil meningkatkan kecepatan respons darurat sebesar 30% [4].

Sistem ini juga membantu dalam alokasi sumber daya. Misalnya, jika ada laporan korban terjebak di dua lokasi berbeda, sistem dapat menganalisis jarak, kondisi jalan, dan ketersediaan tim penyelamat untuk menentukan tim mana yang harus dikirim ke lokasi mana agar waktu penyelamatan menjadi minimal.

### Pencarian dan Penyelamatan Terarah

Digital Twin mengubah cara tim Search and Rescue (SAR) bekerja. Alih-alih mencari korban secara acak, tim dapat menggunakan informasi dari sistem untuk mengetahui lokasi-lokasi yang paling mungkin ada korban. Sistem dapat menganalisis pola kerusakan bangunan, data populasi, dan informasi lainnya untuk memprioritaskan area pencarian.

Sebagai contoh, setelah terjadi gempa, sistem dapat mengidentifikasi bangunan-bangunan yang mengalami kerusakan parah dan memiliki penghuni yang banyak. Tim SAR dapat fokus pada bangunan-bangunan tersebut terlebih dahulu, sehingga kemungkinan menyelamatkan korban menjadi lebih besar.

Digital Twin juga membantu dalam koordinasi operasi udara dan darat. Drone dan helikopter dapat diarahkan ke area yang paling membutuhkan, sementara tim darat dapat menggunakan rute berdasarkan kondisi jalan terkini.

### Pemulihan Tepat Sasaran

Digital Twin berperan penting dalam fase pemulihan. Sistem dapat melakukan penilaian kerusakan secara otomatis dengan membandingkan kondisi sebelum dan sesudah bencana. Ini jauh lebih cepat daripada survei manual yang biasanya memakan waktu berhari-hari atau berminggu-minggu.

Berdasarkan penilaian kerusakan ini, sistem dapat memberikan prioritas perbaikan. Infrastruktur kritis seperti rumah sakit, sekolah, dan jalan utama akan diprioritaskan untuk diperbaiki terlebih dahulu. Sistem juga dapat membantu dalam perencanaan rekonstruksi yang lebih baik dengan melakukan simulasi berbagai opsi desain untuk memastikan bangunan baru akan lebih tahan terhadap bencana [5].

### Teknologi Dibalik Digital Twin

#### Sensor dan Kamera Digital Twin

Digital Twin membutuhkan "mata dan telinga" untuk dapat melihat dan mendengar apa yang terjadi di dunia nyata. Mata Digital Twin adalah berbagai jenis sensor dan kamera yang tersebar di seluruh wilayah. Ada sensor cuaca yang mengukur curah hujan, kecepatan angin, dan suhu. Ada sensor air yang mengukur ketinggian air sungai dan kualitas air. Ada kamera CCTV yang memberikan gambaran visual kondisi jalan dan area publik.

Teknologi LiDAR dan fotogrametri digunakan untuk membuat model 3D yang sangat detail dari bangunan dan wilayah [6][5]. Drone dan satelit memberikan pandangan dari atas yang memungkinkan pemantauan area yang luas. Semua sensor ini bekerja 24 jam sehari, 7 hari seminggu, mengirimkan data secara terus-menerus ke pusat Digital Twin.

#### Komputer Digital Twin

Data dari semua sensor tersebut tidak akan berguna jika tidak ada yang dapat mengolahnya. Komputer Digital Twin adalah kombinasi dari komputer berkecepatan tinggi, sistem penyimpanan data yang besar, dan algoritma kecerdasan buatan.

Sistem menggunakan pendekatan hybrid yang menggabungkan model fisika dengan pembelajaran mesin. Model fisika digunakan untuk simulasi dasar berdasarkan hukum-hukum alam, sementara pembelajaran mesin digunakan untuk koreksi dan optimasi berdasarkan data historis. Kombinasi ini terbukti dapat mengurangi kesalahan prediksi hingga 50% [7].

Komputasi awan memungkinkan sistem untuk mengolah data dalam jumlah yang sangat besar dengan cepat, sementara teknologi edge computing memastikan bahwa beberapa pemrosesan dapat

dilakukan secara lokal untuk respons yang lebih cepat, terutama saat koneksi internet terganggu akibat bencana [5].

### **Integrasi dan Komunikasi**

Salah satu tantangan terbesar dalam implementasi Digital Twin adalah mengintegrasikan data dari berbagai sumber yang memiliki format berbeda-beda. Data dari sensor cuaca mungkin dalam format yang berbeda dengan data dari kamera CCTV atau data dari sistem informasi geografis (GIS).

Digital Twin menggunakan standar-standar internasional seperti Building Information Modeling (BIM) untuk data bangunan, dan CityGML untuk model kota 3D. Sistem juga menggunakan protokol komunikasi yang memungkinkan pertukaran data antar berbagai sistem.

### **Implementasi Digital Twin**

#### **Gempa Bumi**

Kota Kocaeli di Turki pernah mengalami gempa besar yang menimbulkan kerusakan parah. Pembelajaran dari bencana tersebut mendorong pengembangan sistem Digital Twin untuk manajemen gempa bumi. Sistem ini mengintegrasikan model 3D kota dengan data seismik real-time untuk memberikan gambaran situasi yang komprehensif kepada tim respons darurat.

Hasilnya sangat memuaskan. Ketika terjadi gempa susulan, tim respons dapat langsung melihat bangunan mana yang mengalami kerusakan tambahan, jalan mana yang masih bisa dilalui, dan area mana yang membutuhkan bantuan segera. Kecepatan respons meningkat 30%, koordinasi antar lembaga menjadi lebih baik, dan waktu pencarian korban berkurang [2].

#### **Kebakaran Hutan**

Kebakaran hutan adalah bencana yang sulit diprediksi dan dikendalikan karena penyebarannya dipengaruhi oleh banyak faktor seperti arah angin, kelembaban udara, jenis vegetasi, dan topografi. Digital Twin untuk manajemen kebakaran hutan menggabungkan semua faktor ini dalam satu sistem yang terintegrasi.

Sistem ini menggunakan data cuaca real-time, peta vegetasi dari satelit, dan model penyebaran api berbasis fisika untuk memprediksi arah dan kecepatan penyebaran kebakaran. Hasil uji coba menunjukkan bahwa sistem ini dapat mengurangi kesalahan prediksi penyebaran api hingga 50% dibandingkan metode konvensional [8].

Dengan prediksi yang lebih akurat, tim pemadam kebakaran dapat ditempatkan di posisi yang strategis untuk memblokir penyebaran api, dan masyarakat di area berisiko dapat dievakuasi lebih awal sebelum api mencapai permukiman. Kota-kota yang sudah implementasi Digital Twin yaitu California, Queensland dan New South Wales, Alberta, Andalusia dan Sichuan.

#### **Banjir Perkotaan**

Banjir perkotaan adalah masalah yang kompleks karena melibatkan banyak faktor seperti curah hujan, kapasitas drainase, kondisi sungai, dan aktivitas manusia. Digital Twin untuk manajemen banjir mengintegrasikan semua faktor ini untuk memberikan prediksi banjir yang akurat dan real-time.

Sistem ini menggunakan sensor curah hujan yang tersebar di seluruh kota, sensor ketinggian air di sungai dan kanal, serta kamera CCTV untuk memantau kondisi jalan. Ketika sistem memprediksi akan terjadi banjir, ia tidak hanya memberikan peringatan kepada masyarakat, tetapi juga memberikan informasi detail tentang area mana yang akan tergenang, seberapa tinggi genangan, dan berapa lama banjir akan berlangsung.

Implementasi sistem ini di beberapa kota seperti Singapura, Rotterdam, Shanghai, Tokyo dan beberapa kota lainnya telah menunjukkan hasil yang positif, termasuk pengurangan kerugian ekonomi akibat banjir, peningkatan kesiapsiagaan masyarakat, dan respons darurat yang lebih cepat.

### **Tantangan dan Hambatan Implementasi**

#### **Tantangan Teknis**

Meskipun Digital Twin menawarkan banyak manfaat, implementasinya tidaklah mudah. Salah satu tantangan terbesar adalah masalah interoperabilitas data. Beragam lembaga dan sistem yang terlibat dalam pengelolaan data bencana sering kali menggunakan format, standar, dan protokol yang berbeda, sehingga data tidak dapat langsung terintegrasi dalam satu platform. Kurangnya interoperabilitas ini menyebabkan proses sinkronisasi dan pembaruan data menjadi lambat serta menghambat akurasi model Digital Twin secara keseluruhan. Untuk mengatasi hal ini, diperlukan standarisasi format data, penggunaan antarmuka pemrograman aplikasi (API) yang terbuka, serta koordinasi lintas lembaga agar pertukaran data dapat berlangsung secara efektif dan aman.

Tantangan lain adalah kualitas dan ketersediaan data. Model Digital Twin memerlukan data yang akurat, lengkap, dan terkini untuk dapat berfungsi dengan baik. Namun, di banyak daerah, terutama daerah terpencil, ketersediaan data masih terbatas. Sensor-sensor yang diperlukan mungkin belum terpasang, atau jika sudah terpasang, kualitas datanya mungkin tidak konsisten [7][6].

Skalabilitas sistem juga menjadi tantangan. Membuat Digital Twin untuk satu gedung mungkin mudah, tetapi membuatnya untuk seluruh kota atau provinsi memerlukan komputasi yang sangat besar, storage data yang massive, dan jaringan komunikasi yang handal.

#### **Tantangan Non Teknis**

Selain tantangan teknis, ada juga tantangan non-teknis yang seringkali lebih sulit diatasi. Salah satunya adalah masalah governance dan privasi. Digital Twin memerlukan pengumpulan data yang sangat banyak, termasuk data tentang aktivitas masyarakat, kondisi bangunan, dan informasi lainnya yang mungkin bersifat sensitif [2].

Aspek ekonomi juga menjadi tantangan. Implementasi Digital Twin memerlukan investasi yang sangat besar, tidak hanya untuk pembelian teknologi, tetapi juga untuk pelatihan SDM, pemeliharaan sistem, dan operasional sehari-hari. Return on Investment (ROI) dari sistem ini seringkali sulit diukur dalam jangka pendek karena manfaatnya baru terasa ketika terjadi bencana.

### **Validasi dan Generalisasi**

Banyak penelitian tentang Digital Twin masih bersifat proof-of-concept atau studi kasus terbatas. Artinya, sistem yang berhasil di satu tempat belum tentu berhasil di tempat lain karena kondisi geografis, sosial, dan ekonomi yang berbeda [3][9]. Validasi model juga menjadi tantangan. Bagaimana memastikan bahwa simulasi dalam Digital Twin benar-benar mencerminkan kondisi di dunia nyata? Bagaimana menguji akurasi prediksi jika bencana yang diprediksi belum terjadi? Ini memerlukan metodologi validasi dan data historis yang cukup untuk kalibrasi model.

### **Kesimpulan**

Digital Twin merupakan teknologi yang memiliki potensi besar dalam mendukung sistem pencegahan dan penanggulangan bencana alam. Melalui integrasi antara data sensor, pemodelan digital, dan analisis berbasis kecerdasan buatan, Digital Twin mampu meningkatkan akurasi prediksi, mempercepat proses respons, serta membantu dalam perencanaan rekonstruksi pasca-bencana.

Meskipun tantangan implementasi masih cukup besar, terutama dari sisi infrastruktur, biaya, dan koordinasi antarinstansi, pengembangan dan penerapan Digital Twin di Indonesia memiliki peluang yang signifikan. Dengan dukungan kebijakan pemerintah serta kolaborasi antara akademisi

dan sektor teknologi, sistem ini dapat menjadi komponen utama dalam strategi nasional mitigasi bencana yang adaptif dan berkelanjutan.

**Daftar Pustaka**

- [1] Sharif, S., & Zeadally, S. (2025). Digital Twin-Enabled Unmanned Aerial Vehicles Network for Disaster Management. *IEEE Internet Computing*.  
<https://doi.org/10.1109/mic.2025.3588134>
- [2] Korkmaz, M., Zülfikar, A. C., & Demirkesen, S. (2024). Leveraging Digital Twins as a Common Operating Picture for Disaster Management: Case of Seismic Hazards. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 13(12), 430.  
<https://doi.org/10.3390/ijgi13120430>
- [3] Ghaffarian, S. (2025). Rethinking digital twin: Introducing digital risk twin for disaster risk management. *npj Natural Hazards*, 1, 135.  
<https://doi.org/10.1038/s44304-025-00135-x>
- [4] Dogan, Ö., Sahin, O., & Karaarslan, E. (2021). Digital Twin Based Disaster Management System Proposal: DT-DMS. <https://doi.org/10.48550/arxiv.2103.17245>
- [5] Cheng, R., & Hou, L. (2023). A Review of Digital Twin Applications in Civil and Infrastructure Emergency Management. *Buildings*, 13(5), 1143.  
<https://doi.org/10.3390/buildings13051143>
- [6] Ariyachandra, M., & Wedawatta, G. (2023). Digital Twin Smart Cities for Disaster Risk Management: A Review of Evolving Concepts. *Sustainability*, 15(15), 11910. <https://doi.org/10.3390/su151511910>
- [7] Yu, D., & He, Z. (2022). Digital twin-driven intelligence disaster prevention and mitigation for infrastructure: advances, challenges, and opportunities. *Natural Hazards*, 111(1), 1-31. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05190-x>
- [8] Dogan, Ö., Sahin, O., & Karaarslan, E. (2021). Digital Twin Based Disaster Management System Proposal: DT-DMS. *arXiv preprint arXiv:2103.17245*.
- [9] Elshoukry, H. (2024). Enhancing Disaster Management by leveraging Smart Cities Technologies.  
<https://doi.org/10.1109/mscc62288.2024.10697072>

- [10] Yun, S., Kwon, J. W., & Kim, W. T. (2022). A Novel Digital Twin Architecture with Similarity- Based Hybrid Modeling for Supporting Dependable Disaster Management Systems. *Sensors*, 22(13), 4774. <https://doi.org/10.3390/s22134774>
- [11] Sharif, S., & Zeadally, S. (2025). Digital Twin-Enabled Unmanned Aerial Vehicles Network for Disaster Management. *IEEE Internet Computing*.  
<https://doi.org/10.1109/mic.2025.3588134>
- [12] Riaz, K., McAfee, M., & Gharbia, S. S. (2023). Management of Climate Resilience: Exploring the Potential of Digital Twin Technology, 3D City Modelling, and Early Warning Systems. *Sensors*, 23(5), 2659. <https://doi.org/10.3390/s23052659>