

Perancangan bangunan pelindung pantai dalam penanganan abrasi (studi kasus: Pantai Caruban, Jawa Tengah)

M Gilang Indra Mardika*, Tera Melya Patrice Sihombing, Retno Hutami Adiningsih

Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknologi Infrastruktur dan Kewilayahan, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan, Lampung, Indonesia

*Corresponding authors: m.indra@si.itera.ac.id

Submitted: 13 August 2024, Revised: 8 April 2025, Accepted: 28 April 2025

ABSTRACT: Citing from the National Disaster Management Agency (BNPB) in 2022, abrasion occurred located at Caruban Beach, Gedongmulyo Village, Lasem District, Rembang Regency, Central Java Province. The impact of this abrasion causes a significant change in the coastline. One of the efforts to overcome these problems is to plan coastal protection which is adjusted to the existence of the parameters and urgency on Caruban Beach. The main aims of this research is planning breakwater structure as coastal protection and addressing the abrasion. The parameters used in the planning of coastal protection include significant wave height, tides with HHWL values, refractive coefficients, and shoaling coefficients for the transformation of deep water into shallow water, the raise up of water surface, and Sea Level Rise value. The data on high and significant wave periods are processed using the probability distribution of the Fisher Tippet Type I method at a 50-year return period with high values and extreme wave periods of 2.402 meters and 5.61 seconds, respectively. Waves transformation by the refractive coefficient and shoaling coefficient is derived around 1.57 meters at a depth of 5 meters. HHWL value is earned at 0.928 meters. The value of wave set-up is 0.11 meters, while sea level rise in the best estimate in 2075 is 0.24 meters. So design water level is 1.28 meters. The coastal protection chosen is offshore breakwater because it serves to maintain the position of the coastline and maintain the function of Caruban Beach as tourist destination. Breakwater planning uses three types of protective layers, namely tetrapods, dolos, and boulders, where the wave propagation value on the three types of protective layers is derived consecutively of 0.73 meters, 0.68 meters, and 1.46 meters. Thus, the elevation of the tetrapod, dolos, and boulder protection layers is 2.6 meters respectively, 2.5 meters, and 3.3 meters.

KEYWORDS: breakwater; design water level; HHWL; significant wave; wave transformation.

ABSTRAK: Dilansir dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) Tahun 2022, terjadi abrasi yang berlokasi di Pantai Caruban, Desa Gedongmulyo, Kecamatan Lasem, Kabupaten Rembang, Provinsi Jawa Tengah. Dampak dari abrasi ini menyebabkan perubahan garis pantai yang cukup signifikan. Salah satu upaya untuk menanggulangi permasalahan tersebut adalah melakukan perencanaan bangunan pelindung pantai yang disesuaikan dengan parameter-parameter dan urgensi yang ada di Pantai Caruban. Tujuan dari penelitian ini adalah perencanaan bangunan breakwater sebagai upaya penanganan abrasi. Parameter-parameter yang digunakan dalam perencanaan bangunan pelindung pantai antara lain tinggi gelombang signifikan, pasang surut dengan nilai HHWL (Higher High Water Level), koefisien refraksi, dan koefisien shoaling untuk transformasi gelombang laut ke laut dangkal, kenaikan muka air laut, serta Sea Level Rise. Data tinggi dan periode gelombang signifikan diolah menggunakan distribusi probabilitas metode Fisher Tippet Type I pada kala ulang 50 tahun dengan nilai tinggi dan periode gelombang ekstrim berturut-turut sebesar 2.402 meter dan 5.61 detik. Gelombang yang menjalar menuju perairan dangkal mengalami transformasi oleh koefisien refraksi dan koefisien shoaling, sehingga diperoleh ketinggian gelombang deformasi sebesar 1.57 meter pada kedalaman 5 meter. Dengan menggunakan metode Admiralty, didapatkan nilai HHWL sebesar 0.928 meter. Kenaikan muka air laut akibat gelombang sebesar 0.11 meter, sedangkan kenaikan muka air laut akibat sea level rise pada perkiraan terbaik tahun 2075 sebesar 0.24 meter. Maka dapat disimpulkan, nilai elevasi muka air rencana (design water level) yang didapatkan sebesar 1.28 meter. Bangunan pelindung pantai yang dipilih adalah breakwater lepas pantai karena berfungsi untuk mempertahankan posisi garis pantai dan menjaga fungsi Pantai Caruban sebagai destinasi wisata. Perencanaan breakwater menggunakan tiga jenis lapis lindung yaitu tetrapod, dolos, dan boulder, dimana didapatkan nilai rambatan gelombang pada ketiga jenis lapis lindung berturut-turut sebesar 0.73 meter, 0.68 meter, dan 1.46 meter. Elevasi lapis lindung tetrapod, dolos, dan boulder berturut-turut sebesar 2.6 meter, 2.5 meter, dan 3.3 meter.

KATA KUNCI: pemecah gelombang; elevasi muka air rencana; HHWL; gelombang signifikan; transformasi gelombang.

© The Author(s) 2025. This article is distributed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International license.

1. PENDAHULUAN

Salah satu negara kepulauan terbesar di dunia adalah Indonesia, membentang dari Sabang hingga Merauke dengan garis pantai sepanjang 95.181 kilometer, menjadikannya negara dengan garis pantai terpanjang kedua di dunia (Kementrian Kelautan dan Perikanan, 2021). Sebagian besar wilayahnya terdiri dari perairan laut seluas 5.8 juta km² dengan 17,504 pulau. Sehingga Indonesia merupakan republik yang dapat terdegradasi akibat ancaman atau rawan bencana gelombang yang cukup ekstrim (Mardika M. I., 2024). Posisi garis pantai Indonesia tidak tetap akibat dinamika kelautan dan erosi yang dipengaruhi oleh arus, gelombang, sedimentasi, angin, bentuk muka pantai, dan aliran sungai. Selain faktor alam, aktivitas manusia seperti pembangunan pelabuhan, pertambangan, pariwisata, pengembangan fasilitas pantai, dan reklamasi juga berpengaruh terhadap perubahan tersebut. Pada tahun 2019, abrasi telah menggerus sekitar 400 km pantai di Indonesia.

Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) melaporkan pada tahun 2022 bahwa abrasi terjadi di Pantai Caruban, Desa Gedongmulyo, Kecamatan Lasem, Kabupaten Rembang, Provinsi Jawa Tengah, yang terletak di 6°40'42.5"S dan 111°25'44"E. Pantai ini termasuk satu tujuan wisata di Rembang yang terkenal dengan keindahannya. Pada 17 Agustus 2022 malam hari, abrasi yang dipicu oleh gelombang dan angin kencang menyebabkan perubahan signifikan pada garis pantai dan kerusakan infrastruktur jalan. Tanah sepanjang 87 meter dengan lebar 2 meter terkikis, mempersempit akses jalan di bibir Pantai Caruban. Dampak abrasi ini mengurangi daya tarik wisata dan merugikan ekonomi masyarakat sekitar pantai.

Sebagai solusi untuk mencegah abrasi di Pantai Caruban, dirancang bangunan pelindung pantai. Satu komponen penting dari perencanaan ini adalah analisis jenis pasang surut untuk memperkirakan frekuensi dan tinggi air saat pasang dan surut, serta analisis tinggi gelombang untuk menghitung deformasi gelombang akibat refraksi dan *shoaling*. Berdasarkan parameter-parameter ini, bangunan pelindung pantai yang dipilih adalah *breakwater* lepas pantai. *Breakwater* atau bangunan pemecah gelombang memiliki fungsi untuk meredam energi gelombang sebelum mencapai pantai, melindungi pantai dari gelombang besar, meningkatkan keselamatan pengunjung, menciptakan area pantai yang lebih aman, serta mengurangi risiko kecelakaan akibat ombak besar. Selain itu juga *breakwater* berfungsi sebagai pengurangan transpor sedimen tegak lurus pantai.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tinggi dan periode gelombang rencana dalam analisis *hindcasting* gelombang dan analisis frekuensi di Pantai Caruban. Selain itu, penelitian ini juga menganalisis elevasi muka air rencana berdasarkan hasil perhitungan pasang surut dengan metode *Admiralty*. Analisis ini

penting untuk menentukan besar elevasi puncak, lebar, tebal, serta jumlah batu lapis pelindung pada bangunan pelindung pantai, menggunakan hasil analisis kala ulang 50 tahun pada jenis batu lapis lindung yaitu batu *tetrapod*, *dolos*, dan *boulder* di Pantai Caruban. Dengan mengacu pada parameter-parameter ini, perencanaan bangunan pelindung pantai di Pantai Caruban harus dianalisis secara efektif dan efisien, sehingga mampu melindungi pantai dari abrasi dan mempertahankan fungsinya sebagai destinasi wisata.

Pada penelitian ini, data tinggi gelombang didapatkan dengan analisis gelombang menggunakan analisis *hindcasting* dengan data angin 10 tahun dari tahun 2013-2022 pada laman pusat data *Copernicus Climate Change Service*. Data pasang surut diambil dengan panjang data 29 hari pada laman Sistem Referensi Geospasial Indonesia (SRGI) dan dianalisis dengan Metode *Admiralty*. Tipe bangunan pelindung pantai dipilih berdasarkan hasil analisis dengan parameter-parameter dalam pembangunan bangunan pelindung pantai serta menyesuaikan permasalahan pada Pantai Caruban.

2. METODE

Penelitian ini dilakukan dengan metode kuantitatif karena parameter dan data penelitian didapat melalui penggunaan instrumen yang menghasilkan data dalam bentuk angka.

2.1 Distribusi Frekuensi Gelombang

Distribusi frekuensi dilakukan guna menentukan apakah suatu dataset cocok dengan distribusi tertentu atau tidak cocok dengan distribusi lainnya berdasarkan data tinggi dan periode gelombang rencana yang didasari pada nilai-nilai koefisien variasi, koefisien *skewness*, dan koefisien *kurtosis* (Fauzi M. R., 2024). Angin dapat menghasilkan gesekan dengan air di permukaan laut dan dapat menghasilkan gelombang kecil yang dapat dikatakan dengan *capillary wave* (Trusina & Mirza, 2023) untuk memperoleh nilai distribusi frekuensi dapat menggunakan Persamaan 1, Persamaan 2, dan Persamaan 3.

$$\text{Koefisien Variasi (Cv)} = \frac{S}{\bar{X}} \quad (1)$$

$$\text{Koefisien Skewness (Cs)} = \frac{n \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{(n-1)(n-2)S^3} \quad (2)$$

$$\text{Koefisien Kurtosis (Ck)} = \frac{n^2 \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{(n-1)(n-2)(n-3)S^4} \quad (3)$$

dimana S adalah standar deviasi, \bar{X} adalah rata-rata, dan n merupakan banyaknya data.

Syarat pemilihan jenis distribusi sebaran yang memenuhi pada analisis frekuensi tertera di Tabel 1.

Tabel 1. Persyaratan pemilihan jenis distribusi sebaran frekuensi

No	Metode	Syarat
1	Normal	Cs ≈ 0 Ck = 3
2	Log Normal	Cs = 3 3Cv + Cv ² = 3 Ck = 5.383
3	Gumbel	Cs ≤ 1.1396 Ck ≤ 5.4002
4	Log Pearson III	Cs ≠ 0

Sumber: (Soewarno, 1995)

Uji kesesuaian distribusi digunakan untuk membandingkan distribusi data tinggi gelombang signifikan dan periode gelombang signifikan dengan distribusi yang diharapkan. Tujuannya adalah untuk mengevaluasi perbedaan antara data tinggi gelombang H₃₃ yang relevan dengan lokasi pantai yang ditinjau selama periode tahunan. Uji kesesuaian distribusi yang digunakan yaitu uji *Chi Square* dan Uji *Smirnov Kolmogorov*.

2.2 Distribusi Probabilitas Metode Fisher Tippet Type I

Dengan kala ulang yang sama, tinggi dan periode gelombang akan terus meningkat seiring dengan bertambahnya tahun. Semakin banyak data yang dianalisis, maka semakin tinggi tingkat akurasi hasil prediksi. Hal itu dikarenakan jumlah data yang tersedia dapat mempengaruhi probabilitas. Persamaan 4 digunakan pada metode *Fisher Tippet Type I*:

$$P(H_s \leq H_{sm}) = 1 - \frac{m - 0.44}{N_T + 0.12} \quad (4)$$

dimana P (H_s ≤ H_{sm}) adalah kemungkinan tinggi gelombang representatif terhadap m yang tidak dilampaui, H_{sm} adalah tinggi gelombang urutan ke m, m adalah urutan tinggi gelombang signifikan, dan N_T adalah banyaknya peristiwa gelombang selama pengamatan.

Perhitungan ini dasarnya dari analisis regresi linier dengan nilai y_m ditentukan dari Persamaan 5.

$$y_m = -\ln \{ -\ln P(H_s \leq H_{sm}) \} \quad (5)$$

Besaran gelombang signifikan diperoleh dari persamaan diatas untuk besaran y_r dihasilkan pada Persamaan 6.

$$y_r = -\ln \left\{ -\ln \left(1 - \frac{1}{L T_r} \right) \right\} \quad (6)$$

dimana y_m dan y_r merupakan faktor reduksi pada metode *Fisher Tippet Type I*

Dari fungsi distribusi probabilitas dapat ditentukan tinggi atau periode gelombang menggunakan Persamaan 7 sampai dengan Persamaan 10.

$$H_{sm} = A y_m + B \quad (7)$$

$$A = \frac{n \sum H_{sm} y_m - \sum H_{sm} \sum y_m}{n \sum y_m^2 - (\sum y_m)^2} \quad (8)$$

$$B = \bar{X} H_{sm} - A \times \bar{X} y_m \quad (9)$$

$$Hsr = A y_r + B \quad (10)$$

dimana A dan B adalah perkiraan dari parameter skala dan lokal yang diperoleh dari analisis regresi linier.

Interval kepercayaan dapat digunakan dalam analisis tinggi gelombang ekstrim yang diperoleh berdasarkan sebaran data dan juga nilai standar deviasi. Nilai deviasi standar yang dinormalkan dapat dihitung menggunakan Persamaan 11 sampai Persamaan 13.

$$\sigma H_s = \left[\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (H_{sm} - \bar{X} H_{sm})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$\sigma_{nr} = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[1 + \sigma (y_r - c + \varepsilon \ln v)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (12)$$

$$\alpha = \alpha_1 e^{\alpha_2 N^{1.3} + k \sqrt{-\ln v}} \quad (13)$$

Nilai koefisien empiris dalam menentukan periode ulang disajikan sesuai Tabel 2.

Tabel 2. Nilai koefisien empiris periode ulang

Distribusi	α ₁	α ₂	ε	c	K
FT-I	0.64	9.0	0.93	0.0	1.33
Weibull (k = 0.75)	1.65	11.4	-0.63	0.0	1.15
Weibull (k = 1.0)	1.92	11.4	0.00	0.3	0.90
Weibull (k = 1.4)	2.05	11.4	0.69	0.4	0.72
Weibull (k = 2.0)	2.24	11.4	1.34	0.5	0.54

Sumber: (Triadmodjo, 1999)

Nilai k untuk metode *Weibull* pada tabel di atas, merupakan parameter bentuk kurva distribusi *Weibull* (Dewi, Handini, Anggraeni, & Septiansyah, 2022). Penentuan kala ulang tahun yang dipakai, berdasarkan jenis konstruksi dan bangunan yang direncanakan serta nilai area konservasi (Maulidin & Tarigan, 2016).

Pada Tabel 3 menyajikan batas interval keyakinan yang dipakai dalam analisis.

Tabel 3. Nilai batas interval keyakinan

Tingkat Keyakinan (%)	Batas Interval Keyakinan terhadap H _{sr}	Probabilitas Batas Atas Terlampaui (%)
80	1.28 σ _r	10.0
85	1.44 σ _r	7.5
90	1.65 σ _r	5.0
95	1.96 σ _r	2.5
99	2.58 σ _r	0.5

Sumber: (Triadmodjo, 1999)

2.3 Pemilihan Jenis Kala Ulang

Dalam perencanaan bangunan pelindung pantai, bangunan yang dirancang harus mampu menahan gaya-gaya gelombang yang ada. Faktor yang mempengaruhi dalam penentuan rencana gelombang yaitu tipe bangunan, besaran biaya dalam pelaksanaan, dan daerah yang dilindungi. Periode gelombang

ditetapkan umumnya 10 sampai dengan 100 tahun seperti pada Tabel 4. Gelombang representatif dipilih berdasarkan tipe bangunan yang akan didirikan yaitu bangunan kaku, semi kaku, dan fleksibel (Direktorat Perhubungan Laut, 2023). Kondisi gelombang di laut dengan tipe gelombang *irregular* atau gelombang tidak teratur, cara yang digunakan untuk mengukur tinggi gelombang yaitu sama agar persepsi yang sama dengan keadaan sebenarnya (Farni, 2020).

Tabel 4. Pemilihan jenis dan periode gelombang rencana

Tipe Struktur	Jenis Bangunan	Tinggi Gelombang Representatif	Periode Gelombang
Kaku	Dinding Beton atau Kaison	H_1	10-100 Tahun
Semi Kaku	Sel Turap Baja	H_{10} sampai dengan H_1	10-100 Tahun
Fleksibel	Bangunan Tumpukan Batu	H_5 sampai dengan H_s	10-100 Tahun

Sumber: (Yuwono, 1992)

2.4 Transformasi Gelombang

Gelombang yang mengarah ke pantai akan mengalami terjadinya deformasi gelombang. Faktor yang mempengaruhi deformasi gelombang yaitu refraksi, refleksi, difraksi dan gelombang pecah (Wigati, Priyambodho, & Sasmita, 2018). Ketika gelombang mendekati daerah dengan kedalaman yang semakin dangkal, fenomena refraksi terjadi di mana gelombang membengkok dan mengikuti kontur dasar laut mempengaruhi tinggi gelombang di lokasi tertentu (Triatmodjo, 1999). Koefisien refraksi dan koefisien *shoaling* dapat diperoleh menggunakan Persamaan 14 dan Persamaan 15.

$$K_r = \frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha} \quad (14)$$

$$K_s = \frac{n_0 \times L_0}{n_L} \quad (15)$$

dimana K_r adalah nilai angka refraksi, α_0 adalah sudut yang terbentuk akibat garis puncak gelombang terhadap garis kontur dasar laut pada titik yang diamati, dan α adalah sudut antara garis puncak gelombang di laut dalam dan garis pantai.

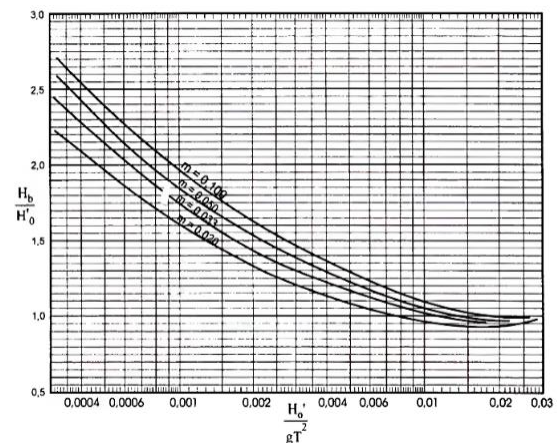
Transformasi terjadi ketika gelombang mengalami perpindahan ke perairan yang lebih dangkal yang semula berada di laut menyebabkan terjadinya perbedaan dalam tinggi dan kecepatan gelombang yang datang, serta arahnya. Deformasi gelombang dapat dianalisis melalui pertimbangan akan konsep tinggi gelombang di laut dalam Dimana gelombang tersebut tidak mengalami refraksi (Triatmodjo, 1999). Deformasi gelombang dapat dihitung dengan Persamaan 16.

$$H'_0 = K_s \times K_r \times H_0 \quad (16)$$

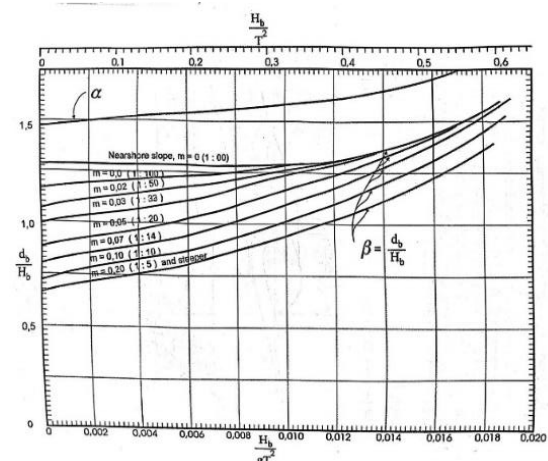
dimana H'_0 adalah tinggi gelombang laut dalam ekuivalen, H_0 adalah tinggi gelombang laut dalam, K_s adalah koefisien *shoaling*, dan K_r adalah koefisien refraksi.

2.5 Gelombang Pecah

Proses pecahnya gelombang dimulai dari keadaan yang tidak stabil menjadikan gelombang pecah seutuhnya untuk jarak yang dilambangkan dengan X_p (CECR, 1984). Ketinggian gelombang pecah yang berbeda dapat ditentukan berdasarkan tabel tabel persamaan d/L . Gelombang pecah dapat dihitung dengan parameter kondisi gelombang yaitu gelombang representatif dan gelombang kala ulang (Ichsan, Anesya, P, & Nugroho, 2017). Perhitungan mengacu pada grafik yang tersedia yaitu grafik yang menyatakan hubungan antara H'_0/gT^2 dan H_b/gT^2 (Triatmodjo, 1999). H_b diperoleh dari hasil plot antara nilai H'_0/gT^2 dan kemiringan pantai (m) pada Gambar 1. sedangkan Nilai D_b didapat dari hasil plot antara nilai H_b/gT^2 dengan kemiringan pantai (m) pada Gambar 2.



Gambar 1. Grafik hubungan antara H_b/H'_0 dan H'_0/gT^2 (Triatmodjo, 1999)



Gambar 2. Hubungan α dan β dengan H_b/gT^2 (Triatmodjo, 1999)

2.6 Pasang Surut Metode *Admiralty*

Perubahan tinggi muka air secara periodik atau pasang surut ialah data yang mengukur fluktuasi muka air laut disaat muka air mencapai ketinggian maksimum (pasang) dan ketinggian minimum (surut) (Riandi, Ikhsan, & Amir, 2015). Pasang surut adalah fluktuasi permukaan laut yang disebabkan oleh gaya tarik gravitasi antara Bumi, Bulan, dan Matahari terhadap massa air laut di bumi. Peranan pasang surut berpengaruh terhadap proses-proses di dalam ruang dan waktu yang terjadi pada wilayah perairan (Mardika, 2021). Muara sungai juga mempunyai peran untuk menerobos debit yang disebabkan oleh pasang surut dan debit tersebut bisa lebih besar dari debit sungai yang dibawa (Werdi & Eryani, 2020). Berikut merupakan persamaan dari bilangan *formzahl* pada persamaan 17.

$$F = \frac{O_1 + K_1}{M_2 + S_2} \quad (17)$$

dimana F adalah angka *formzahl*, K_1 dan O_1 adalah konstanta pasang surut harian utama, dan M_2 dan S_2 adalah konstanta pasang surut ganda utama.

1. Pasang surut harian ganda ($F \leq 0.25$)
Pasang surut jenis ini terjadi saat 2 kali dengan tinggi yang sama dengan periode rata-rata yaitu 12 jam 24 menit.
2. Pasang surut harian tunggal ($F > 3$)
Pasang surut jenis ini terjadi 1 kali dalam waktu sehari dengan periode 24 jam 50 menit.
3. Pasang surut campuran condong ke harian ganda ($0.25 < F \leq 1.5$)
Pasang surut jenis ini terjadi dua kali pasang surut. namun tinggi dan periodenya berbeda.
4. Pasang surut campuran condong ke harian tunggal ($1.5 < F \leq 3$)
Pasang surut ini terjadi 1 kali, tapi dalam beberapa waktu juga terjadi 2 kali dengan tinggi dan periode yang jauh berbeda.

Metode *Admiralty* merupakan salah satu pendekatan guna menganalisis pasang surut yang memiliki kelebihan dalam memproses data pendek pasang surut. baik selama periode 15 hari maupun 29 hari. dan dapat menghasilkan konstanta-konstanta pasang surut yang dibutuhkan untuk menentukan jenis pasang surut dan elevasi muka air laut (Hikmah, Arisanti, & Irmawan, 2020). Penentuan tipe pemilihan bangunan pantai dirangkam pada Tabel 5 menunjukkan tujuan dan fungsi utama pengaman pantai.

Tabel 5. Penentuan tipe pemilihan bangunan pantai

Struktur	Tujuan	Fungsi Utama
Tanggul laut (<i>sea dike</i>)	Melindungi daratan pantai rendah terhadap genangan air pasang. gelombang dan badai	Pengaman daratan pantai rendah terhadap genangan air pasang. gelombang dan badai
Tembok laut (<i>sea wall</i>)	Mencegah/mengurangi limpasan dan genangan areal pantai yang berada di belakangnya	Perkuatan pada bagian profil tertentu
<i>Revetment</i>	Melindungi profil pantai dengan kemiringan alami	Perlindungan pada profil pantai yang tererosi
Pemecah gelombang (<i>breakwater</i>)	Mengurangi energi (gaya-gaya) gelombang di belakang struktur	Peredam energi gelombang di belakang struktur dan pengurangan transpor sedimen tegak lurus pantai
Terumbu buatan (<i>reef breakwater</i>)	Mencegah erosi pantai	Penurunan terhadap tinggi gelombang di pantai
Ambang terendam (<i>submerged sills</i>)	Mencegah erosi pantai	Perlambatan terhadap angkutan sedimen ke arah laut
Krib (<i>groin</i>)	Menstabilkan bentang pantai alami atau buatan	Pengaruh arus angkutan sedimen sejajar pantai
Jeti (<i>jetty</i>)	Menstabilkan alur pelayaran pada muara sungai dan tidal inlet	Pengaruh arus aliran sungai dan arus pasang surut
Pengisian pasir (<i>sand nourishment</i>)	Mencegah erosi pantai dan melindungi pantai dari penggerusan	Pengganti suplai sedimen pantai dan material dune secara alami yang tererosi oleh gelombang arus

Sumber: (Yuwono, 1992)

2.7 Design Water Level

Sebuah konstruksi harus dapat menahan tekanan air yang diperoleh dari perubahan tinggi muka air dari waktu ke waktu, salah satunya saat terjadi banjir maupun gelombang dengan skala besar. Untuk itu, rumus yang digunakan untuk memastikan Tingkat Air Desain (DWL) adalah sebagai berikut (Fauzi, Mardika, Fatkhurrozi, & Martino, 2024) dengan menggunakan Persamaan 18.

$$DWL = HHWL + S_w + SLR \quad (18)$$

dimana DWL adalah ketinggian muka air rencana, S_w adalah *Wave set-up* dan SLR adalah naiknya ketinggian muka air laut disebabkan oleh *global warming* (*Sea Level Rise*).

Gelombang pecah mengakibatkan penurunan elevasi rata-rata dibandingkan dengan elevasi muka air diam. Di sepanjang garis pantai, permukaan air rata-rata kemudian naik secara miring dari titik pecah gelombang ke arah pantai (Jasin & Mamoto, 2017) menggunakan Persamaan 19.

$$S_w = 0.19 \left[1 - 2.82 \sqrt{\frac{H_b}{gT^3}} \right] H_b \quad (19)$$

dimana S_w adalah *water set-up*, H_b adalah gelombang pecah, dan T adalah periode.

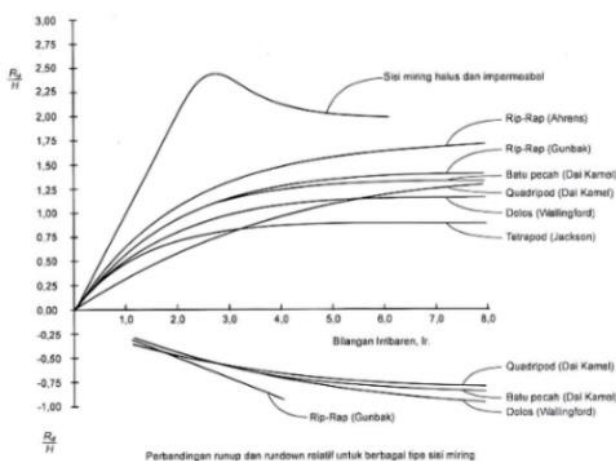
2.8 Elevasi

Elevasi rencana dianalisis dengan mempertimbangkan tinggi *run-up* (R_u) yang merupakan tinggi gelombang maksimum setelah gelombang menghantam bangunan pelindung pantai menggunakan Persamaan 20.

$$I_r = \frac{\tan \theta}{\left(\frac{H}{L_0}\right)^{0.5}} \quad (20)$$

dimana I_r merupakan bilangan *Iribarren*, θ adalah nilai kemiringan pada sisi struktur, H adalah tinggi gelombang pada lokasi bangunan, dan L_0 adalah panjang gelombang di laut dalam.

Tinggi *Run* akan susah jika didapatkan melalui analisis. Oleh karena itu, digunakan acuan yaitu grafik hubungan bilangan *Iribarren* dan R_u/H serta R_d/H pada Gambar 3.



Gambar 3. Grafik penentuan *run up* dan *run down* gelombang (Triatmodjo, 1999)

Selanjutnya, dihitung elevasi maksimum dari bangunan pelindung pantai menggunakan Persamaan 21.

$$\text{Elevasi} = DWL + R_u + W \quad (21)$$

dimana DWL adalah elevasi muka air rencana, R_u adalah *Run-up* gelombang, dan W adalah tinggi jagaan (0,5 - 1,5m).

2.9 Dimensi

Dimensi bangunan pelindung pantai merupakan ukuran atau bentuk khusus yang dirancang khusus untuk meredam atau memecahkan gelombang laut sebelum mencapai wilayah pantai atau pelabuhan. Pada dimensi bangunan pelindung pantai ada beberapa hal yang ditinjau antara lain:

1. Stabilitas batu lapis pelindung perencanaan bangunan pelindung pantai dapat ditentukan berat butir batu pelindung dengan menggunakan Persamaan 22 Hudson (Nurqolis & Pratiwi, 2020).

$$W = \frac{\gamma_r \times H^3}{K_D \times (S_r - 1)^3 \cot \theta} \quad (22)$$

dimana W adalah *armor weight* (ton), H adalah tinggi dari gelombang rencana (m), γ_r adalah berat jenis armor (ton/m³), dan K_D adalah koefisien stabilitas armor yang digunakan.

2. Lebar puncak bangunan pelindung pantai ditentukan oleh batas limpasan yang diizinkan dan kebutuhan operasional peralatan selama masa pembangunan dan perbaikan. Lebar puncak dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 23.

$$B = n K_\Delta \times \left(\frac{W}{\gamma_r} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (23)$$

dimana B adalah lebar puncak (m), n adalah jumlah lapisan, K_Δ adalah koefisien lapis, W adalah berat minimal armor, dan γ_r adalah berat jenis batu pelindung (ton/m³).

3. Tebal lapis pelindung memiliki tujuan sebagai memperkuat puncak konstruksi, meningkatkan ketinggian puncak konstruksi, dan menyediakan akses jalan guna pemeliharaan. Untuk menghitung tebal lapis pelindung dan jumlah butir batu tiap satu luasan dapat menggunakan Persamaan 24 dan Persamaan 25.

$$t = n K_\Delta \times \left(\frac{W}{\gamma_r} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (24)$$

$$N = A n K_\Delta \times \left[1 - \frac{P}{100} \right] \left(\frac{\gamma_r}{W} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (25)$$

dimana t adalah tebal lapis pelindung (m), n jumlah lapis batu dalam lapis pelindung (n minimal 2), K_Δ adalah koefisien lapis, P adalah porositas, W adalah berat minimal armor, A

diambil sebesar 10 m^2 dan γ_r adalah berat jenis batu pelindung (ton/m^3).

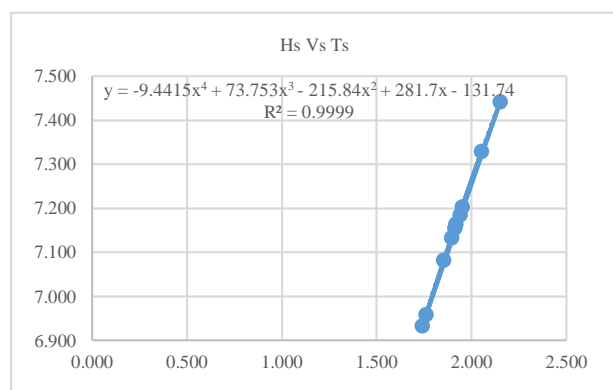
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Tinggi Gelombang Signifikan

Metode dalam memetakan kekuatan energi laut adalah dengan mendapatkan nilai tinggi gelombang signifikan (Ayu Wulansari Pramita, 2020). Tinggi gelombang signifikan (H33) merupakan hasil yang didapatkan dari 33.33% data gelombang yang diurutkan dari terbesar ke terkecil dari total keseluruhan gelombang yang tercatat selama 1 tahun. Rekapitulasi hasil analisis selama 10 tahun terhadap tinggi gelombang signifikan tertera pada Tabel 6. Grafik hubungan Hs Vs Ts disajikan pada Gambar 4.

Tabel 6. Rekapitulasi tinggi gelombang dan periode gelombang signifikan 10 tahun

Tahun	Hs	Ts
2013	1.941	7.185
2014	1.952	7.203
2015	2.152	7.443
2016	1.741	6.933
2017	1.895	7.133
2018	1.911	7.155
2019	2.054	7.330
2020	1.919	7.165
2021	1.854	7.082
2022	1.759	6.959



Gambar 4. Grafik hubungan Hs Vs Ts

3.2 Distribusi Frekuensi Gelombang

Analisis distribusi frekuensi dilakukan untuk mengetahui sebaran distribusi yang dianalisis berdasarkan nilai Cs dan Ck dengan persyaratan sesuai dengan Tabel 1. Adapun metode dan uji statistik yang dilakukan yakni Uji *Chi-Square* dan Uji *Smirnov Kolmogorov* (Sujatmoko, 2020). Rekapitulasi sebaran distribusi yang lolos syarat menurut parameter-parameter yang sudah didapat disajikan pada Tabel 7.

Tabel 7. Rekapitulasi penentuan jenis distribusi frekuensi

No	Metode	Syarat	Hasil Perhitungan	Kesimpulan
1	Normal	$Cs \approx 0$	0.417	Tidak Memenuhi
		$Ck = 3$	4.313	Tidak Memenuhi
		$Cs = 3$	0.417	Tidak Memenuhi
2	Log Normal	$3Cv + Cv^2 = 3$	0.304	Tidak Memenuhi
		$Ck = 5.383$	4.162	Tidak Memenuhi
		$Cs \leq 1.1396$	0.417	Memenuhi
3	Gumbel	$Ck \leq 5.4002$	4.313	Memenuhi
4	Log Pearson III	$Cs \neq 0$	0.251	Memenuhi

Distribusi yang lolos dari persyaratan merupakan distribusi *Gumbel* dan *Log Pearson III*. Namun ditinjau dari nilai Xt pada kala ulang 50 Tahun, didapatkan nilai Xt pada distribusi *Gumbel* sebesar 2.359 dan pada distribusi *Log Pearson III* sebesar 2.2. Oleh karena itu, dipilih nilai Xt yang terbesar yaitu distribusi *Gumbel*. Langkah selanjutnya dipilih Selanjutnya akan dianalisis pada uji keselarasan distribusi melalui Uji *Chi-Square* dan Uji *Smirnov Kolmogorov* guna mengetahui data tersebut memenuhi persyaratan atau tidak. Selanjutnya, melakukan pengolahan periode ulang dengan metode *Fisher Tippett Type I*.

3.3 Uji Chi Square

Dalam menganalisis keselarasan suatu distribusi sebaran yang memenuhi, digunakan uji *Chi Square*. Sebelum mencari X^2_{Cr} , harus mencari nilai xi maksimum dan xi min untuk distribusi *Gumbel*. Hasil X^2_{Cr} analisis metode *Gumbel* dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Hasil X^2_{Cr} analisis distribusi *gumbel*

Xi	Nilai Batas	Ti	Batas	EF	OF	EF - OF	(EF - OF) ²	(EF - OF) ² / EF
1.741	1.68	< x <	1.8	2	2	0	0	0
1.759								
1.854								
1.895								
1.911								
1.919	1.8	< x <	1.93	2	4	-2	4	2
1.941								
1.952								
2.054	1.93	< x <	2.05	2	2	0	0	0
2.152								
	2.05	< x <	2.17	2	2	0	0	0
Jumlah				8	10	-2	4	2

Hasil perhitungan data tinggi gelombang signifikan metode *Gumbel* diperoleh nilai X^2_{Cr} analisis sebesar 2. Dengan demikian data tinggi gelombang signifikan metode tersebut memenuhi syarat dikarenakan X^2_{Cr} analisis < dari harga nilai kuadrat kritis.

3.4 Uji Smirnov Kolmogorov

Smirnov Kolmogorov dimanfaatkan dalam menganalisis ketidaksesuaian data terhadap distribusi

yang diharapkan secara horizontal. Pada Tabel 9 terdapat rekapitulasi perhitungan tinggi gelombang signifikan menggunakan uji *Smirnov Kolmogorov*.

Tabel 9. Hasil uji *smirnov kolmogorov* distribusi *gumbel*

Tahun	$X_{i \max}$	M	P(X)	P(X<)	P'(X)	P'(X<)	ΔP
2016	1.741	1	0.0909	0.9091	0.1111	0.8889	0.0202
2022	1.759	2	0.1818	0.8182	0.2222	0.7778	0.0404
2021	1.854	3	0.2727	0.7273	0.3333	0.6667	0.0606
2017	1.895	4	0.3636	0.6364	0.4444	0.5556	0.0808
2018	1.911	5	0.4545	0.5455	0.5556	0.4444	0.1010
2020	1.919	6	0.5455	0.4545	0.6667	0.3333	0.1212
2013	1.941	7	0.6364	0.3636	0.7778	0.2222	0.1414
2014	1.952	8	0.7273	0.2727	0.8889	0.1111	0.1616
2019	2.054	9	0.8182	0.1818	1.0000	0.0000	0.1818
2015	2.152	10	0.9091	0.0909	1.1111	-0.1111	0.2020
Δ_{\max}							0.2020
Δ_{kritis}							0.40925

Untuk Δ_{\max} , dengan menggunakan derajat signifikansi (α) = 5%, diperoleh harga *Smirnov Kolmogorov* sebesar 0.40925. Dari hasil perhitungan diatas diperoleh hasil $\Delta_{\max \text{ analysis}} = 0.2020 < \Delta_{\text{kritis}}$ tabel = 0.40925, karena hasil nilai $\Delta_{\max \text{ analysis}} <$ dari Δ_{kritis} tabel, maka nilai perhitungan lebih baik dan memenuhi syarat.

3.5 Distribusi Probabilitas Metode *Fisher Tippet Type I*

Setelah melakukan analisis frekuensi dan distribusi yang memenuhi adalah distribusi *Gumbel* maka dilakukan metode *Fisher-Tippet Type I* untuk memilih sebaran kemungkinan distribusi. Pada Tabel 10 dan Tabel 11 dapat dilihat hasil rekapitulasi analisis gelombang rencana menggunakan *Fisher Tippet Type I*.

Tabel 10. Hasil perhitungan metode *fisher tippet type I* parameter A dan B

No. Urut	Tahun	Hsm (m)	N_T	P	Ym	Hsm.Ym	Ym^2	A	B
1	2015	2.152	10	0.945	2.866	6.167	8.214	0.102	1.863
2	2019	2.054		0.846	1.787	3.671	3.194		
3	2014	1.952		0.747	1.232	2.406	1.518		
4	2013	1.941		0.648	0.836	1.622	0.699		
5	2020	1.919		0.549	0.513	0.984	0.263		
6	2018	1.911		0.451	0.227	0.433	0.051		
7	2017	1.895		0.352	-0.044	-0.083	0.002		
8	2021	1.854		0.253	-0.318	-0.590	0.101		
9	2022	1.759		0.154	-0.626	-1.101	0.392		
10	2016	1.741		0.055	-1.063	-1.850	1.129		
Rata-rata		1.918		0.500	0.500	0.541	1.166	1.556	
Jumlah		19.178		5.000	5.000	5.410	11.658	15.564	

Tabel 11. Hasil perhitungan gelombang rencana (H_{sr}) periode ulang metode *fisher tippet type I*

Periode Ulang (T_r)	Y_r	H_{sr}	σ_{nr}	σ_{Hs}	σ_r	$H_s - 1.28\sigma_r$	$H_s + 1.28\sigma_r$
10	2.250	2.091	0.780	0.123	0.096	1.969	2.214
25	3.199	2.188	1.062		0.131	2.020	2.355
50	3.902	2.259	1.277		0.157	2.058	2.460

Standar deviasi diperoleh dari data tinggi gelombang sebesar (σ_{Hs}) sebesar 0.123. maka diperoleh interval keyakinan pada kala ulang 50 tahun sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\sigma_{nr} &= \frac{1}{\sqrt{N}} \left[1 + \alpha (y_r - c + \varepsilon \ln v) \right]^2 \\ &= \frac{1}{\sqrt{10}} \left[1 + 1.005 (3.902 - 0 + 1.33 \ln 1) \right]^2 \\ &= 1.277 \\ \sigma_r &= \sigma_{nr} \times \sigma_{Hs} \\ &= 1.277 \times 0.123 \\ &= 0.157\end{aligned}$$

Dengan periode ulang 50 tahun Tinggi gelombang akan direncanakan dengan tingkat keyakinan sebesar 80% sebagai berikut:

$$\begin{aligned}H_r &= H_{sr} + 1.28 \sigma_r \\ &= 2.21 + (1.28 \times 0.157) \\ &= 2.46 \text{ meter}\end{aligned}$$

Untuk mendapatkan nilai periode gelombang rencana digunakan persamaan regresi yang didapatkan dari grafik pada Gambar 4. yaitu grafik hubungan H_s dan T_s . Berikut perhitungan nilai periode gelombang rencana:

$$\begin{aligned}T_r &= -9.4415 (H_s)^4 + 73.753 (H_s)^3 - 215.84 (H_s)^2 \\ &\quad + 281.7 (H_s) - 131.74 \\ &= -9.4415 (2.460)^4 + 73.753 (2.460)^3 - 215.84 \\ &\quad (2.460)^2 + 281.7 (2.460) - 131.74 \\ &= 7.256 \text{ detik}\end{aligned}$$

3.6 Transformasi Gelombang

Data angin didapat dari laman *Copernicus Climate Change Service* dengan rentang waktu 10 tahun dari tahun 2013-2022 pada elevasi -40 m pada koordinat -6.43 Lintang Selatan dan 111.42 Bujur Timur. Dalam meramalkan gelombang, Kecepatan angin diambil pada ketinggian 10 m (Surayawan, Eryani, & Rahadiani, 2019) Berikut merupakan perhitungan refraksi pada kedalaman 40 meter:

1. Menghitung nilai $\sin \alpha$ dan $\cos \alpha$

$$\begin{aligned}\sin \alpha &= \left(\frac{C}{C_0}\right) \sin \alpha_0 \\ &= \left(\frac{10.98 \text{ m/s}}{11.32 \text{ m/s}}\right) (0.97) \\ &= 0.94 \\ \alpha &= 70^\circ \\ \cos \alpha &= 0.35\end{aligned}$$

2. Menghitung nilai koefisien refraksi (K_r) sesuai dengan persamaan 14.

$$\begin{aligned}K_r &= \sqrt{\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha}} \\ &= \sqrt{\frac{0.26}{0.35}} \\ &= 0.86\end{aligned}$$

3. Mencari nilai koefisien pendangkalan K_s dengan tabel L-1 nilai d/L dalam pertambahan nilai d/L_0 teknik pantai.

$$K_s = 0.990$$

4. Menghitung nilai H^*0 sesuai dengan persamaan 16.

$$\begin{aligned}H^*0 &= K_s \times K_r \times H_0 \\ &= 0.990 \times 0.86 \times 2.46 \text{ m} \\ &= 2.10 \text{ m}\end{aligned}$$

Tabel 12. Rekapitulasi tinggi gelombang deformasi

d	ao	sin ao	cos ao	Ho	To	Lo	Co	d/Lo	d/L	L	C	sin α	α	cos α	Kr	Ks	H'0
40	75	0.97	0.26	2.46	7.256	82.14	11.32	0.500	0.502	79.71	10.98	0.94	70	0.35	0.86	0.990	2.10
35	27	0.45	0.89	2.10	7.382	85.00	11.52	0.412	0.424	82.53	11.18	0.44	26	0.90	1.00	0.979	2.05
30	26	0.44	0.90	2.05	7.319	82.53	11.28	0.364	0.371	80.87	11.05	0.43	25	0.90	1.00	0.968	1.98
25	5	0.09	1.00	1.98	7.231	80.87	11.18	0.309	0.320	78.06	10.80	0.08	5	1.00	1.00	0.952	1.88
20	14	0.24	0.97	1.88	7.115	78.06	10.97	0.256	0.273	73.23	10.29	0.23	13	0.97	1.00	0.934	1.75
15	14	0.24	0.97	1.75	6.951	73.23	10.54	0.205	0.229	65.41	9.41	0.22	12	0.98	1.00	0.919	1.61
10	1	0.02	1.00	1.61	6.666	65.41	9.81	0.153	0.186	53.82	8.07	0.01	1	1.00	1.00	0.913	1.47
5	57	0.84	0.54	1.47	6.128	53.82	8.78	0.093	0.135	37.08	6.05	0.58	35	0.82	0.82	0.939	1.13
4	7	0.12	0.99	1.13	1.902	37.08	19.50	0.108	0.148	27.05	14.22	0.09	5	1.00	1.00	0.927	1.04
3	7	0.12	0.99	1.04	21.967	27.05	1.23	0.111	0.150	19.94	0.91	0.09	5	1.00	1.00	0.920	0.96
2	9	0.16	0.99	0.96	12.693	19.94	1.57	0.100	0.141	14.19	1.12	0.11	6	0.99	1.00	0.933	0.89
1	37	0.60	0.80	0.89	5.904	14.19	2.40	0.070	0.114	8.78	1.49	0.37	22	0.93	0.93	0.971	0.80

Berdasarkan hasil perhitungan pada Tabel 12. refraksi dimulai dari elevasi lokasi tinjauan yaitu 40 meter dan pada kedalaman 1 meter merupakan berakhirnya pengamatan pembiasan. Didapatkan koefisien refraksi (K_r) sebesar 0.93. Berdasarkan nilai d/L_0 sebesar 0.070 didapatkan nilai koefisien pendangkalan (K_s) sebesar 0.971. Maka dapat ditentukan nilai tinggi gelombang deformasi sebesar 0.8 meter.

3.7 Gelombang Pecah

Gelombang pecah merupakan rambatan gelombang dari laut dalam mengarah ke pantai dan terjadinya deformasi gelombang yaitu puncak gelombang semakin runcing lalu gelombang tersebut pecah. Berikut merupakan rekapitulasi perhitungan kedalaman gelombang pecah pada kala ulang 50 tahun disampaikan pada Tabel 13.

Tabel 13. Kedalaman gelombang pecah pada periode ulang 50 tahun

H'0 (m)	T0 (s)	g (m/s ²)	H'0/gT ²	Hb/H'0	Hb
1.13	1.90	9.81	0.03	0.975	1.09

Berdasarkan perhitungan pada Tabel 13 perencanaan bangunan pelindung pantai dibangun pada elevasi 5 meter dengan kemiringan pantai yaitu 0.006. didapatkan angka tinggi gelombang pecah sebesar 1.90 meter. Dengan demikian didapatkan pula kedalaman gelombang pecah sebesar 1.42 meter dengan jarak yang ditempuh selama proses gelombang pecah (X_b) sebesar 216.88 meter.

3.8 Pasang Surut Metode Admiralty

Data pasang surut didapatkan dari laman Sistem Referensi Geospasial Indonesia (SRGI) pada elevasi 10 meter dengan koordinat -6.664 Lintang Selatan dan 111.427 Bujur Timur. Metode Admiralty merupakan metode yang dilakukan untuk menganalisis konstanta pasang surut harmonik dari pengamatan ketinggian air laut tiap jam selama 15 piantan (15 hari) atau 29 piantan (29 hari) (Pasaribu, Sewiko, & Arifin, 2022). Tabel 14 menyajikan hasil rekapitulasi pasang surut metode Admiralty.

Tabel 14. Sembilan komponen pasang surut

Komponen	A (cm)	g (°)
So	0.10503	
M2	7.7	290.4
S2	5.2	191.2
N2	2.3	260.2
K2	1.2	191.2
K1	45.2	211.2
O1	18.6	124.1
P1	14.9	211.2
M4	0.09	194.8
MS4	0.547	175.3

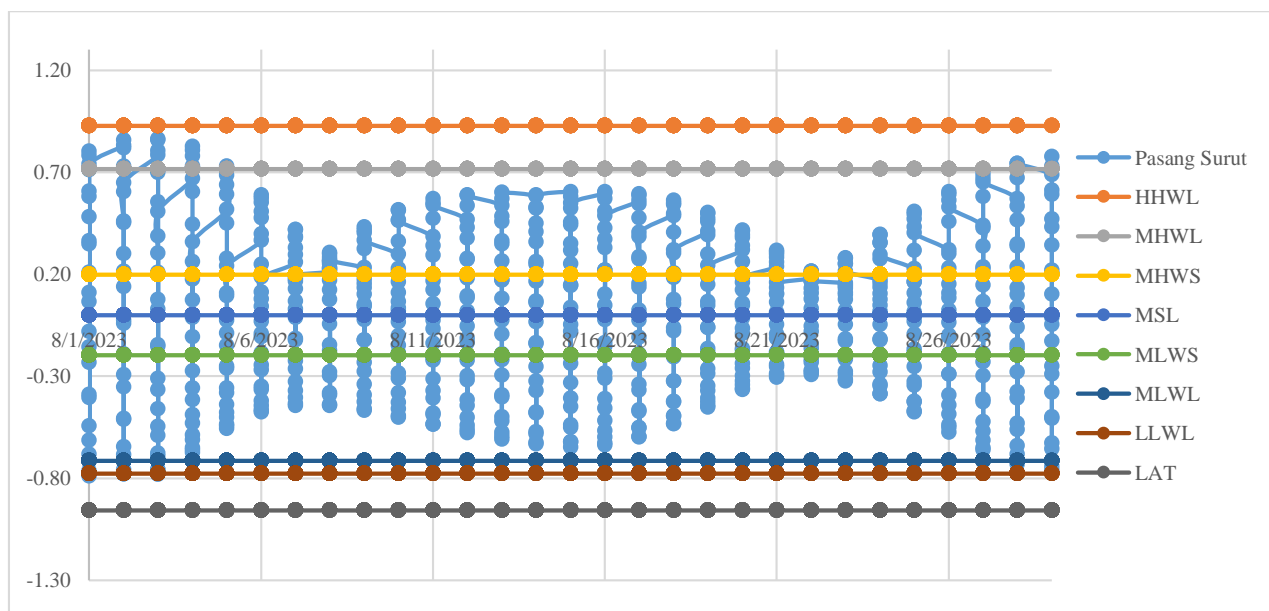
Setelah mendapatkan komponen-komponen utama pasang surut. Setelah itu melakukan perhitungan untuk mengetahui parameter-parameter elevasi muka air.

$$\begin{aligned}
 \text{HHWL} &= S_0 + (M_2 + S_2 + K_2 + K_1 + O_1 + P_1) \\
 &= 0.105 + (7.7 + 5.2 + 1.2 + 45.2 \\
 &\quad + 18.6 + 14.9) \\
 &= 92.9 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

Tabel 15. Rekapitulasi elevasi muka air

Elevasi Penting (m)	Adjust
HHWL	0.93
MHWL	0.72
MHWS	0.20
MSL	0.0011
MLWS	-0.197
MLWL	-0.71
LLWL	-0.78
LAT	-0.957
<i>Formzahl</i>	4.9471

Berdasarkan perhitungan pada Tabel 15. didapatkan bilangan *formzahl* sebesar 4.94 dimana $F > 3$ termasuk klasifikasi pasang surut harian tunggal yang terjadi satu kali pasang surut dalam satu hari dengan periode pasang surut adalah 24 jam 50 menit. Setelah itu menganalisis elevasi-elevasi muka air dengan komponen pasang surut dan dihasilkan elevasi yang sudah di *adjust* atau disesuaikan dengan titik 0 yaitu HHWL sebesar 0.928 meter dan LLWL sebesar -0.778 meter. Grafik pasang surut dapat dilihat pada Gambar 5.

**Gambar 5.** Grafik pasang surut

3.9 Penentuan Tipe Bangunan Pantai

Breakwater lepas pantai dipilih untuk melindungi Pantai Caruban sebagai destinasi wisata karena dapat meredam energi gelombang yang mencapai pantai, meningkatkan keselamatan wisatawan dan menjaga infrastruktur serta estetika pantai. Rencananya *breakwater* akan dibangun pada elevasi -5 meter, sebelum gelombang pecah, sepanjang garis Pantai Caruban yang berjarak sekitar 1 kilometer dengan jarak garis pantai ke elevasi 5 meter sebesar 760.1 meter. *Breakwater* sepanjang 350 meter akan dibangun dalam tiga seri, dengan

lebar celah minimal dua kali panjang gelombang, yaitu 107.64 meter.

3.10 Design Water Level

Berikut merupakan perhitungan muka air rencana akibat dari pasang surut tertinggi serta kenaikan muka air laut akibat *wave set-up* dengan parameter berikut:

$$\begin{aligned}
 H_b &= 1.09 \text{ m} \\
 T_0 &= 1.902 \text{ s} \\
 g &= 9.81 \text{ m/s}^2
 \end{aligned}$$

$$HHWL = 0.928 \text{ m}$$

1. Menghitung *wave set-up* menggunakan persamaan (19).

$$\begin{aligned} S_w &= 0.19 \left[1 - 2.82 \sqrt{\frac{H_b}{g T^2}} \right] H_b \\ &= 0.19 \left[1 - 2.82 \sqrt{\frac{1.09 \text{ m}}{9.81 \text{ m/s}^2 (1.902)^2}} \right] 1.09 \text{ m} \\ &= 0.11 \text{ m} \end{aligned}$$

2. Menghitung nilai kenaikan muka air laut akibat pemanasan global *Sea Level Rise* (SLR)

$$\begin{aligned} SLR &= \frac{42-18}{100} \\ &= 0.24 \text{ m} \end{aligned}$$

3. Menghitung besar tinggi muka air laut rencana dengan menggunakan persamaan 2.54.

$$\begin{aligned} DWL &= HHWL + S_w + SLR \\ &= 0.928 \text{ m} + 0.12 \text{ m} + 0.24 \text{ m} \\ &= 1.29 \text{ m} \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan di atas, didapatkan besar *Design Water Level* (DWL) sebesar 1.29 meter.

3.11 Elevasi

Elevasi merupakan ketinggian yang disesuaikan dengan kondisi tinggi gelombang, muka air laut, serta jenis lapis lindung yang digunakan. Adapun perhitungan elevasi bangunan *breakwater* pada beberapa jenis lapis lindung:

1. Perhitungan elevasi *breakwater* menggunakan lapis lindung *tetrapod*

$$\begin{aligned} H'_0 &= 1.13 \text{ m} \\ T_r &= 1.90 \text{ s} \\ L_0 &= 1.56 \times T^2 \\ &= 1.56 \times (1.90)^2 \\ &= 5.64 \text{ m} \\ I_r &= \frac{\tan \theta}{\left(\frac{H}{L_0}\right)^{0.5}} \\ &= \frac{0.79}{\left(\frac{1.13}{53.82}\right)^{0.5}} \\ &= 1.76 \\ Ru/H &= 0.65 \text{ (Sesuai Gambar 3)} \\ Ru &= \frac{Ru}{H} \times H \\ &= 0.65 \times 1.13 \text{ m} \\ &= 0.73 \text{ m} \\ W &= \text{Tinggi kebebasan sebesar } 0.5 \text{ m} \\ DWL &= 1.27 \text{ m} \\ Elv_{Tetrapod} &= Ru + W + DWL \\ &= 0.73 \text{ m} + 0.5 \text{ m} + 1.27 \text{ m} \\ &= 2.60 \text{ m} \end{aligned}$$

2. Perhitungan elevasi *breakwater* menggunakan lapis lindung *dolos*

$$\begin{aligned} H'_0 &= 1.13 \text{ m} \\ T_r &= 1.90 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_0 &= 1.56 \times T^2 \\ &= 1.56 \times (1.90)^2 \\ &= 5.64 \text{ m} \\ I_r &= \frac{\tan \theta}{\left(\frac{H}{L_0}\right)^{0.5}} \\ &= \frac{0.55}{\left(\frac{1.13}{5.64}\right)^{0.5}} \\ &= 1.22 \\ Ru/H &= 0.6 \text{ (Sesuai Gambar 3)} \\ Ru &= \frac{Ru}{H} \times H \\ &= 0.6 \times 1.13 \text{ m} \\ &= 0.68 \text{ m} \\ W &= 0.5 \text{ m} \\ DWL &= 1.27 \text{ m} \\ Elv_{Dolos} &= Ru + W + DWL \\ &= 0.68 \text{ m} + 0.50 \text{ m} + 1.27 \text{ m} \\ &= 2.50 \text{ m} \end{aligned}$$

3. Perhitungan elevasi *breakwater* menggunakan lapis lindung *boulder*

$$\begin{aligned} H'_0 &= 1.13 \text{ m} \\ T_r &= 1.90 \text{ s} \\ L_0 &= 1.56 \times T^2 \\ &= 1.56 \times (1.90)^2 \\ &= 5.64 \text{ m} \\ I_r &= \frac{\tan \theta}{\left(\frac{H}{L_0}\right)^{0.5}} \\ &= \frac{0.55}{\left(\frac{1.13}{53.82}\right)^{0.5}} \\ &= 1.76 \\ Ru/H &= 1.3 \\ Ru &= \frac{Ru}{H} \times H \\ &= 1.3 \times 1.13 \text{ m} \\ &= 1.46 \text{ m} \\ W &= 0.5 \text{ m} \\ DWL &= 1.27 \text{ m} \\ Elv_{Boulder} &= Ru + W + DWL \\ &= 1.46 \text{ m} + 0.50 \text{ m} + 1.27 \text{ m} \\ &= 3.30 \text{ m} \end{aligned}$$

Berdasarkan perhitungan elevasi menggunakan Persamaan 20 dan Persamaan 21 didapatkan nilai elevasi bangunan yang sesuai dengan bilangan *irribaren* dimana nilai *run up* gelombang ditentukan oleh jenis lapis lindung yang digunakan. Pada jenis lapis lindung *tetrapod* besar elevasi *breakwater* sebesar 2.6 meter. Kemudian pada jenis lapis lindung *dolos* besar elevasi *breakwater* sebesar 2.5 meter dan yang terakhir pada jenis lapis lindung *boulder* besar elevasi *breakwater* sebesar 3.3 meter. Ketiga jenis lapis lindung memiliki besar elevasi yang berbeda dikarenakan nilai rambatan gelombang pada masing-masing batu berbeda. Tabel 16 menunjukkan hasil rekapitulasi dari elevasi bangunan *breakwater*.

Tabel 16. Rekapitulasi elevasi *breakwater*

Keterangan	Simbol	<i>Tetrapod</i>	<i>Dolos</i>	<i>Boulder</i>	Keterangan
Kala ulang		50	50	50	tahun
Tinggi gelombang rencana	H'0	1.13	1.13	1.13	m
Kemiringan 1:1.5	Teta	0.67	0.50	0.67	
Sudut kemiringan	Sudut kemiringan	0.79	0.55	0.79	
Periode gelombang rencana	Tr	1.90	1.90	1.90	s
Periode gelombang laut dalam	L0	5.64	5.64	5.64	m
Bilangan <i>Irribaren</i>	Ir	1.76	1.22	1.76	
<i>Run Up</i> tinggi gelombang	Ru/H	0.65	0.6	1.3	
A. <i>Run Up</i>	Ru	0.73	0.68	1.46	m
B. Tinggi kebebasan	W	0.50	0.50	0.50	m
C. <i>Design water level</i>	DWL	1.27	1.27	1.27	m
Elevasi <i>Breakwater</i>		2.60	2.50	3.30	m
Tinggi <i>Breakwater</i>		7.60	7.50	8.30	m

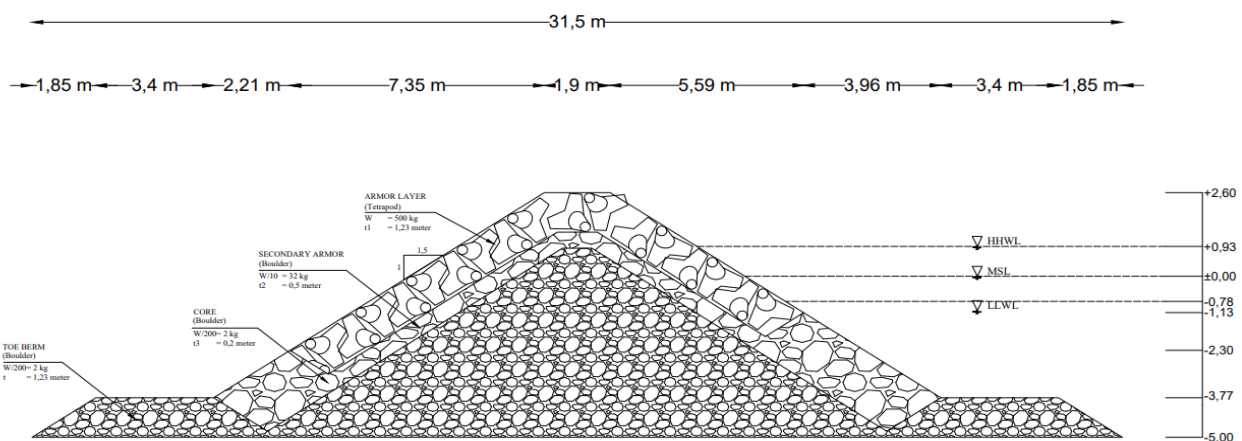
3.12 Dimensi

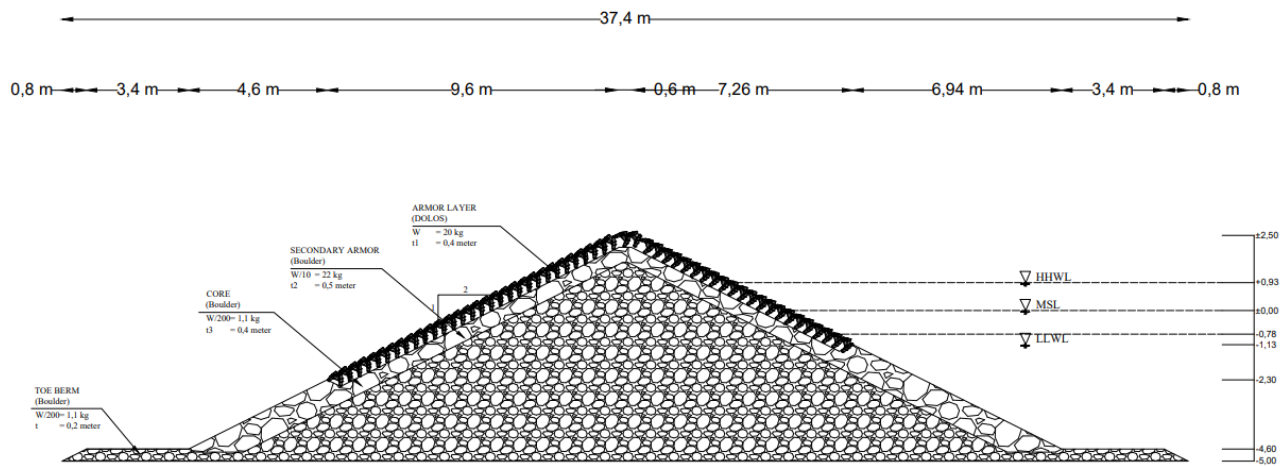
Adapun perhitungan dimensi dari ketiga jenis lapis lindung menggunakan Persamaan 22 dan Persamaan 25 dengan beberapa koefisien yang dirujuk dari (Triadmodjo, 1999) dapat dilihat pada Tabel 17.

Dari hasil perhitungan dimensi, gambar *breakwater* dapat dilihat pada Gambar 6, Gambar 7, dan Gambar 8.

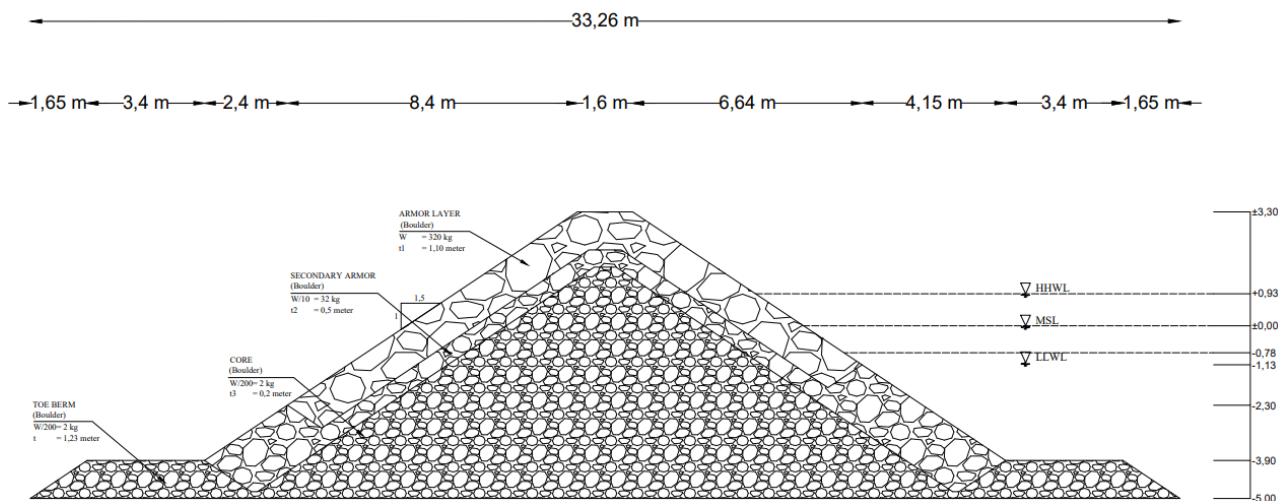
Tabel 17. Rekapitulasi dimensi *breakwater*

Keterangan	<i>Tetrapod</i>	<i>Dolos</i>	<i>Boulder</i>	Satuan
Elevasi Puncak	2.6	2.5	3.3	m
Lebar puncak	2	0.6	1.6	m
Tebal Lapisan 1	1.23	0.40	1.10	m
Tebal Lapisan 2	0.50	0.50	0.50	m
Tebal Pelindung Kaki	1.23	0.40	1.10	m
Panjang Pelindung Kaki	3.38	3.38	3.38	m
Kemiringan bangunan	38.197	38.197	38.197	degree
HHWL	0.93	0.93	0.93	m
DWL	1.273	1.273	1.273	m
Kedalaman Kaki Bangunan	5	5	5	m
Tinggi Gelombang	1.13	1.13	1.13	m
Tinggi <i>Breakwater</i>	7.60	7.50	8.30	m

**Gambar 6.** Cross section breakwater jenis lapis lindung *tetrapod*



Gambar 7. Cross section breakwater jenis lapis lindung dolos



Gambar 8. Cross section breakwater jenis lapis lindung boulder

Berdasarkan hasil analisis elevasi dan dimensi dari tiga jenis lapis lindung yaitu *tetrapod*, *dolos* dan *boulder*, bangunan *breakwater* menunjukkan perbedaan ketinggian elevasi. Pada lapis lindung *tetrapod* elevasi puncak mencapai 2.6 meter, sementara lapis lindung *dolos* mencapai 2.5 meter dan *boulder* mencapai 3.3 meter. Perbedaan ini disebabkan oleh karakteristik masing-masing lapis lindung dalam meredam energi gelombang yang menghantam *breakwater*.

Setiap jenis lapis lindung memiliki dimensi yang berbeda menyesuaikan dengan berat jenis, tinggi gelombang transformasi rencana dan koefisien lapis lindung. *Tetrapod* memiliki lebar puncak 1.9 meter dengan ketebalan lapis pertama 1.23 meter, lapis kedua 0.50 meter dan lapis ketiga 0.20 meter. Lapis *dolos* memiliki lebar puncak 0.6 meter dengan ketebalan lapis pertama 0.4 meter, lapis kedua 0.5 meter dan lapis ketiga 0.2 meter. Sementara *boulder* memiliki lebar puncak 1.6 meter dengan ketebalan lapis pertama 1.10 meter, lapis kedua 0.5 meter dan lapis ketiga 0.2 meter. Panjang kaki untuk semua jenis lapis lindung adalah 3.4 meter dengan tebal pelindung yang bervariasi.

Pemilihan jenis lapis lindung pada *breakwater* didasarkan pada efisiensi dalam meredam energi gelombang, biaya dan ketersediaan *quarry*. Lapis lindung *dolos* paling efisien meredam gelombang dengan rambatan 0.68 meter. Walaupun *tetrapod* memiliki permeabilitas lebih baik dan *boulder* lebih efisien dari segi biaya dan ketersediaan *quarry*. *Dolos* unggul dalam efisiensi energi gelombang. *Tetrapod* baik dalam permeabilitas namun lebih mahal dan *boulder* lebih hemat biaya dengan ketersediaan material yang melimpah.

4. KESIMPULAN

Pada analisis *hindcasting* gelombang ditemukan bahwa tinggi dan periode gelombang signifikan menggunakan 33.33% data tertinggi tiap bulan selama 10 tahun. Analisis frekuensi menunjukkan bahwa distribusi *Gumbel* dan *Log Pearson III* memenuhi syarat. Namun distribusi *Gumbel* dipilih karena menghasilkan tinggi gelombang rencana tertinggi sebesar 2.307 meter untuk kala ulang 50 tahun. Dengan metode *Fisher Tippet Type I*, diperoleh tinggi gelombang rencana sebesar 2.402 meter untuk kala ulang 50 tahun. Periode gelombang

rencana dihitung menggunakan rumus regresi dan didapatkan sebesar 5.61 detik.

Pada analisis pasang surut metode Admiralty diperoleh nilai HHWL sebesar 0.928 meter. Kenaikan muka air laut akibat gelombang sebesar 0.11 meter dan perkiraan *sea level rise* pada tahun 2075 sebesar 0.24 meter. Sehingga nilai elevasi muka air rencana adalah 1.28 meter.

Setiap jenis lapis lindung memiliki dimensi yang berbeda. menyesuaikan dengan berat jenis. tinggi gelombang transformasi rencana dan koefisien lapis lindung. *Tetrapod* memiliki lebar puncak 1.9 meter dengan ketebalan lapis pertama 1.23 meter, lapis kedua 0.50 meter dan lapis ketiga 0.20 meter. Lapis *dolos* memiliki lebar puncak 0.6 meter dengan ketebalan lapis pertama 0.4 meter, lapis kedua 0.5 meter dan lapis ketiga 0.2 meter. Sementara *boulder* memiliki lebar puncak 1.6 meter dengan ketebalan lapis pertama 1.10 meter, lapis kedua 0.5 meter dan lapis ketiga 0.2 meter. Panjang kaki untuk semua jenis lapis lindung adalah 3.4 meter dengan tebal pelindung yang bervariasi.

Dengan demikian penelitian ini menyampaikan saran agar dapat dilakukan analisis lanjutan mengenai stabilitas terhadap geser, guling, dan daya dukung serta analisis mengenai volume tenaga dan biaya. Kemudian saran lain yang dapat dilanjutkan dalam penelitian ini mengenai analisis besaran reduksi gelombang serta perubahan arus akibat perencanaan breakwater.

DAFTAR PUSTAKA

- Pramita, A. W., Sugianto, D. N. (2020). Pola Tinggi Gelombang Di Laut Jawa Menggunakan Model Wavewatch-III. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 21-28.
- CECR. (1984). *Shore Protection Manual (SPM '84)* (Research Center ed.). Washington: US Army Coastel Engineering.
- Dewi, A. R., Handini, S., Anggraeni, N. P., & Septiansyah, R. G. (2022). Analisis Data Kecapatan Angin di Pulau Jawa Menggunakan Distribusi Weibull. *Jurnal Statistika dan Aplikasinya*, 6(1), 132.
- Direktorat Perhubungan Laut . (2023). *Volume 1 : Pedoman Perencanaan Breakwater*. Kementerian Perhubungan.
- Farni, I. (2020). Perencanaan Muara dan Pantai Salido Kabupaten Pesisir Selatan. *Jurnal Rekayasa*, 10(2), 126-141.
- Fauzi, M. A., Mardika, M. G., Fatkhurrozi, M., & Martino, A. F. (2024). Study Re-Analysis of High Wave Deformation in Re-Design . *Journal of Science and Applicative Technology*, 26.
- Hikmah, H., Arisanti, L. E., & Irmawan, D. (2020, November). Tipe Pasang Surut di Pelabuhan Benoa Bali dengan Metode Admiralty Berdasarkan Data Automatic Weather Station (AWS). *Jurnal Widya Climago*, Vol.2 No.2, 86-95.
- Ichsan, M. N., Anesya, V., P, P. N., & Nugroho, H. (2017). Perencanaan Perlindungan Pantai Tanjung Nipah, Kalimantan Tengah. *Jurnal Teknik Sipil*, 6(2), 308.
- Jasin, M. I., & Mamoto, J. D. (2017). Perencanaan Bangunan Pengaman Pantai Pada Daerah . *Jurnal Sipil Statik*, 327.
- Kementrian Kelautan dan Perikanan. (2021). Kajian Riset Pesisir untuk Indonesia Lestari. *Siaran Pers Kementrian Kelautan dan Perikanan Nomor: Sp. 1226/SJ.5/XII/2021*.
- Mardika, M. G. I., Mashuri, M., & Hakim, D. R. (2024). Studi modeling dan mapping inundasi tsunami menggunakan software Delft3D studi kasus Pantai Labuan Jukung Lampung. *Paduraksa Jurnal*, 54-63.
- Mardika, M. G. I. (2021). Analisis Pasang Surut Menggunakan Metode Least Square. *JIPAD*, 1.
- Maulidin, R., & Tarigan, A. P. (2016). Analisa Dimensi dan Stabilitas Bangunan Pengaman (Jetty) Muara Lamteh di Kecamatan Peukan Bada Kabupaten Aceh Besar. 1-10.
- Fauzi, M. A. R. , Mardika, M.G.I. (2024). Study Re-Analysis of High Wave Deformation in Re-Design. *Journal of Science and Applicative Technology*, 25.
- Nurqolis, & Pratiwi, V. (2020). Analisis Penentuan Tata Letak Break Water . *Civil Engineering Research Journal* , 92.
- Pasaribu, R. P., Sewiko, R., & Arifin. (2022). Penerapan Metode Admiralty Untuk Mengolah Data Pasang Surut Di Perairan Selat Nasik - Bangka Belitung. *Jurnal Ilmiah Platax*, Vol.10 No.1, 150.
- Riandi, I., Ikhsan, M., & Amir, A. (2015). Perencanaan Ulang Jetty Di Muara Batu Putih Meulaboh. *Jurnal Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Teuku Umar*, 1(1), 97-197.
- Soewarno. (1995). *Hidrologi - Aplikasi Metode Statistik untuk Analisa Data Jilid I*. Bandung: Nova.
- Sujatmoko, B. S. (2020). Analisa Statistika Untuk Curah Hujan Harian Pada DAS Kampar Berdasarkan AIC (Akaike Information Criterion). 3.
- Surayawan, I. N., Eryani, I. G., & Rahadiani, A. A. (2019). Perencanaan Bangunan Jetty dari Bahan Bronjong pada Muara Tukad Melangit di Banjar Tegal Besar Kabupaten Klungkung. *PADURAKSA*, 8(1), 16-26.
- Triadmodjo, B. (1999). *Perencanaan Bangunan Pantai*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Triatmodjo, B. (1999). *Teknik Pantai*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Trusina, Fahmi, M., Ibrahim, Fachrurrazi, & Al'ala, M. (2023). Studi Perencanaan Jetty pada Muara Pembuangan Air (Stormwater Outfall) di PT Perta Arun Gas, Lhokseumawe. *Jurnal Teknik Sipil*, 36-46.
- Werdi, N. M., & Eryani, I. G. (2020). Alternatif Perencanaan Jetty di Muara Tukad Pangi Kabupaten Badung. *PADURAKSA*, 9(1), 102-112.
- Wigati, R., Priyambodho, B. A., & Sasmita, S. I. (2018). Perencanaan Pemecah Gelombang (Breakwater) Sisi . *Jurnal Fondasi*, 85.
- Yuwono, N. (1992). *Teknik Pantai Dasar-Dasar Perencanaan Bangunan Pantai Volume 2*. Yogyakarta: KMTS Fakultas Teknik UGM.