

Analisis Statistik Kenaikan Muka Air Laut untuk Perencanaan Infrastruktur Pesisir: Studi Kasus Kota Tarakan

Edy Utomo^{*1}, Azis Susanto², Muhammad Hermansyah³

^{1,2}Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Borneo Tarakan

³Stasiun Meteorologi Juwata, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Tarakan

e-mail: ^{*1}edyutomo99@gmail.com, ²zaissub@gmail.com, ³muhammad.hermansyah@bmkkg.go.id

Abstract

Sea Level Rise (SLR) is one of the most significant impacts of climate change, directly affecting the sustainability of coastal infrastructure. This study aims to predict SLR in Tarakan City for the period 2025-2100 using historical data from 1994-2024 obtained from the Copernicus Climate Change Service and processed with ODV (Ocean Data View) software. The Analysis employs Gumbel and Weibull probability distributions to develop year-based prediction equations, enabling coastal infrastructure planners to determine design elevations without repeating statistical calculations. The results show that the Gumbel model produces higher estimates (worst-case scenario) compared to the Weibull model (best-case scenario), both with high coefficients of determination ($R^2 \geq 0.94$). Projections to 2100 indicate a maximum SLR of 2.44 m (Gumbel) and 2.40 m (Weibull). These findings provide a technical reference for planning coastal protection structures such as revetments, detached breakwaters, and groins, as well as for adjusting the design of wharves and coastal drainage systems. The main contribution of this research is the provision of practical SLR prediction equations that can be directly integrated into civil engineering planning, particularly in tropical coastal areas vulnerable to climate change.

Keywords: Probability Distribution, Coastal Infrastructure, Predictive Model, Coastal Protection, Sea Level Rise

Abstrak

Kenaikan muka air laut (Sea Level Rise, SLR) merupakan salah satu dampak signifikan perubahan iklim yang berimplikasi langsung pada keberlanjutan infrastruktur pesisir. Penelitian ini bertujuan memprediksi kenaikan muka air laut di Kota Tarakan periode 2025-2100 dengan menggunakan data historis 1994-2024 dari Copernicus Climate Change Service yang diolah menggunakan perangkat lunak ODV (Ocean Data View). Analisis dilakukan menggunakan distribusi probabilitas Gumbel dan Weibull yang menghasilkan persamaan prediksi berbasis input tahun, sehingga memudahkan perencanaan infrastruktur pesisir untuk menentukan elevasi desain tanpa melakukan perhitungan ulang. Hasil menunjukkan bahwa model Gumbel memberikan estimasi yang lebih tinggi (kondisi terburuk) dibandingkan model Weibull (kondisi terbaik), keduanya memiliki koefisien determinasi tinggi ($R^2 \geq 0,94$). Proyeksi hingga tahun 2100 mempertimbangkan kenaikan muka air laut maksimum mencapai 2,44 m (Gumbel) dan 2,40 m (Weibull). Temuan ini menjadi acuan teknis dalam perencanaan bangunan pelindung pantai seperti revetment, detached breakwater, dan groin, serta dalam penyesuaian desain dermaga dan sistem drainase pesisir. Kontribusi utama penelitian ini adalah penyediaan persamaan prediksi SLR yang dapat langsung diintegrasikan ke perencanaan teknik sipil, khususnya pada wilayah pesisir tropis yang rentan terhadap perubahan iklim.

Kata kunci: Distribusi Probabilitas, Infrastruktur Pesisir, Model Prediksi, Pelindung Pantai, Sea Level Rise.

1. Pendahuluan

Kenaikan muka air laut (*Sea Level Rise*, SLR) merupakan salah satu dampak nyata perubahan iklim global yang memberikan tekanan signifikan terhadap keberlanjutan wilayah pesisir di seluruh dunia. Fenomena ini terutama dipicu oleh kombinasi pemuatan termal massa air laut akibat peningkatan suhu global dan pencairan es di wilayah kutub serta gletser pegunungan (IPCC, 2021). Laju kenaikan muka air laut global dalam beberapa dekade terakhir menunjukkan tren yang konsisten meningkat, dengan implikasi yang luas terhadap ekosistem pesisir, ketersediaan lahan, serta keberlanjutan infrastruktur vital di wilayah pantai (Alongi, 2008; Voudoukas et al., 2020).

Secara global, wilayah pesisir tidak hanya menjadi pusat aktivitas ekonomi, sosial, dan budaya, tetapi juga menjadi area dengan tingkat kerentanan yang tinggi terhadap dampak SLR. Peningkatan muka air laut berpotensi memperbesar frekuensi dan durasi banjir rob, mempercepat laju erosi pantai, serta mengganggu fungsi infrastruktur pelabuhan, dermaga, dan sistem drainase perkotaan (Asariotis et al., 2024; Hanley et al., 2018). Studi-studi terdahulu menegaskan bahwa tanpa langkah mitigasi dan adaptasi yang memadai, risiko kerugian fisik dan ekonomi di kawasan pesisir akan meningkat secara eksponensial dalam beberapa dekade mendatang (Mori et al., 2019; Tanaka & Tinh, 2019).

Kota Tarakan, yang terletak di Kalimantan Utara, merupakan wilayah pesisir strategis di Indonesia dengan peran penting sebagai pusat perdagangan, pelabuhan, dan aktivitas perikanan di kawasan utara Kalimantan. Kondisi geografis Tarakan yang dikelilingi perairan menjadikannya sangat rentan terhadap dampak kenaikan muka air laut. Wilayah pesisir Tarakan telah mengalami tekanan lingkungan berupa abrasi, sedimentasi, dan intrusi air laut, yang berpotensi mengganggu keberlanjutan infrastruktur pelabuhan, kawasan industri, dan permukiman pesisir (BMKG, 2022; Suharto & Hamzah, 2020).

Penelitian sebelumnya telah mengidentifikasi dinamika oseanografi di perairan Tarakan, termasuk karakteristik pasang surut dan arus laut (Fadilah et al., 2014; Suharto & Hamzah, 2020), transformasi gelombang di pantai timur Pulau Tarakan (Hidayat et al., 2024), serta perubahan garis pantai di wilayah utara Pulau Tarakan menggunakan metode *Digital Shoreline Analysis System* (Utomo & Bakri, 2023). Beberapa studi juga telah meneliti efektivitas desain berbagai jenis bangunan pelindung pantai, seperti *revetment* (Maharani & Utomo, 2024), *detached breakwater* (Haryanti & Utomo, 2024), dan *groin* (Utomo & Bakri, 2024) dalam mengurangi dampak abrasi di Pantai Amal Baru. Meskipun demikian, penelitian yang secara khusus memprediksi SLR di Tarakan menggunakan data *reanalysis* dan proyeksi CMIP6, lalu mengintegrasikan hasilnya ke dalam perencanaan infrastruktur pesisir, masih sangat terbatas.

Dari sisi metode, distribusi probabilitas seperti Gumbel dan Weibull telah terbukti efektif dalam memodelkan kejadian ekstrem hidrologi dan oseanografi, termasuk dalam estimasi muka air laut rencana (*design sea level*) untuk perencanaan bangunan pantai (Holthuijsen, 2010; Massel, 1996; Li et al., 2022; Sari et al., 2020). Data dari *Copernicus Climate Change Service* (2022) menyediakan *time series* perubahan muka air laut global dari tahun 1950 hingga 2050 berdasarkan kombinasi data pengamatan satelit, model reanalisis, dan proyeksi *high-resolution* CMIP6, sehingga memberikan landasan yang kuat untuk analisis tren historis dan proyeksi masa depan.

Berdasarkan latar belakang tersebut, penelitian ini bertujuan untuk, menganalisis tren historis kenaikan muka air laut di Kota Tarakan menggunakan data *Copernicus Climate Change Service*. Mengestimasi muka air laut rencana menggunakan distribusi Gumbel dan Weibull untuk periode kala ulang tertentu. Serta mengkaji implikasi prediksi SLR terhadap perencanaan dan desain

infrastruktur pesisir, termasuk pelindung pantai, dermaga, dan fasilitas pelabuhan di Kota Tarakan. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan bagi perencana, insinyur sipil, dan pengambil kebijakan dalam merumuskan strategi adaptasi dan desain infrastruktur pesisir yang tangguh terhadap perubahan iklim di wilayah Tarakan.

2. Metode Penelitian

2.1 Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di wilayah perairan Kota Tarakan, Kalimantan Utara, Indonesia, yang terletak di $3^{\circ}14'-3^{\circ}27'$ LU dan $117^{\circ}32'-117^{\circ}38'$ BT. Kota Tarakan dikelilingi oleh laut Sulawesi di sebelah timur dan Selat Tarakan di sebelah barat, sehingga memiliki karakteristik pesisir yang khas dengan tingkat keterpaparan tinggi terhadap kenaikan muka air laut. Lokasi ini dipilih karena memiliki infrastruktur pesisir strategis seperti pelabuhan, dermaga, kawasan industri, dan permukiman pesisir yang berpotensi terdampak oleh perubahan muka air laut.

2.2 Data dan Sumber Data

Data utama yang digunakan adalah *Global sea level change time series from 1950 to 2050* yang disediakan oleh *Copernicus Climate Service (C3S)* melalui *Climate Data Store* (Copernicus, 2022). Dataset ini mencakup data historis (1950-2024) yang diperoleh dari pengukuran satelit altimetri dan model reanalisis, serta proyeksi masa dengan hingga tahun 2050 berdasarkan model iklim resolusi tinggi CMIP6.

Data diunduh dalam format NetCDF (.nc) yang merupakan format standar untuk data oseanografi dan klimatologi. Untuk membuka, memvisualisasikan, dan mengekstrak data dari file ini digunakan perangkat lunak ODV (*Ocean Data View*), yang memungkinkan pengolahan *time series*, pemilihan titik koordinat spesifik, serta ekspor data ke format analisis statistik seperti, csv.

2.3 Tahapan Analisis

Bagian ini menjelaskan langkah-langkah yang ditempuh dalam proses pengolahan dan analisis data penelitian. Tahapan yang disajikan bertujuan untuk memberikan gambaran sistematis mengenai metode yang digunakan, mulai dari pra-pengolahan data, Analisis tren historis, Analisis distribusi probabilitas, Proyeksi periode ulang, hingga Integrasi ke desain infrastruktur pesisir.

- 1) Pra-pengolahan data
 - a. Mengunduh dataset *sea level change time series* dari *Copernicus Climate Data Store*.
 - b. Membuka file NetCDF menggunakan ODV untuk memfilter lokasi sesuai koordinat di wilayah perairan Kota Tarakan.
 - c. Mengekspor hasil filter ke format CSV untuk analisis statistik.
- 2) Analisis tren historis
 - a. Data historis (1994-2024) dianalisis menggunakan regresi linier sederhana untuk menentukan tren kenaikan tahunan (*linear trend*) dan laju perubahan muka air laut (*rate of sea level change*) (Holthuijsen, 2010; Massel, 1996).
 - b. Analisis ini memberikan gambaran umum mengenai pola kenaikan muka air laut di Kota Tarakan tanpa melakukan pengujian signifikansi statistik formal.
- 3) Analisis distribusi probabilitas
 - a. Dua distribusi probabilitas digunakan untuk estimasi muka air laut rencana, yaitu:

- a) Distribusi Gumbel (*Extreme Value Type I*), sering digunakan untuk analisis kejadian ekstrem hidrologi (USACE, 1984; Triatmodjo, 2014).
- b) Distribusi Weibull, efektif dalam memodelkan data kejadian ekstrem oseanografi (Li et al., 2022; Sari et al., 2020).
- b. Langkah perhitungan parameter distribusi dilakukan dengan metode berikut:
 - a) Data diurutkan dari nilai terbesar hingga terkecil
 - b) Nilai peluang kumulatif (*cumulative probability*) dihitung dengan menggunakan:
 - Untuk Gumbel (*Plotting Position Gumbel*):

$$P = 1 - \frac{m - 0,44}{n + 1} \quad (1)$$

- Untuk Weibull (*Plotting Position Weibull*):

$$P = 1 - \frac{m}{n + 1} \quad (2)$$

Di mana, m adalah peringkat data dan n adalah jumlah total data.

- c. Parameter ini mengikuti metode manual yang umum digunakan dalam analisis hidrologi dan rekayasa pantai, serta memudahkan penerapan hasil pada desain infrastruktur pesisir.
- 4) Proyeksi ke periode kala ulang
 - a. Berdasarkan parameter distribusi, dihitung nilai muka air laut rencana untuk periode kala ulang (retrun period) 2, 5, 10, 15, 25, 50, 100, hingga 150 tahun.
 - b. Dibuat grafik hubungan antara tahun (x) dan prediksi kenaikan muka air laut (SLR) untuk masing-masing distribusi.
 - c. Pada grafik tersebut ditambahkan persamaan regresi (*best-fit equation*) hasil transformasi distribusi Gumbel dan Weibull, sehingga pengguna cukup memasukkan tahun target untuk memperoleh nilai prediksi.
 - d. Persamaan ini memudahkan perencanaan infrastruktur pesisir dalam menentukan elevasi desain tanpa melakukan analisis statistik ulang.
 - e. Proyeksi dilakukan untuk setiap tahun dalam rentang 2025 sampai dengan 2100, dengan tujuan selain menghasilkan persamaan praktis untuk dapat digunakan secara langsung, pengguna juga dapat mengamati hasil yang sudah diperhitungkan dalam tabel menyeluruh (Lihat Lampiran).
- 5) Integrasi ke desain infrastruktur pesisir
 - a. Hasil dari prediksi SLR digunakan untuk menentukan elevasi minimum dan dimensi teknis bangunan pelindung pantai seperti revetment (Maharani & Utomo, 2024), *detached breakwater* (Haryanti & Utomo, 2024), dan groin (Utomo & Bakri, 2024).
 - b. Pertimbangan teknis mengikuti pedoman dari *Shore Protection Manual* (USACE, 1984) dan panduan desain bangunan pantai (Triatmodjo, 1999; Triatmodjo, 2014; Muliati, 2020).

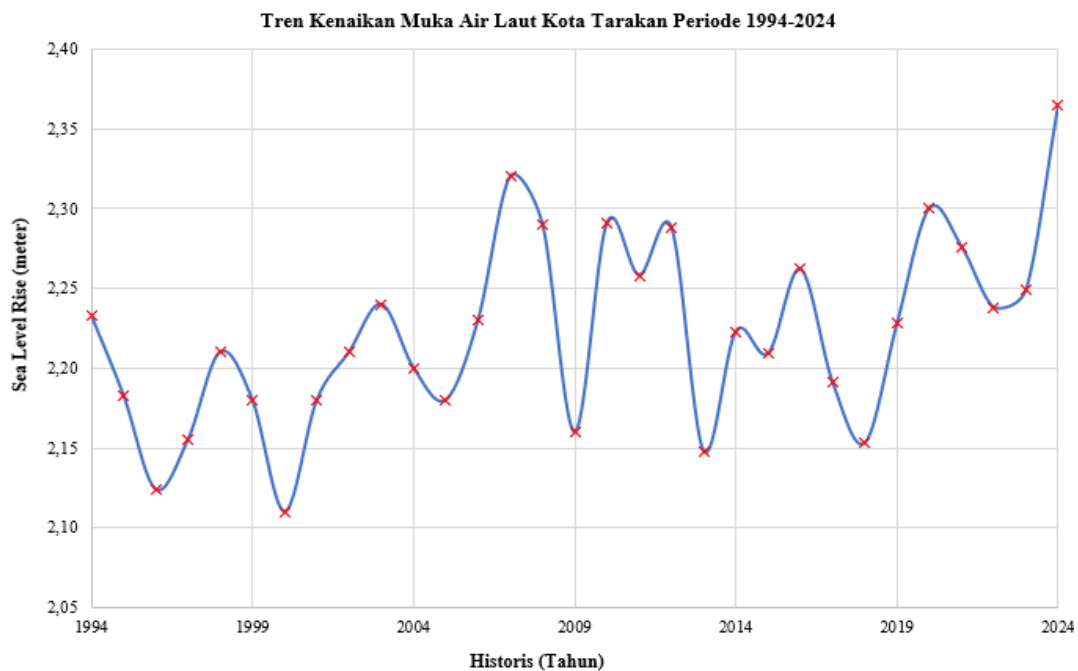
2.4 Perangkat Lunak Pendukung

Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini adalah ODV (*Ocean Data View*) untuk membuka, memfilter, dan mengeksport data NetCDF dari Copernicus, dan Microsoft Excel untuk pengolahan awal data dan visualisasi grafik sederhana.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1 Tren Kenaikan Muka Air Laut

Berdasarkan data Copernicus Climate Change Service (2022), yang diolah menggunakan perangkat lunak ODV (*Ocean Data View*), diperoleh tren kenaikan muka air laut di Kota Tarakan untuk periode 1994-2024 seperti disajikan pada Gambar 1. Secara umum, nilai *sea level rise* berada pada kisaran 2,10-2,36 meter, dengan fluktuasi tahunan yang dipengaruhi oleh variabilitas iklim regional seperti fenomena *El Nino Southern Oscillation* (ENSO) dan dinamika arus laut di Laut Sulawesi.



Gambar 1. Tren kenaikan muka air laut Kota Tarakan periode 1994-2024

Pola grafik menunjukkan adanya siklus kenaikan dan penurunan tahunan, namun secara keseluruhan terdapat kecenderungan tren meningkat. Titik terendah tercatat pada tahun 2000 dengan nilai sekitar 2,10 meter, sedangkan titik tertinggi terjadi pada tahun 2024 dengan nilai sekitar 2,36 meter. Fluktuasi ini mencerminkan adanya interaksi antara faktor iklim global dan kondisi oseanografi lokal (Holthuijsen, 2010; Massel, 1996).

Kenaikan dari awal periode (1994) hingga akhir periode (2024) menunjukkan tren positif dengan peningkatan bersih sekitar 0,11-0,12 m dalam 30 tahun terakhir. Temuan ini sejalan dengan prediksi kenaikan muka air laut global yang dilaporkan oleh IPCC (2021) dan penelitian Vousdoukas et al. (2020), dimana kawasan Asia Tenggara termasuk dalam wilayah dengan laju kenaikan di atas rata-rata global.

Hasil tren historis ini akan menjadi dasar dalam perhitungan parameter distribusi Gumbel dan Weibull untuk memproyeksikan kenaikan muka air laut di Tarakan pada periode 2025-2100. Dengan demikian, persamaan yang dihasilkan nantinya dapat digunakan langsung oleh perencana infrastruktur pesisir untuk menentukan elevasi rencana bangunan pelindung pantai, dermaga, dan fasilitas pesisir lainnya (Triatmodjo, 2014; USACE, 1984; Maharani & Utomo, 2024; Haryanti & Utomo, 2024; Utomo & Bakri, 2024).

3.2 Pemodelan Distribusi Gumbel dan Weibull

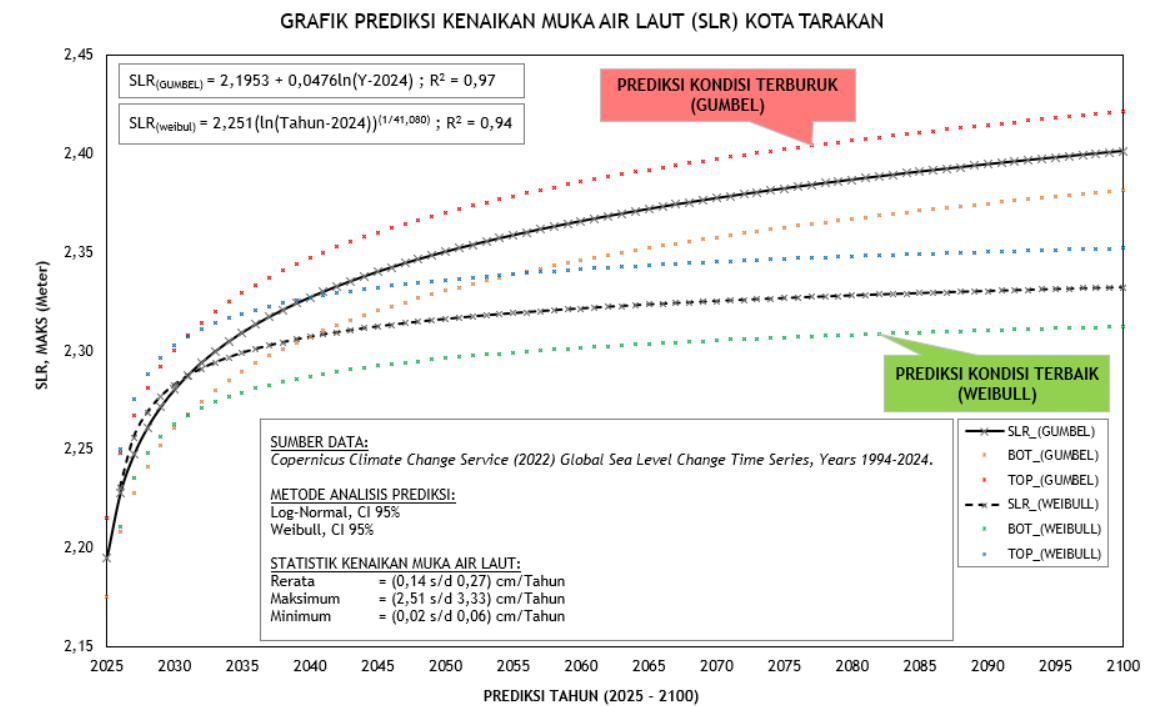
Untuk memprediksi kenaikan muka air laut Kota Tarakan periode 2025-2100, digunakan dua pendekatan distribusi probabilitas, yaitu Gumbel (*Extreme Value Type I*) dan Weibull. Kedua model ini dipilih karena telah banyak digunakan dalam analisis kejadian ekstrem di bidang hidrologi dan oseanografi (USACE, 1984; Triatmodjo, 2014; Li et al., 2022; Sari et al., 2020). Parameter distribusi dihitung berdasarkan data historis tahun (1994-2024) menggunakan *plotting position* yang sesuai untuk masing-masing distribusi, seperti yang ditunjukkan pada persamaan (1) dan (2).

Hasil perhitungan parameter digunakan untuk membangun persamaan regresi (*best-fit equation*) yang menghubungkan tahun (*x*) dengan kenaikan muka air laut (SLR). Dengan persamaan ini, pengguna dapat langsung memasukkan tahun target (2025-2100) untuk mendapatkan estimasi kenaikan muka air laut tanpa melakukan perhitungan manual.

Tabel 1. Hasil proyeksi kenaikan muka air laut Kota Tarakan berdasarkan distribusi Gumbel dan Weibull (2025-2100)

Tahun	Prediksi SLR Gumbel (m)	Prediksi SLR Weibull (m)
2025	2,195	2,231
2030	2,281	2,283
2040	2,327	2,307
2050	2,350	2,316
2060	2,366	2,322
2070	2,378	2,325
.....		
2100	2,401	2,332

Keseluruhan Tabel dapat dilihat pada Lampiran.



Gambar 2. Grafik hubungan tahun vs kenaikan muka air laut untuk model Gumbel dan Weibull

3.3 Proyeksi Kenaikan Muka Air Laut 2025-2100

Berdasarkan analisis distribusi probabilitas Gumbel dan Weibull terhadap data historis 1994-2024, diperoleh persamaan prediksi kenaikan muka air laut (*Sea Level Rise*, SLR) untuk Kota Tarakan sebagai berikut:

$$SLR_{Gumbel} = 2,1953 + 0,0476 \cdot \ln(Y - 2024) ; R^2 = 0,97$$

$$SLR_{Weibull} = 2,251 \cdot [\ln(Y - 2024)]^{1/41,080} ; R^2 = 0,94$$

di mana Y adalah tahun prediksi, dan SLR dinyatakan dalam meter. Persamaan ini memungkinkan perencana infrastruktur pesisir untuk secara langsung menghitung prediksi muka air laut pada tahun tertentu di rentang 2025-2100 tanpa perlu melakukan perhitungan statistik ulang.

Pada Gambar 2 memperlihatkan grafik proyeksi SLR dari kedua model. Garis hitam solid menunjukkan hasil model Gumbel, sedangkan garis hitam putus-putus menunjukkan hasil model Weibull. Area di antara garis batas atas (*upper bound*, TOP) dan batas bawah (*lower bound*, BOT) mewakili rentang prediksi dengan tingkat kepercayaan 95% (CI 95%).

Hasil analisis menunjukkan bahwa. Model Gumbel cenderung menghasilkan prediksi yang lebih tinggi, sehingga merepresentasikan prediksi kondisi terburuk. Sedangkan, Weibull memberikan prediksi yang lebih rendah, sehingga dapat dianggap sebagai prediksi kondisi terbaik. Laju kenaikan muka air laut rata-rata berada pada kisaran 0,14-0,27 cm/tahun, dengan kenaikan maksimum mencapai 3,33 cm/tahun dan minimum 0,06 cm/tahun. Prediksi ini menunjukkan bahwa pada tahun 2100, muka air laut di Kota Tarakan dapat meningkat hingga mendekati 2,40-2,44 meter (model Gumbel) atau sekitar 2,38-2,40 meter (model Weibull) dibandingkan elevasi referensi saat ini.

Hasil ini menjadi acuan penting bagi perencana infrastruktur pesisir, khususnya dalam menentukan elevasi desain bangunan pelindung pantai seperti *revetment* (Maharani & Utomo, 2024), *detached breakwater* (Haryanti & Utomo, 2024), dan *groin* (Utomo & Bakri, 2024), serta dalam penyesuaian desain dermaga dan fasilitas pelabuhan (Triatmodjo, 2014; USACE, 1984).

3.4 Implikasi terhadap Perencanaan Infrastruktur Pesisir di Tarakan

Hasil proyeksi kenaikan muka air laut periode 2025-2100 menunjukkan bahwa elevasi muka air laut di Kota Tarakan berpotensi meningkat secara signifikan, dengan nilai maksimum mendekati 2,44 meter menurut model Gumbel dan sekitar 2,40 meter menurut model Weibull pada akhir abad ini. Kondisi ini menuntut adanya penyesuaian strategi perencanaan dan desain infrastruktur pesisir untuk meminimalkan risiko kerusakan akibat abrasi, genangan, dan limpasan gelombang (*wave overtoping*). Implikasi teknis dari hasil prediksi ini mencakup beberapa hal antara lain:

- 1) Penentuan elevasi rencana bangunan pelindung pantai
 - a. *Revetment*: Desain elevasi puncak *revetment* di Pantai Amal Baru perlu mempertimbangkan kenaikan muka air laut prediksi tahun target. Mengacu pada penelitian Maharani & Utomo (2024), elevasi puncak direkomendasikan minimal setinggi SLR prediksi ditambah *freeboard* yang memadai untuk mengantisipasi gelombang ekstrem.
 - b. *Detached Breakwater*: Desain struktur lepas pantai yang diteliti oleh Haryanti & Utomo (2024) perlu menyesuaikan elevasi puncak serta jarak dari garis pantai agar tetap efektif meredam energi gelombang pada muka air laut yang lebih tinggi di masa depan.

- c. Groyne: Studi Utomo & Bakri (2024) menegaskan pentingnya mempertahankan keseimbangan sedimen. Dengan kenaikan muka air laut, panjang dan elevasi groyne perlu dikalibrasi ulang agar tetap berfungsi optimal.
- 2) Penyesuaian desain dermaga dan fasilitas pelabuhan, dimana kenaikan muka air laut dapat mengubah *clearance* vertikal antara permukaan air dengan struktur dermaga, sehingga berpotensi mengganggu operasional bongkar muat kapal. Desain baru atau rehabilitasi dermaga harus mengacu pada proyeksi tahun operasionalnya.
- 3) Penguatan sistem drainase pesisir, dimana elevasi muka air laut yang lebih tinggi meningkatkan risiko *backflow* ke saluran drainase, terutama saat kondisi pasang tertinggi bersamaan dengan curah hujan yang tinggi. Kondisi ini sering memicu kejadian banjir pada jalan raya di sekitar pertemuan saluran drainase besar dan sungai. Di Kota Tarakan, fenomena ini telah beberapa kali menyebabkan kemacetan parah di titik-titik rawan seperti wilayah Kampung 4, Kampung 6, Karang Anyar, Karang Rejo, dan Sekitar Mulawarman. Upaya mitigasi yang dinilai lebih efektif dibandingkan penyediaan pintu air atau pompa adalah program normalisasi drainase dan sungai secara rutin setiap tahun, yang dapat dicanangkan dalam bentuk swadaya masyarakat besar-besaran sehari dalam setahun. Kegiatan ini meliputi pengerukan sedimen, pembersihan sampah, dan pelebaran saluran untuk memastikan kapasitas pengaliran tetap optimal meskipun terjadi kombinasi pasang tinggi dan hujan lebat. Normalisasi tahunan juga membantu menjaga efisiensi sistem drainase eksisting dengan biaya pemeliharaan yang relatif lebih rendah dibandingkan investasi infrastruktur baru yang kompleks.
- 4) Integrasi adaptasi berbasis ekosistem, dengan melakukan penerapan kombinasi Mangrove dan vegetasi pantai dengan struktur pelindung pantai (*hybrid solution*) untuk meredam energi gelombang, mengurangi erosi, dan menambah ketahanan terhadap kenaikan muka air laut (Alongi, 2008; Hanley et al., 2018).

Dengan demikian, penggunaan persamaan prediksi SLR dari model Gumbel (kondisi terburuk) dan Weibull (kondisi terbaik) yang telah dikembangkan dalam penelitian ini menjadi penting sebagai acuan perhitungan elevasi desain. Pendekatan ini memungkinkan para perencana dan insinyur sipil untuk menyesuaikan desain infrastruktur pesisir secara presisi sesuai tahun operasional yang diinginkan, tanpa harus mengulang analisa statistik dari awal.

4. Kesimpulan

Penelitian ini berhasil mengembangkan model prediksi kenaikan muka air laut (*Sea Level Rise*, SLR) di Kota Tarakan berbasis data historis 1994-2024 dari *Copernicus Climate Change Service* yang diolah menggunakan perangkat lunak ODV dan dianalisis dengan distribusi probabilitas Gumbel dan Weibull. Hasil analisis menghasilkan persamaan prediksi yang menghubungkan tahun proyeksi (2025-2100) dengan kenaikan muka air laut, sehingga memudahkan perencana infrastruktur pesisir dalam menentukan elevasi desain tanpa perlu melakukan perhitungan statistik ulang. Model Gumbel direkomendasikan untuk mewakili skenario kondisi terburuk, sedangkan model Weibull menggambarkan skenario kondisi terbaik, keduanya dengan tingkat kepercayaan yang tinggi ($R^2 \geq 0,94$). Integrasi hasil prediksi ini dengan prinsip perencanaan bangunan pelindung pantai memberikan kontribusi penting bagi pengembangan ilmu teknik sipil, khususnya dalam aspek adaptasi desain infrastruktur terhadap perubahan iklim. Temuan baru dari penelitian alat bantu teknis untuk desain revetment, *detached breakwater*, groyne, dermaga, dan sistem drainase pesisir di

Tarakan, yang secara spesifik mempertimbangkan tren kenaikan muka air laut jangka panjang. Pendekatan ini tidak hanya memperkuat dasar ilmiah perencanaan infrastruktur pesisir di wilayah tropis, tetapi juga memberikan kerangka terapan yang dapat direplikasi untuk kota-kota pesisir lainnya yang menghadapi tantangan serupa.

Ucapan Terima Kasih

Penulis menyampaikan terima kasih kepada Jurusan Teknik Sipil Universitas Borneo Tarakan atas dukungan fasilitas dan lingkungan akademik yang kondusif selama penelitian ini berlangsung. Apresiasi juga disampaikan kepada rekan-rekan dosen sesama peneliti di Jurusan Teknik Sipil Universitas Borneo Tarakan dan Stasiun Meteorologi Juwata BMKG Tarakan yang telah memberikan masukan berharga, diskusi konstruktif, dan kolaborasi yang memperkaya hasil penelitian ini.

Daftar Pustaka

- Alongi, D. M. (2008). Mangrove forests: Resilience, protection from tsunamis, and responses to global climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 76(1), 1–13.
- Asariotis, R., Monioudi, I. N., Mohos Naray, V., Velegrakis, A. F., Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., & Feyen, L. (2024). Climate change and seaports: Hazards, impacts and policies and legislation for adaptation. *Anthropocene Coasts*, 7(14).
- Bird, E. C. F. (2011). *Coastal geomorphology: An introduction* (2nd ed.). Wiley.
- BMKG. (2022). *Seasonal zone update and forecast of the 2021/2022 rainy season in Indonesia*. BMKG.
- Copernicus Climate Change Service. (2022). Global sea level change time series from 1950 to 2050 derived from reanalysis and high resolution CMIP6 climate projections. *Copernicus Climate Change Service (C3S) Climate Data Store (CDS)*.
- Fadilah, N., Soedibyo, M., & Soemarno, S. (2014). Menentukan tipe pasang surut dan muka air rencana perairan laut Kabupaten Bengkulu Tengah menggunakan metode Admiralty. *Maspari Journal*, 6(1), 1–12.
- Hanley, M. E., Thompson, R. C., & Tyllianakis, E. (2018). Designing resilient infrastructure for coastal communities: A framework for incorporating ecosystem-based approaches. *Sustainability*, 10(8), 2629.
- Haryanti, G. T., & Utomo, E. (2024). Penanganan abrasi Pantai Amal Baru Kota Tarakan dengan bangunan pelindung pantai tipe detached breakwater. *Civil Engineering Scientific Journal*, 3(2), 95–106.
- Hidayat, W., Utomo, E., & Amiruddin, A. (2024). Studi transformasi gelombang di pantai sebelah timur Pulau Tarakan metode Shore Protection Manual (SPM, 1984). *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, 8(3), 332–346.
- Holthuijsen, L. H. (2010). *Waves in oceanic and coastal waters*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2021). *Climate change 2021: The physical science basis*. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press.
- Li, Y., Zhang, H., & Wang, J. (2022). Application of Weibull distribution in coastal wave prediction: A case study in the South China Sea. *Ocean Engineering*, 258, 111833.
- Maharani, A. I., & Utomo, E. (2024). Studi bangunan pelindung pantai tipe revetment sebagai alternatif penanganan abrasi di Pantai Amal Baru Kota Tarakan. *Civil Engineering Scientific Journal*, 3(3), 138–149.
- Massel, S. R. (1996). *Ocean surface waves: Their physics and prediction*. World Scientific.
- Mori, N., Shimura, T., Yasuda, T., & Mase, H. (2019). Future changes in extreme storm surges based on mega-ensemble projection using a statistical emulator. *Coastal Engineering*, 150, 126–137.

- Muliati, Y. (2020). *Rekayasa pantai*. Deepublish.
- NOAA. (2022). What is the intertidal zone? National Oceanic and Atmospheric Administration.
- Sari, N. M., Prasetyo, H., & Lestari, D. (2020). Analisis distribusi probabilitas data gelombang laut menggunakan model Weibull. *Jurnal Kelautan Nasional*, 15(2), 123–131.
- Suharto, A., & Hamzah, L. (2020). Studi karakteristik pasang surut dan arus laut di wilayah pesisir Kalimantan Utara. *Jurnal Oseanografi Tropis*, 8(2), 112–121.
- Tanaka, H., & Tinh, N. X. (2019). Theoretical examinations on long-wave damping by depth-limited boundary layers. *Coastal Engineering Journal*, 61(4), 457–472.
- Triatmodjo, B. (1999). *Teknik pantai*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Triatmodjo, B. (2014). *Perencanaan bangunan pantai (III)*. Yogyakarta: Beta Offset.
- US Army Corps of Engineers. (1984). *Shore Protection Manual* (Vol. 1–2). Coastal Engineering Research Center, Washington, D.C.
- Utomo, E., & Asta. (2023). Studi perubahan tinggi gelombang laut untuk rencana pengembangan infrastruktur pelabuhan di Pantai Barat Pulau Tarakan Kalimantan Utara. *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, 2(3), 198–210. <https://doi.org/10.35334/cesj.v2i3.4215>
- Utomo, E., & Bakri, M. D. (2023). Studi perubahan garis pantai dengan metode DSAS (Digital Shoreline Analysis System) sebagai upaya identifikasi erosi di Pantai Utara Pulau Tarakan. *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, 7(2), 216–233. <https://doi.org/10.35334/be.v7i2.4208>.
- Utomo, E., & Bakri, M. D. (2024). Studi desain bangunan pelindung pantai tipe groin sebagai upaya penanganan abrasi di Pantai Amal Baru Pulau Tarakan. *Civil Engineering Scientific Journal*, 3(4), 155–168.
- Vousdoukas, M. I., Mentaschi, L., Voukouvalas, E., Verlaan, M., & Jevrejeva, S. (2020). Sandy coastlines under threat of erosion. *Nature Climate Change*, 10(3), 254–257.

Lampiran

Tabel. Hasil proyeksi kenaikan muka air laut Kota Tarakan berdasarkan distribusi Gumbel dan Weibull (2025-2100)

Tahun	Prediksi SLR Gumbel (m)	Prediksi SLR Weibull (m)
2025	2,195	2,231
2026	2,228	2,231
2027	2,248	2,256
2028	2,261	2,268
2029	2,272	2,277
2030	2,281	2,283
2031	2,288	2,287
2032	2,294	2,291
2033	2,300	2,294
2034	2,305	2,297
2035	2,309	2,299
2036	2,314	2,301
2037	2,317	2,303
2038	2,321	2,304
2039	2,324	2,306
2040	2,327	2,307
2041	2,330	2,308
2042	2,333	2,309
2043	2,335	2,310
2044	2,338	2,311
2045	2,340	2,312
2046	2,342	2,313
2047	2,345	2,314
2048	2,347	2,315
2049	2,349	2,315
2050	2,350	2,316
2051	2,352	2,317
2052	2,354	2,317
2053	2,356	2,318
2054	2,357	2,319
2055	2,359	2,319
2056	2,360	2,320
2057	2,362	2,320
2058	2,363	2,321
2059	2,365	2,321
2060	2,366	2,322
2061	2,367	2,322
2062	2,368	2,322
2063	2,370	2,323
2064	2,371	2,323
2065	2,372	2,324
2066	2,373	2,324
2067	2,374	2,324
2068	2,375	2,325
2069	2,376	2,325
2070	2,378	2,325
2071	2,379	2,326

Tahun	Prediksi SLR Gumbel (m)	Prediksi SLR Weibull (m)
2072	2,380	2,326
2073	2,381	2,326
2074	2,382	2,327
2075	2,382	2,327
2076	2,383	2,327
2077	2,384	2,327
2078	2,385	2,328
2079	2,386	2,328
2080	2,387	2,328
2081	2,388	2,328
2082	2,389	2,329
2083	2,389	2,329
2084	2,390	2,329
2085	2,391	2,329
2086	2,392	2,330
2087	2,393	2,330
2089	2,393	2,330
2090	2,394	2,330
2091	2,395	2,330
2092	2,395	2,331
2093	2,396	2,331
2094	2,397	2,331
2095	2,398	2,331
2096	2,398	2,331
2097	2,399	2,332
2098	2,400	2,332
2099	2,400	2,332
2100	2,401	2,332

Tabel. Data historis nilai *Sea Level Rise* (SLR) setelah diolah menggunakan ODW, dengan Sumber Copernicus Climate Change Service (2022)

Tahun	SLR (m)	Tahun	SLR (m)
1994	2,23	2009	2,16
1995	2,18	2010	2,29
1996	2,12	2011	2,26
1997	2,16	2012	2,29
1998	2,21	2013	2,15
1999	2,18	2014	2,22
2000	2,11	2015	2,21
2001	2,18	2016	2,26
2002	2,21	2017	2,19
2003	2,24	2018	2,15
2004	2,20	2019	2,23
2005	2,18	2020	2,30
2006	2,23	2021	2,28
2007	2,32	2022	2,24
2008	2,29	2023	2,25