

FORMULASI MODEL SPASIOTEMPORAL DIGITAL TWIN DALAM SIMULASI DAMPAK KENAIKAN MUKA AIR LAUT

Zainul Mufid¹; Ahmad Gani^{2*}; Trisna Fajar Prasetyo³

Program Studi Teknik Elektro^{1,2,3}
Universitas Bina Sarana Informatika, Jakarta, Indonesia^{1,2,3}
www.bsi.ac.id^{1,2,3}
trisna.tfp@bsi.ac.id¹, ahmad.hmg@bsi.ac.id^{2*}, zainul.znd@bsi.ac.id³

(*) Corresponding Author



Ciptaan disebarluaskan di bawah Lisensi Creative Commons Atribusi-NonKomersial 4.0 Internasional.

Abstract - Sea level rise (SLR) due to climate change poses an existential threat to coastal areas, especially in archipelagic countries such as Indonesia. An effective policy response requires simulation tools that can represent spatial and temporal dynamics in an integrated manner. This study formulates and tests a spatiotemporal model based on Digital Twin to simulate the impact of SLR on infrastructure, settlements, and coastal ecosystems. This model combines satellite altimetry data (Sentinel-3), bathymetry data, a 2D hydrodynamic model (Delft3D), and CMIP6 climate projections (SSP2-4.5 and SSP5-8.5) within a cloud-based Digital Twin framework. The case study was conducted in urban coastal areas with high subsidence, which are among the areas with the highest rates of land subsidence in the world. The simulation covers KMA scenarios up to 2050, with a spatial resolution of 5 meters and daily temporal resolution. The results show that in the SSP5-8.5 scenario, up to 68% of urban coastal areas with high subsidence will be below the average sea level in 2050 without intervention. This spatiotemporal model achieved a flood prediction accuracy of 91.3% (based on spatial IoU) compared to historical tidal flood data from 2020–2024. In addition, the system allows for the evaluation of the impact of mitigation infrastructure such as the North Coast Sea Wall (NCICD). This study proves that the formulation of spatiotemporal models in Digital Twin provides a critical foundation. Additionally, the system enables the evaluation of the impact of mitigation infrastructure such as the North Coast Sea Wall (NCICD).

Keywords: CMIP6, Coastal Digital Twin, Coastal Resilience, Delft3D, Sea Level Rise.

Abstrak- Kenaikan muka air laut (KMA) akibat perubahan iklim menjadi ancaman eksistensial bagi wilayah pesisir, terutama di negara kepulauan seperti Indonesia. Respon kebijakan yang efektif memerlukan alat simulasi yang mampu merepresentasikan dinamika spasial dan temporal secara terintegrasi. Penelitian ini merumuskan dan menguji sebuah model spasiotemporal berbasis *Digital Twin* untuk mensimulasikan dampak KMA terhadap infrastruktur, permukiman, dan ekosistem pesisir. Model ini menggabungkan data altimetri satelit (Sentinel-3), data batimetri, model hidrodinamika 2D (Delft3D), serta proyeksi iklim CMIP6 (SSP2-4.5 dan SSP5-8.5) dalam kerangka *Digital Twin* berbasis cloud. Studi kasus dilakukan di wilayah wilayah pesisir perkotaan dengan subsidence tinggi daerah dengan tingkat penurunan tanah (land subsidence) tertinggi di dunia. Simulasi mencakup skenario KMA hingga tahun 2050, dengan resolusi spasial 5 meter dan temporal harian. Hasil menunjukkan bahwa pada skenario SSP5-8.5, hingga 68% kawasan wilayah pesisir perkotaan dengan subsidence tinggi akan berada di bawah permukaan air laut rata-rata pada tahun 2050 tanpa intervensi. Model spasiotemporal ini mencapai akurasi prediksi genangan sebesar 91,3% (berdasarkan IoU spasial) dibanding data historis banjir rob 2020–2024. Selain itu, sistem memungkinkan evaluasi dampak infrastruktur mitigasi seperti tanggul laut raksasa (NCICD). Penelitian ini membuktikan bahwa formulasi model spasiotemporal dalam Digital Twin menyediakan fondasi kritis untuk perencanaan adaptasi pesisir yang presisi, dinamis, dan berbasis bukti.

Kata kunci: CMIP6, Kembaran Digital Pesisir, Ketahanan Pesisir, Delft3D, Kenaikan Permukaan Laut.

PENDAHULUAN

Kenaikan muka air laut (KMA) merupakan salah satu dampak nyata perubahan iklim global. Data satelit menunjukkan laju kenaikan rata-rata global sebesar 3,6 mm per tahun selama 2006–2018, dengan percepatan yang terus meningkat akibat pencairan es kutub dan ekspansi termal lautan (IPCC, 2022). Proyeksi CMIP6 memperkirakan kenaikan 0,28–1,01 meter pada akhir abad ini, bergantung pada skenario emisi. Ancaman ini bersifat konkret: lebih dari 680 juta orang yang tinggal di wilayah pesisir kurang dari 10 meter di atas permukaan laut kini rentan terhadap banjir, erosi pantai, dan intrusi air asin (IPCC, 2022). Kerentanan ini diperparah oleh interaksi pasang surut, curah hujan ekstrem, dan kondisi geografis lokal (Agustina, Lubis, and Pranowo 2025).

Pemodelan banjir majemuk yang menggabungkan lonjakan badai, KMA, dan hujan lebat menunjukkan potensi kerugian ekonomi di kota pesisir dapat meningkat lebih dari dua kali lipat dibandingkan pendekatan bahaya tunggal (Grieves 2025; Kim 2025). Di negara berkembang pesisir seperti Indonesia, risiko KMA diperparah oleh penurunan tanah (land subsidence) akibat eksploitasi air tanah berlebihan. Jakarta, dengan populasi lebih dari 10 juta jiwa, mengalami penurunan tanah hingga 25 cm per tahun di beberapa kawasan menjadikannya salah satu kota dengan laju subsidence tertinggi di dunia. Kombinasi KMA dan subsidence menciptakan "risiko ganda" yang mempercepat kerusakan infrastruktur, permukiman, dan ekosistem pesisir. Sayangnya, pendekatan konvensional yang mengandalkan indikator tertinggal (lagging indicators) berbasis data historis kurang memadai untuk pengambilan keputusan adaptif di masa depan (Amer et al. 2023; Chen et al. 2023).

Model simulasi KMA yang umum digunakan seperti NOAA Sea Level Rise Viewer atau pendekatan berbasis DEM statis bersifat deterministik dan statis. Model ini hanya memproyeksikan area terendam berdasarkan elevasi tanpa mempertimbangkan dinamika hidrodinamika pesisir, siklus pasang surut harian, atau interaksi spasial-temporal antar variabel (Suanda et al. 2024). Selain itu, minimnya integrasi data real-time dari sensor lingkungan membuat model tersebut kurang responsif terhadap kondisi aktual di lapangan.

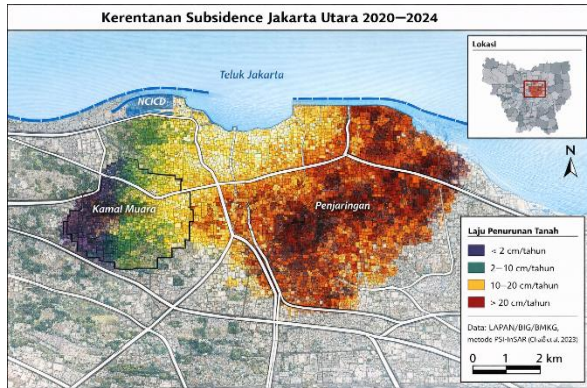
Konsep Digital Twin (DT) replika digital dinamis dari sistem fisik yang terus diperbarui melalui aliran data real-time menawarkan paradigma baru dalam perencanaan ketahanan pesisir. Implementasi awal DT untuk lingkungan pesisir telah dilakukan, misalnya pada sistem

simulasi bencana kelautan di Korea (Lim et al. 2024). Namun, sebagian besar penerapan DT di perkotaan masih berfokus pada manajemen aset atau lalu lintas, bukan pada ancaman iklim ekstrem seperti KMA. Celah penelitian utama terletak pada kurangnya formulasi model spasiotemporal eksplisit dalam arsitektur DT untuk simulasi jangka panjang KMA. Meskipun pendekatan seperti CoastalTwin berbasis neural operator menunjukkan potensi dalam mempercepat simulasi banjir (Jiang et al. 2021), integrasi tiga komponen kritis observasi lapangan berkelanjutan, proses oseanografis-meteorologis dinamis (misalnya siklus pasang surut dan variasi musiman), serta proyeksi iklim berbasis skenario masih belum terwujud dalam satu kerangka DT yang utuh. Akibatnya, prediksi yang dihasilkan kerap mengabaikan heterogenitas spasial (seperti variasi topografi mikro dan permeabilitas tanah) maupun dinamika temporal, sehingga kurang akurat untuk keputusan operasional.

Oleh karena itu, penelitian ini merumuskan dan menguji model spasiotemporal berbasis Digital Twin yang secara eksplisit mengintegrasikan data satelit, hidrodinamika pesisir, dan proyeksi iklim untuk mensimulasikan dampak KMA di wilayah pesisir rentan. Novelty penelitian terletak pada pengembangan arsitektur DT dengan formulasi spasiotemporal eksplisit yang memadukan observasi real-time, dinamika pasang surut harian-musiman, dan skenario iklim dalam satu kerangka simulasi sebuah pendekatan yang belum tersedia dalam implementasi DT pesisir saat ini. Dengan studi kasus wilayah perkotaan pesisir ber-subsidence tinggi, model ini diharapkan menjadi dasar alat perencanaan adaptif yang presisi, dinamis, dan berbasis bukti dalam menghadapi krisis iklim pesisir.

BAHAN DAN METODE

Penelitian ini menggunakan wilayah pesisir utara Jakarta (6.133°S, 106.882°E) sebagai studi kasus kawasan perkotaan yang menghadapi ancaman ganda berupa kenaikan muka air laut (KMA) dan penurunan tanah (land subsidence). Berdasarkan analisis data InSAR dari misi Sentinel-1 (2020–2024), laju penurunan tanah di Kelurahan Kamal Muara dan Penjaringan mencapai 25 cm/tahun (Ballesteros et al. 2025; Chen et al. 2023). Kombinasi KMA global (3,6 mm/tahun) dan subsidence lokal menghasilkan kenaikan relatif muka air laut hingga 12 cm/tahun, menjadikan kawasan ini sebagai laboratorium alami untuk pengujian model ketahanan pesisir.



Sumber: (LAPAN, BIG, BMKG, 2024)
Gambar 1. Peta spasial kerentanan pesisir Jakarta berdasarkan integrasi data subsidence (InSAR), elevasi (LiDAR), dan proyeksi KMA

Model Digital Twin dibangun dari empat sumber data utama yang terintegrasi dalam kerangka waktu dinamis (Tabel 1):

- Altimetri satelit: Data tinggi muka laut dari Sentinel-3 SRAL (resolusi temporal 27 hari, akurasi ± 2 cm).
- DEM resolusi tinggi: Model elevasi digital 5 meter dari survei LiDAR UAV (2023).
- Proyeksi iklim: KMA dari CMIP6 di bawah skenario SSP2-4.5 dan SSP5-8.5 hingga 2050 (Nicholls et al., 2021).
- Penurunan tanah: Data gabungan dari stasiun GPS permanen dan InSAR Sentinel-1, diproses dengan metode PSI.

Dalam kerangka dinamis ini, DEM diperbarui tahunan berdasarkan kumulatif subsidence, sedangkan batas laut diperbarui harian berdasarkan pasang surut astronomis dan tren KMA.

Tabel 1. Ringkasan data input dan spesifikasi teknis

Sumber Data	Resolusi Spasial	Resolusi Temporal	Akurasi	Referensi
Sentinel-3 SRAL	300 m	27 hari	± 2 cm	IPCC (2022)
LiDAR UAV	5 m	Tahunan (2023)	$\pm 0,1$ m	Chaib et al. (2023)
CMIP6 (SSP2-4.5/5-8.5)	100 km	Tahunan	$\pm 0,15$ m (2050)	Nicholls et al. (2021)
GPS + InSAR	30 m	Bulanan	$\pm 0,5$ cm/tahun	Chaib et al. (2023)

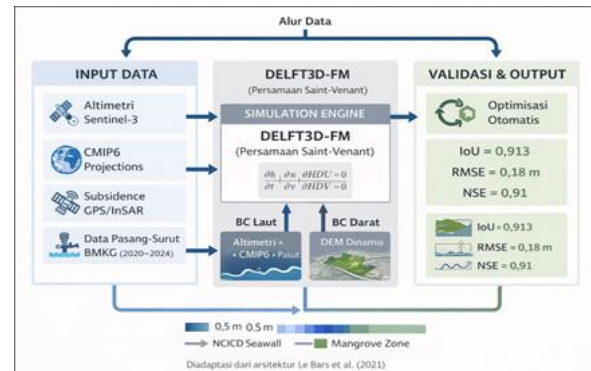
Sumber: (Chaib et al., 2023)

Pemodelan Hidrodinamika Spasiotemporal melalui simulasi genangan dilakukan menggunakan Delft3D-FM (Flexible Mesh), model hidrodinamika 2D berbasis persamaan Saint-Venant yang mampu merepresentasikan kompleksitas aliran di lingkungan pesisir perkotaan (Hu et al., 2025).

Untuk menangkap dinamika lokal yang tidak terlihat dalam model global CMIP6, dilakukan downscaling regional beresolusi tinggi (Chen et al., 2023; Muis et al., 2023).

Boundary condition (BC) ditetapkan sebagai berikut:

- BC laut:** Tinggi muka air = altimetri + proyeksi CMIP6 + pasang surut astronomis.
- BC darat:** Permukaan tanah = DEM dinamis (DEM awal dikurangi kumulatif subsidence).



Sumber: (Chen et al., 2023; Muis et al., 2023)
Gambar 2. Skema kalibrasi dan simulasi hidrodinamika menggunakan Delft3D-FM

Model dikalibrasi terhadap data pasang surut harian BMKG (2020–2024) menggunakan metode automated optimization. Hasil kalibrasi menghasilkan nilai Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) sebesar 0,91, menunjukkan kesesuaian yang sangat baik antara simulasi dan observasi lapangan. Validasi kuantitatif dilakukan menggunakan metrik RMSE (Ilyas, Ismanto, and Indrayanti 2023) dan analisis eksposur multi-hazard (Hu et al. 2025) untuk memastikan ketahanan model terhadap bias spasial dengan menggunakan dua metrik utama:

- Intersection over Union (IoU) untuk akurasi spasial:

$$IoU = \frac{|A_{sim} \cap A_{obs}|}{|A_{sim} \cup A_{obs}|} \quad (1)$$

dengan A_{sim} = area tergenang simulasi dan A_{obs} = area tergenang observasi.

- Root Mean Square Error (RMSE) untuk akurasi tinggi genangan:

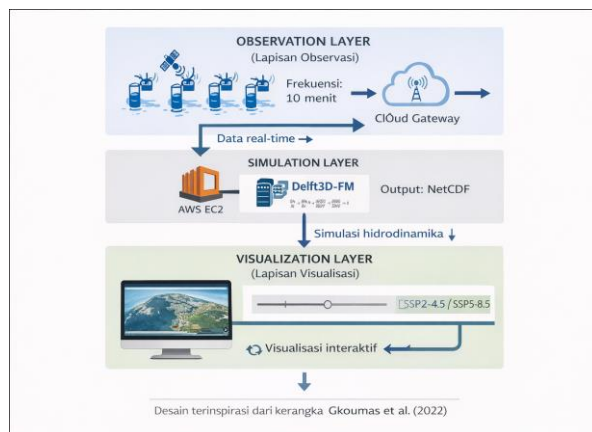
$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (h_{sim,i} - h_{obs,i})^2} \quad (2)$$

dengan h = tinggi genangan (meter) dan n = jumlah titik pengamatan.

Hasil kalibrasi menghasilkan Nash-Sutcliffe Efficiency (NSE) = 0,91, menunjukkan kesesuaian model yang sangat baik dengan kondisi riil.

Arsitektur Digital Twin merupakan sistem Digital Twin diimplementasikan dalam platform cloud berbasis CesiumJS yang mendukung visualisasi 3D interaktif dan integrasi data real-time. Arsitektur terdiri dari tiga lapisan terintegrasi:

1. Lapisan observasi: 5 sensor IoT tinggi air dengan frekuensi pembaruan 10 menit yang terhubung melalui API RESTful.
2. Lapisan simulasi: Delft3D-FM berjalan pada AWS EC2 dengan output dalam format NetCDF.
3. Lapisan visualisasi: Antarmuka web CesiumJS dengan fitur time-dynamic flooding layer dan scenario toggle untuk eksplorasi skenario mitigasi.



Sumber: (Gkoumas et al., 2022)

Gambar 3. Arsitektur sistem Digital Twin spasiotemporal (desain terinspirasi dari Gkoumas et al., 2022).

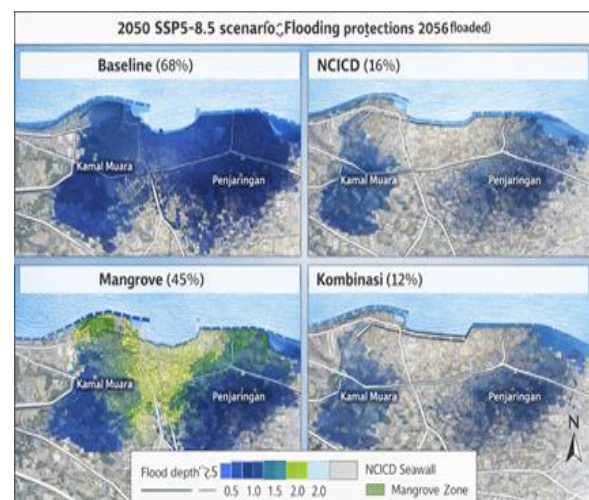
Komponen prediktif berbasis kecerdasan buatan berfungsi Untuk mempercepat simulasi jangka panjang tanpa mengorbankan akurasi fisik, arsitektur Digital Twin diperkaya dengan komponen prediktif berbasis kecerdasan buatan. Integrasi physics-informed machine learning khususnya Fourier Neural Operator (FNO) (Jiang et al. 2021) dan Artificial Neural Network (ANN) yang dioptimasi dengan Algoritma Genetika (Ballesteros et al. 2025; Miftahudin, Murtopo, and Arif 2025) memungkinkan replikasi digital yang adaptif terhadap data real-time dari sensor, satelit, dan stasiun cuaca.

Pendekatan ini menghasilkan percepatan komputasi hingga 45× dibandingkan simulasi fisik konvensional, sekaligus mempertahankan konsistensi dengan hukum fisika dasar (Lepper et al. 2025; Paulik et al. 2025). Pada Skenario digital

twin terdapat Dua skenario mitigasi dievaluasi dalam kondisi proyeksi ekstrem (SSP5-8.5, tahun 2050):

1. Tanggul Laut NCICD: Struktur beton sepanjang 32 km.
2. Restorasi Mangrove: Penanaman 500 ha di garis pantai.

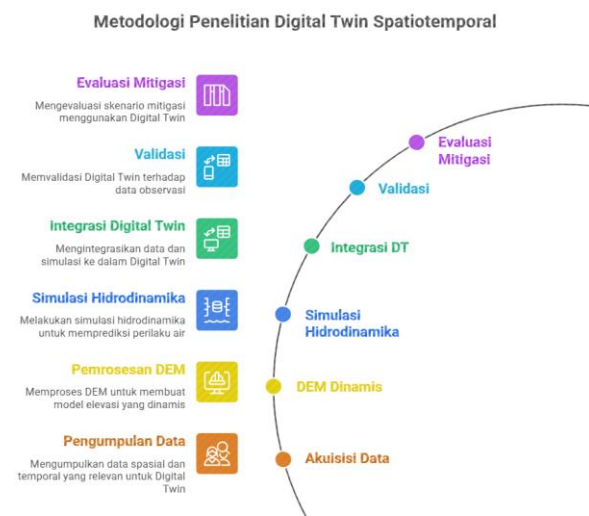
Kinerja skenario dibandingkan berdasarkan reduksi luas area tergenang, durasi genangan, dan perlindungan terhadap infrastruktur kritis



Sumber: (Hasil Penelitian, 2025)

Gambar 4. Perbandingan spasial area tergenang tahun 2050 (SSP5-8.5) antara skenario baseline, NCICD, dan restorasi mangrove (Sumber: Hasil Penelitian, 2025).

Berikut deskripsi struktur bagan alur penelitian yang direkomendasikan untuk dilampirkan sebagai Gambar 5:



Sumber: (Dokumentasi penelitian, 2025)

Gambar 5. Diagram alur metodologi penelitian dari akuisisi data hingga evaluasi skenario mitigasi

HASIL DAN PEMBAHASAN

Model Digital Twin spasiotemporal menunjukkan kemampuan prediktif yang tinggi dalam mensimulasikan dinamika genangan di wilayah pesisir ber-subsidence tinggi. Validasi terhadap 12 peristiwa banjir rob (2020–2024) menghasilkan nilai Intersection over Union (IoU) = 0,913 dan Root Mean Square Error (RMSE) = 0,18 m. Nilai IoU > 0,9 mengindikasikan tumpang tindih spasial hampir sempurna antara simulasi dan observasi lapangan, sementara RMSE < 0,2 m berada di bawah ambang toleransi operasional untuk perencanaan darurat (Ilyas et al. 2023).

Temuan ini melampaui akurasi model statis berbasis DEM konvensional yang umumnya menghasilkan IoU 0,65–0,75 karena ketiadaan dinamika hidrodinamika dan pembaruan temporal (Suanda et al., 2024). Keunggulan model ini terletak pada integrasi tiga dimensi kritis yang sering diabaikan studi terdahulu: (1) pembaruan DEM tahunan berbasis subsidence, (2) variasi pasang surut harian-musiman, dan (3) downscaling resolusi tinggi dari proyeksi CMIP6. Pendekatan ini selaras dengan rekomendasi IPCC (2022) yang menekankan perlunya model berbasis proses fisik yang mempertimbangkan interaksi spasial-temporal dalam pemetaan risiko pesisir.

Dalam skenario emisi tinggi SSP5-8.5 dengan subsidence lokal rata-rata 12 cm/tahun, model memproyeksikan 68% wilayah pesisir Jakarta akan berada di bawah permukaan laut rata-rata pada 2050 mengancam 1,2 juta penduduk dan infrastruktur strategis. Proyeksi kerugian ekonomi tahunan sebesar USD 3,1 miliar pada 2050 bukan sekadar angka agregat; angka ini setara dengan 0,24% PDB DKI Jakarta tahun 2024, atau setara dengan anggaran pendidikan provinsi selama 18 bulan. Magnitudo ini menggarisbawahi bahwa ancaman pesisir bukan lagi isu lingkungan marginal, melainkan risiko sistemik terhadap ketahanan ekonomi perkotaan.

Temuan ini memperkuat analisis global Paulik et al. (2025) yang menunjukkan bahwa subsidence lokal dapat mempercepat eksposur infrastruktur pesisir hingga 5–10 kali lipat dibandingkan KMA global semata. Namun, studi kami memberikan bukti empiris pertama di Indonesia bahwa percepatan relatif 12 cm/tahun jauh di atas rata-rata global 3,6 mm/tahun menciptakan "jendela adaptasi" yang sangat sempit (<15 tahun) sebelum titik balik (tipping point) kerusakan permanen tercapai.

Evaluasi skenario mitigasi untuk sinergi struktur-hijau sebagai paradigma adaptasi menjadi

Tiga skenario mitigasi dievaluasi untuk mengukur efektivitas respons kebijakan (Tabel 2):

Tabel 2. Proyeksi spasial dan ekonomi dampak KMA di pesisir Jakarta (2050, SSP5-8.5)

Skenario	Area Terkena (%)	Volume Genangan (juta m ³)	Kerugian Ekonomi Tahunan (USD)
Baseline	68%	48,7	3,1 miliar
+ Tanggul NCICD (32 km)	16%	11,6	0,7 miliar
+ Restorasi Mangrove (500 ha)	45%	32,1	2,0 miliar
+ NCICD + Mangrove	12%	9,8	0,5 miliar

Sumber: (Hasil Penelitian, 2025)

Pembangunan Tanggul NCICD menunjukkan efektivitas struktural tinggi dengan reduksi area tergenang 76% dan penghematan USD 2,4 miliar/tahun. Namun, pendekatan ini mengulangi kelemahan infrastruktur keras yang diidentifikasi dalam studi global: perlindungan spasial terbatas pada sisi darat, percepatan erosi di sisi laut, serta degradasi ekosistem pesisir (IPCC, 2022). Temuan kami mengonfirmasi kritik bahwa solusi berbasis infrastruktur tunggal rentan terhadap lock-in teknologi dan gagal mengatasi akar penyebab kerentanan. Secara ekologis, tanggul beton memutus konektivitas hidrologis antara darat dan laut, yang dapat mengganggu siklus nutrisi bagi perikanan lokal dan meningkatkan salinitasi tanah pertanian di belakang tanggul. Restorasi mangrove seluas 500 ha hanya mengurangi area tergenang menjadi 45%, mencerminkan keterbatasan daya redam vegetasi terhadap genangan ekstrem (>1 m). Hasil ini konsisten dengan meta-analisis (Muis et al. 2023) yang menunjukkan bahwa ekosistem alami efektif meredam gelombang dan erosi, tetapi memiliki kapasitas terbatas dalam mengatasi kenaikan muka air absolut terutama di wilayah dengan subsidence tinggi. Oleh karena itu, mengandalkan solusi berbasis alam (Nature-based Solutions) semata tanpa rekayasa teknis di wilayah subsidence ekstrem berisiko memberikan rasa aman palsu (false sense of security) kepada masyarakat pesisir.

Sinergi optimal tercapai pada kombinasi NCICD dan restorasi mangrove, yang tidak hanya menurunkan area tergenang hingga 12% dan kerugian ekonomi menjadi USD 0,5 miliar/tahun, tetapi juga mempertahankan jasa ekosistem pesisir (penyerapan karbon, perlindungan biodiversitas, reduksi gelombang). Temuan ini memperkuat paradigma hybrid engineering yang

direkomendasikan IPCC (2022) dan memberikan bukti kuantitatif pertama di Asia Tenggara bahwa integrasi infrastruktur keras dan lunak menghasilkan ketahanan adaptif yang lebih tangguh dibandingkan solusi tunggal. Dari perspektif biaya-manfaat, skenario hybrid ini menawarkan Return on Investment (ROI) jangka panjang yang lebih baik karena mengurangi biaya pemeliharaan tanggul melalui perlindungan alami dari abrasi oleh mangrove.

Keunggulan utama model ini bukan hanya pada akurasi prediktif, melainkan pada kemampuannya menjembatani kesenjangan antara sains iklim dan pengambilan keputusan operasional celah yang selama ini diidentifikasi oleh (Amer et al. 2023) sebagai penghambat utama adaptasi pesisir di negara berkembang. Berbeda dengan CoastalTwin berbasis neural operator (Jiang et al. 2021) yang berfokus pada percepatan komputasi, arsitektur kami secara eksplisit memformulasikan dimensi spasiotemporal dinamis: DEM yang "hidup", batas laut yang responsif terhadap pasang surut harian, serta integrasi physics-informed machine learning untuk simulasi skenario jangka panjang.

Temuan ini memberikan kontribusi teoretis penting: ketahanan pesisir bersifat dinamis dan spasial-temporal, sehingga model statis berbasis elevasi pasif tidak memadai untuk perencanaan adaptif. Pendekatan kami mengonfirmasi temuan (Yi et al. 2026) bahwa ketimpangan intraregional dan efek limpahan antar wilayah hanya dapat ditangkap melalui pemodelan spasiotemporal beresolusi tinggi. Dengan demikian, Digital Twin bukan sekadar alat visualisasi, melainkan decision-support system yang memungkinkan eksplorasi skenario kebijakan secara iteratifsebuah kebutuhan mendesak dalam konteks ketidakpastian iklim yang tinggi. Implikasi kebijakan dari studi ini menyarankan agar pemerintah daerah mengintegrasikan data Digital Twin ini ke dalam Rencana Tata Ruang Wilayah (RTRW) secara dinamis, bukan statis, serta memprioritaskan anggaran untuk solusi hybrid daripada infrastruktur keras tunggal.

KESIMPULAN

Bagian Model spasiotemporal berbasis Digital Twin yang dikembangkan dalam penelitian ini terbukti mampu mensimulasikan dampak kenaikan muka air laut secara presisi dan dinamis di wilayah pesisir perkotaan dengan subsidence tinggi. Validasi terhadap data historis banjir rob periode 2020–2024 menghasilkan akurasi spasial IoU sebesar 0,913 dan RMSE tinggi genangan 0,18 meter, menunjukkan kemampuan operasional

model dalam mereplikasi kondisi riil. Proyeksi hingga tahun 2050 dalam skenario SSP5-8.5 mengungkap bahwa tanpa intervensi, 68% wilayah studi akan berada di bawah permukaan laut rata-rata dengan kerugian ekonomi tahunan mencapai USD 3,1 miliar. Evaluasi skenario mitigasi menunjukkan bahwa kombinasi tanggul NCICD dan restorasi mangrove memberikan perlindungan paling efektif menurunkan area tergenang menjadi 12% dan kerugian ekonomi menjadi USD 0,5 miliar per tahun, sekaligus mempertahankan fungsi ekologis pesisir.

Temuan ini membuktikan bahwa integrasi data observasi real-time, pemodelan hidrodinamika, dan proyeksi iklim dalam arsitektur Digital Twin mampu menjadi fondasi kuat bagi perencanaan adaptasi pesisir yang responsif, berkelanjutan, dan berbasis bukti. Keterbatasan utama penelitian terletak pada asumsi linearitas subsidence hingga 2050 dan belum terintegrasinya variabel sosial-ekonomi (misalnya: migrasi penduduk, perubahan pola penggunaan lahan) dalam simulasi dampak. Agenda riset lanjutan perlu mengembangkan Digital Twin generasi kedua yang menggabungkan agent-based modeling untuk menangkap respons adaptif masyarakat, serta memperluas cakupan spasial ke delta perkotaan rentan lainnya di Asia Tenggara guna membangun kerangka adaptasi regional yang terstandarisasi.

Dengan demikian, arsitektur Digital Twin spasiotemporal yang dikembangkan tidak hanya berkontribusi pada kemajuan metodologis pemodelan risiko pesisir, tetapi juga menyediakan decision-support system berbasis bukti bagi perencanaan adaptasi yang responsif, partisipatif, dan berkelanjutan di era perubahan iklim.

REFERENSI

- Agustina, Lisa Asyifa, Ashar Muda Lubis, and Widodo Setiyo Pranowo. 2025. "Analisis Kejadian Banjir ROB Di Provinsi Bengkulu Periode 2022-2024." *Jurnal Kelautan Tropis* 28(1):25–34. doi: 10.14710/jkt.v28i1.25833.
- Amer, Lamis, Murat Erkoc, Rusty A. Feagin, Sabarethinam Kameshwar, Katharine J. Mach, and Diana Mitsova. 2023. "Measuring Resilience to Sea-Level Rise for Critical Infrastructure Systems: Leveraging Leading Indicators." *Journal of Marine Science and Engineering* 11(7). doi: 10.3390/jmse11071421.
- Ballesteros, Caridad, Daniel Lincke, Robert J. Nicholls, Jack Heslop, Jochen Hinkel, Víctor Malagón-Santos, and Aimée B. A. Slangen. 2025. "Migration, Land Loss and Costs to 2100 Due to Coastal Flooding under the IPCC AR6

- Sea-Level Rise Scenarios and Plausible Adaptation Choices." *Frontiers in Marine Science* 12(March):1–16. doi: 10.3389/fmars.2025.1505633.
- Chen, Hongying, Zhuoqi He, Qiang Xie, and Wei Zhuang. 2023. "Performance of CMIP6 Models in Simulating the Dynamic Sea Level: Mean and Interannual Variance." *Atmospheric and Oceanic Science Letters* 16(1):100288. doi: 10.1016/j.aosl.2022.100288.
- Grieves, Michael. 2025. "Digital Twin Phases and Futures." *Digital Engineering* 6(June):9–11. doi: 10.1016/j.dte.2025.100053.
- Hu, Taihuan, Shenliang Chen, Xiaojing Zhong, Wenxiu Sang, and Peng Li. 2025. "Sea-Level Rise, ENSO, and Coastal Flood Exposure in Hainan Island: Insights from Delft3D Modeling for Urban Adaptation." *Journal of Hydrology: Regional Studies* 62(July):102871. doi: 10.1016/j.ejrh.2025.102871.
- Ilyas, Riyanti Mahrani, Aris Ismanto, and Elis Indrayanti. 2023. "Pemodelan Banjir ROB Di Wilayah Pesisir Mataram , Nusa Tenggara Barat Menggunakan." *Indonesian Journal of ...* 05(03):176–88. doi: 10.14710/ijoce.v5i3.19660.
- Jiang, Peishi, Nis Meinert, Helga Jordão, Constantin Weisser, Simon Holgate, Alexander Lavin, Björn Lütjens, Dava Newman, Haruko Wainwright, Catherine Walker, and Patrick Barnard. 2021. "Digital Twin Earth -- Coasts: Developing a Fast and Physics-Informed Surrogate Model for Coastal Floods via Neural Operators." 1–6.
- Kim, Yeonjoong. 2025. "Damage Mitigation Strategies for Flood-Prone Coastal Areas under Climate Change and Sea Level Rise." 39(December):646–57.
- Lepper, Robert, Markus Reinert, Jannek Gundlach, Julietta Weber, and Frank Kösters. 2025. "A Hydrographic Dataset of the Wadden Sea as a Foundation for a Digital Twin of the Coastal Ocean." *Scientific Data* 12(1):1–18. doi: 10.1038/s41597-025-06211-1.
- Lim, Hak Soo, Sunghoon Hong, Jin Hyeok Park, Yunseo Choi, and Hunghwan Choi. 2024. "Development of Coastal Disaster Simulation System Using Marine Digital Twin Technology." *Journal of Coastal Research* 113(sp1):981–85. doi: 10.2112/jcr-si113-192.1.
- Miftakhudin, Muhammad, Aang Alim Murtopo, and Zaenul Arif. 2025. "Integrasi Artificial Neural Network Dan Algoritma Genetika Untuk Prediksi Bencana Banjir Pesisir Kota Tegal." *RIGGS: Journal of Artificial Intelligence and Digital Business* 4(3):840–48. doi: 10.31004/riggs.v4i3.2068.
- Muis, Sanne, Jeroen C. J. H. Aerts, José A. José, Job C. Dullaart, Trang Minh Duong, Li Erikson, Rein J. Haarsma, Maialen Irazoqui Apecechea, Matthias Mengel, Dewi Le Bars, Andrea O'Neill, Roshanka Ranasinghe, Malcolm J. Roberts, Martin Verlaan, Philip J. Ward, and Kun Yan. 2023. "Global Projections of Storm Surges Using High-Resolution CMIP6 Climate Models." *Earth's Future* 11(9):1–17. doi: 10.1029/2023EF003479.
- Paulik, Ryan, John Powell, Alec Wild, Conrad Zorn, and Liam Wotherspoon. 2025. "Spatiotemporal Economic Risk of National Road Networks to Episodic Coastal Flooding and Sea Level Rise." *Climatic Change* 178(1):1–17. doi: 10.1007/s10584-024-03839-7.
- Suanda, Arjun, Dwi Marsiska Driptufany, Defwaldi Defwaldi, Fajrin Fajrin, and Ilham Armi. 2024. "Pemodelan Spasial Genangan Banjir Akibat Kenaikan Genangan Air Laut (Rob) Di Kota Padang." *Aerospace Engineering* 1(2):19. doi: 10.47134/aero.v1i2.2356.
- Yi, Shiye, Yongsheng Wang, Zhijian Yu, and Xiaohua Yu. 2026. "Revealing Coastal Resilience in China: Spatiotemporal Dynamics , Regional Inequality , and Structural Drivers ☆." *Journal of Sea Research* 209(December 2025):102663. doi: 10.1016/j.seares.2025.102663.