



## **STUDI PERUBAHAN TINGGI GELOMBANG LAUT UNTUK RENCANA PENGEMBANGAN INFRASTRUKTUR PELABUHAN DI PANTAI BARAT PULAU TARAKAN KALIMANTAN UTARA**

**Edy Utomo\*<sup>1</sup>, Asta<sup>2</sup>**

<sup>1,2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Borneo Tarakan

e-mail: [\\*edyutomo99@gmail.com](mailto:*edyutomo99@gmail.com)

**ABSTRACT:** Tarakan City has long been a supporting area for the social, cultural and economic life of the North Kalimantan Province, because of its strategic location, especially on the west side of the coast which is used for port infrastructure. Currently climatological conditions are experiencing changes resulting from global warming. An increase the height of the sea waves, because one of the wave generators in the ocean is wind. In this study, it tries to determine changes in wave height and its transformation to the water area of the Port, by utilizing wind speed and direction data sourced from ECMWF. The method used is a quantitative research method by applying the SPM Method, for forecasting wave generation and long-term wave prediction using the Weibull Method, as a reference for wave transformation for the next 100 years. The results of the prediction of wave height in the waters of the West Coast Port of Tarakan Island for the next 100 years are still within safe limits, as long as the wave height that occurs is less than 0,34 meters. Based on these results, it can be concluded that Port Infrastructure can still operate for the next 100 years, as a support for the social, cultural and economic life of the people in North Kalimantan Province.

**Keywords:** ECMWF, Port, Tarakan, Wave, Wind

**ABSTRAK:** Kota Tarakan telah sejak lama menjadi bagian wilayah penopang kehidupan sosial, budaya, dan perekonomian Provinsi Kalimantan Utara, karena letaknya yang strategis terutama pada sisi barat pantainya yang digunakan untuk infrastruktur Pelabuhan. Saat ini kondisi klimatologi mengalami perubahan yang diakibatkan dari pemanasan global. Peningkatan temperatur mengakibatkan perubahan pada hembusan angin yang akan berdampak pada peningkatan ketinggian gelombang laut, karena salah satu pembangkit gelombang di lautan adalah angin. Pada penelitian ini mencoba untuk mengetahui perubahan tinggi gelombang beserta transformasinya sampai ke wilayah perairan Pelabuhan, dengan memanfaatkan data kecepatan dan arah angin yang bersumber dari ECMWF. Metode yang digunakan adalah metode penelitian kuantitatif dengan menerapkan Metode SPM, untuk peramalan pembangkitan gelombang dan prediksi gelombang jangka panjang menggunakan Metode Weibull, sebagai acuan transformasi gelombang untuk 100 tahun yang akan datang. Hasil prediksi tinggi gelombang di daerah perairan Pelabuhan pantai barat Pulau Tarakan untuk 100 tahun kedepan masih dalam batas aman, selama tinggi gelombang yang terjadi kurang dari 0,34 meter. Berdasarkan hasil tersebut, maka dapat disimpulkan bahwa Infrastruktur Pelabuhan-pelabuhan masih dapat beroperasi untuk 100 tahun yang akan datang, sebagai penopang kehidupan sosial, budaya, dan perekonomian masyarakat di Provinsi Kalimantan Utara.

**Kata kunci:** Angin, ECMWF, Gelombang, Pelabuhan, Tarakan

## 1. PENDAHULUAN

Wilayah Kalimantan Utara 85% kawasannya berada di daratan Pulau Kalimantan, yang dilalui oleh satuan sungai yang terhubung ke wilayah pesisir dan kepulauan, seperti Pulau Tarakan, Nunukan, dan Bunyu. Hal ini menjadikan transportasi angkutan sungai dan penyeberangan laut memiliki peran penting untuk menghubungkan seluruh wilayah (Kasim, 2003). Salah satu wilayah yang memberikan peran penting adalah Pulau Tarakan. Pulau ini telah berkembang pesat sejak ditetapkan menjadi daerah otonom Pemerintah Kota Tarakan pada tahun 1997 (Bakri dkk., 2020). Peranan infrastruktur Pelabuhan sangatlah penting dalam perkembangan kehidupan sosial, budaya, dan ekonomi di Kalimantan Utara. Terdapat beberapa Infrastruktur Pelabuhan penting di Pulau ini, seperti Pelabuhan Malundung, Tenggayu I, Tenggayu II, dan lain-lain. Pelabuhan-pelabuhan tersebut berada pada satu garis pantai yang sama, yaitu pada sisi Selatan sampai ke Barat Pulau Tarakan (Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, 2021).

Pelabuhan terbesar adalah Pelabuhan Laut Malundung, yang merupakan Pelabuhan terbuka untuk pelayaran nasional dan internasional, serta sebagai pintu gerbang perekonomian dan perdagangan dalam negeri hingga luar negeri di Kalimantan Utara (Badarusman dkk., 2018). Beberapa dari Infrastruktur Pelabuhan di Pulau Tarakan dibangun pada tahun 1990-an dan awal tahun 2000-an. Khusus Dermaga IV Pelabuhan Laut Malundung, dibangun pada tahun 1980-an (Utomo, 2021). Berdasarkan pengamatan visual pada konstruksi Dermaga IV tersebut pada tahun 2020, ditemukan banyak elemen konstruksi yang mengalami keretakan, sehingga mengakibatkan korosi tulangan tidak dapat dihindari (Utomo, 2021). Hal ini dapat disebabkan oleh faktor perubahan dari perairan laut yang disebabkan dari fenomena pemanasan global.

Pemanasan global merupakan suatu fenomena peningkatan suhu secara global yang terjadi setiap tahun, kondisi ini juga memberikan peningkatan suhu di lautan (Illona dkk., 2018). Peningkatan suhu air laut memberikan dampak sangat luas terhadap berbagai aspek kelautan, dan dapat terjadi secara langsung dan tidak, sehingga efeknya akan dapat dirasakan dalam kurun waktu yang berbeda (Syahailatua, 2008). Perubahan iklim akibat pemanasan global akan meningkatkan kecepatan angin global (Mori dkk., 2010), hal ini juga akan memberikan pengaruh terhadap perubahan tinggi gelombang. Pembangkitan gelombang laut oleh angin merupakan perpindahan energi dari angin ke air melalui permukaan air (Holthuijsen, 2007). Hal ini akan memberikan dampak pada kondisi kenyamanan di sekitar Pelabuhan, terutama pada Pelabuhan yang berada di Pantai Barat Pulau Tarakan. Oleh sebab itu, perlu dilakukan penelitian untuk mendapatkan informasi terkait perubahan tinggi gelombang di daerah tersebut. Sebelumnya, tidak tersedia data atau informasi terkait kajian karakteristik gelombang di daerah tersebut (Kementerian Perhubungan Republik Indonesia, 2021).

## 2. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan adalah pendekatan analisis kuantitatif terhadap bagian-bagian dan fenomena serta hubungan terjadinya perubahan tinggi gelombang laut (Hardani dkk., 2020). Data utama yang digunakan adalah data kecepatan dan arah angin yang bersumber dari ECMWF, yang telah banyak digunakan pada penelitian sejenis sebelumnya (Purwono & Sismiani, 2018). Salah satu pembangkit gelombang adalah angin yang bertiup pada permukaan air (Triatmodjo, 2016). Saat angin bertiup melintasi permukaan air, gesekan antara udara dan air cenderung membentur permukaan air, sehingga menimbulkan gelombang (Muliati, 2020). Gelombang laut yang banyak dijumpai merupakan hasil pembangkitan dari pergerakan angin, oleh sebab itu disebut sebagai gelombang angin (Djarmiko, 2012). Data angin yang bersumber dari ECMWF merupakan hasil reanalisis dan interpolasi data meteorologi yang diperoleh dari berbagai sumber dan diberikan dalam format Net CDF, sehingga perlu dilakukan tahapan pra-analisis untuk dapat digunakan (Zulfikar dkk., 2018). Sumber data angin dalam penelitian ini diambil melalui laman <https://cds.climate.copernicus.eu/>.

Metode penelitian yang digunakan dalam studi ini adalah pendekatan analisis kuantitatif terhadap bagian-bagian dan fenomena serta hubungan terjadinya perubahan tinggi gelombang laut. Analisis dilakukan dengan pengembangan model matematis, teori dan hipotesis yang berkaitan dengan fenomena alam, yaitu angin dan gelombang. Salah satu pembangkit gelombang adalah angin yang betiup pada permukaan air (Triatmodjo, 2014, 2016). Saat angin betiup pada permukaan air, gesekan atau tarikan antara udara dan air cenderung membentur permukaan air, sehingga permukaan yang semula tenang akan tampak bergerak dan menimbulkan riak gelombang kecil. Perubahan kecepatan angin yang besar akan menimbulkan gelombang yang besar (Muliati, 2020). Gelombang laut merupakan fenomena alam yang dinamis, dapat memiliki pola yang indah, namun terkadang menakutkan (Djarmiko, 2012). Sehingga data yang menampilkan nilai kecepatan dan arah tiupan angin menjadi data utama dalam penelitian ini.

Data angin yang diunduh menampilkan data kecepatan angin pada dua arah, yaitu  $U_{10}$  (kecepatan angin pada elevasi 10 meter pada arah  $x$ ) dan  $V_{10}$  (kecepatan angin pada elevasi 10 meter pada arah  $y$ ). Sehingga perlu diolah untuk komponen sebaran arah dan kecepatan angin resultan (Syafik dkk., 2013). Persamaan untuk menentukan sebaran komponen tersebut adalah sebagai berikut.

$$V = \sqrt{U_{10}^2 + V_{10}^2} \quad (1)$$

$$\theta = 90 - \tan^{-1} \frac{V_{10}}{U_{10}}; \text{ untuk } U_{10} > 0; V_{10} > 0$$

$$90 + \tan^{-1} \frac{V_{10}}{U_{10}}; \text{ untuk } U_{10} > 0; V_{10} < 0$$

$$270 - \tan^{-1} \frac{V_{10}}{U_{10}}; \text{ untuk } U_{10} < 0; V_{10} < 0$$

$$270 + \tan^{-1} \frac{V_{10}}{U_{10}}; \text{ untuk } U_{10} < 0; V_{10} > 0 \quad (2)$$

Dimana,  $V$  adalah kecepatan angin dalam satuan m/s,  $U_{10}$  merupakan data kecepatan angin arah  $x$  (m/s),  $V_{10}$  adalah kecepatan angin arah  $y$  (m/s), dan  $\theta$  merupakan arah datang angin ( $^\circ$ ). Arah angin mengacu pada 8 arah mata angin dengan pembagian interval  $5^\circ$ . Arah angin merupakan arah sumber angin berhembus atau disebut dengan arah datang angin, sedangkan arah angin betiup merupakan kebalikan dari arah datang angin (Suhana, 2020), yang dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut.

$$\theta > 180^\circ; \theta_i = \theta - 180^\circ$$

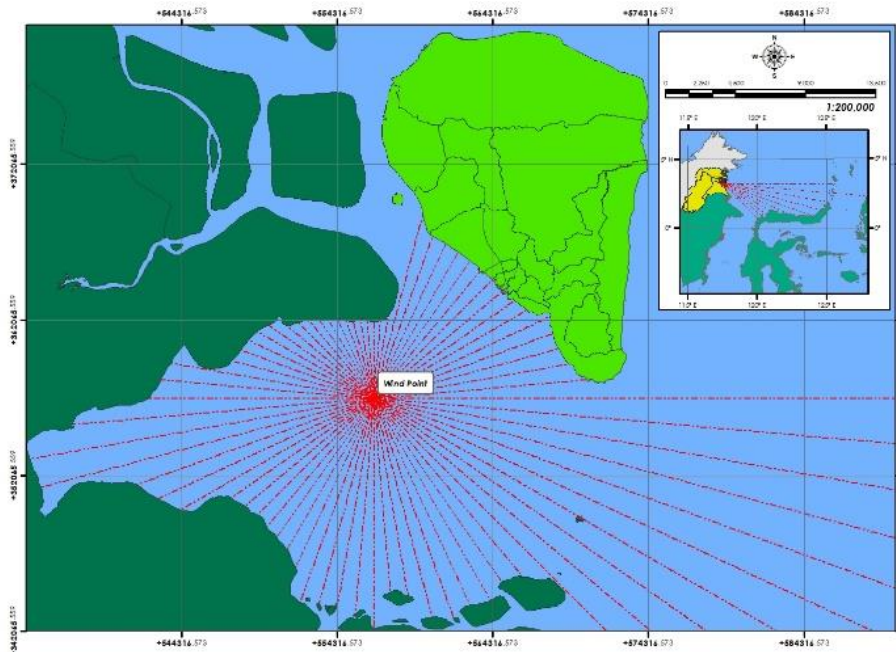
$$\theta < 180^\circ; \theta_i = \theta + 180^\circ \quad (3)$$

Dimana:  $\theta_i$  adalah arah angin betiup ( $^\circ$ ).

Selanjutnya dari titik pembangkitan angin dibuat garis-garis *fetch*, yang merupakan jarak sumber angin atau jarak seret angin, yang dapat diperkirakan dari jarak laut bebas antara lokasi yang ditinjau terhadap pulau atau daratan yang mengelilinginya (Muliati, 2020). Pada Gambar 1 ditunjukkan peta lokasi penelitian dengan penggambaran *fetch* yang dimulai pada titik lokasi pembangkitan angin. Gambar 1 menunjukkan lokasi penelitian dengan *overlay* garis-garis *fetch* arah perambatan angin. Peta dibuat dengan sistem proyeksi koordinat WGS 1984 format *Universal Transverse Mercator* (UTM) Zona 50 N. Sumber bentuk rupa bumi didapatkan melalui laman Badan Informasi Geospasial (BIG) (Badan Informasi Geospasial, 2021). Pada Gambar 1 ditunjukkan garis-garis yang menyebar pada setiap penjuror mata angin, yang merupakan panjang dari *fetch*. Pada studi ini *fetch* dibagi menjadi 8 arah angin, dengan demikian *fetch* efektif dihitung berdasarkan masing-masing pembagian arah angin tersebut. Setiap arah angin dibagi menjadi 8 sudut sebesar  $5^\circ$  sampai dengan  $20^\circ$ . Persamaan untuk menghitung *fetch* efektif ditentukan sebagai berikut (Triatmodjo, 2014).

$$F_{eff} = \frac{\sum X_i \cos \alpha}{\sum \cos \alpha} \quad (4)$$

Dimana,  $F_{eff}$  adalah panjang *fetch* efektif dengan satuan km atau meter,  $X_i$  adalah panjang *fetch* yang diukur dalam arah tertentu dari titik yang ditinjau sampai ke ujung akhir *fetch* yang mengenai daratan dalam satuan km atau meter,  $\alpha$  adalah sudut simpangan antara jalur *fetch* yang ditinjau terhadap arah angin tertentu.



**Gambar 1** Peta Lokasi Penelitian dan Penggambaran Fetch

Selain arah datang angin, kecepatan angin, dan panjang *fetch*, salah satu data yang sangat penting adalah data batimetri disekitar lokasi penelitian. Data Batimetri yang digunakan dalam studi ini bersumber dari Badan Informasi Geospasial, yang dapat diakses melalui laman <https://tanahair.indonesia.go.id>. Pengembangan data model *gridded* Batimetri Nasional dimulai dari perhitungan data *free air gravity anomaly*, sampai menjadi data Batimetri dengan menggunakan *Gravity Geological Method* (CGM) (Badan Informasi Geospasial, 2023).

Metode peramalan gelombang pada studi ini menggunakan metode *Shore Protection Manual* (SPM, 1984) yang dikeluarkan oleh *US Army Corps of Engineer*. Pada metode SPM, kecepatan angin perlu dimodifikasi menjadi faktor tegangan angin (*wind stress factor*), dengan cara melakukan koreksi dan konversi, antara lain koreksi terhadap ketinggian, stabilitas dan efek lokasi (Muliati, 2020). Pada penelitian ini koreksi terhadap ketinggian tidak dilakukan karena sumber data angin merupakan sumber angin yang diambil pada elevasi 10,00 meter ( $U_{10}$ ). Pada koreksi stabilitas yang berkaitan dengan perbedaan temperatur udara di lokasi bertiupnya angin dan air tempat terbentuknya gelombang dilakukan dengan persamaan sebagai berikut.

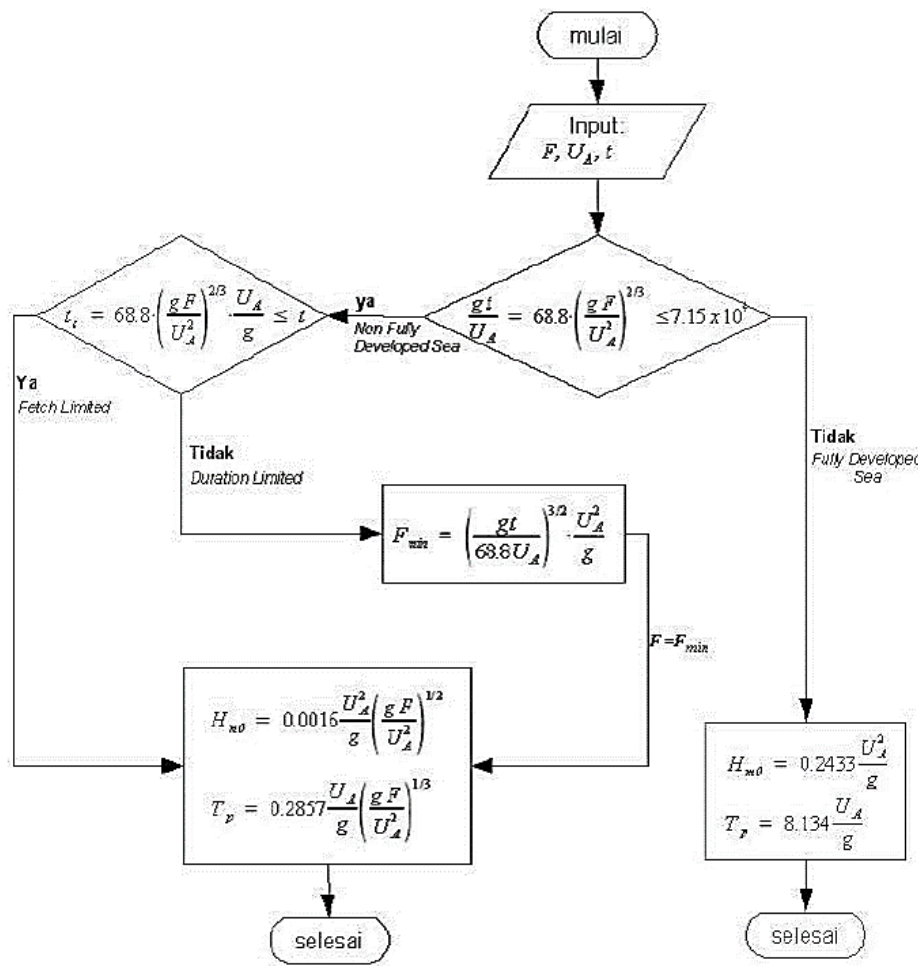
$$U = R_T U_{10} \quad (5)$$

Dimana:  $U$  merupakan kecepatan angin setelah dikoreksi dalam satuan m/s,  $U_{10}$  merupakan data kecepatan angin yang telah diolah atau kecepatan angin resultan dan dalam satuan m/s, dan  $R_T$  merupakan koefisien stabilitas (dalam penelitian ini menggunakan nilai 1,10 karena tidak didapatkan data temperature udara dan air). Sedangkan untuk konversi kecepatan angin hasil koreksi ( $U$ ) ke faktor tegangan angin, dalam penelitian ini tidak dilakukan karena titik pembangkitan angin berdasarkan data ECMWF yang didapatkan terdapat di wilayah laut bukan di darat, (Lihat Gambar 1). Hasil akhir data

kecepatan angin setelah mengalami koreksi dan konversi disimbolkan dengan  $U_A$ . Pada metode SPM, 1984 perlu untuk ditentukan terlebih dahulu kondisi pembangkitan gelombang yang disebabkan oleh angin apakah masuk dalam pembangkitan sempurna (*Fully Developed Sea*) atau pembangkitan tidak sempurna (*Non-Fully Developed Sea*). Persamaan yang digunakan untuk penyelesaian kondisi ini ditunjukkan dalam persamaan (6) (Muliati, 2020).

$$\frac{g t}{U_A} = 68,8 \left( \frac{g F}{U_A^2} \right)^{\frac{2}{3}} \leq 7,15 \times 10^4 \tag{6}$$

Dimana  $g$ , adalah percepatan gravitasi ( $9,81 \text{ m/s}^2$ ),  $U_A$  adalah kecepatan angin dalam satuan (m/s),  $F$  adalah panjang *fetch* dari tinjauan arah hembusan angin dalam satuan (meter), dan  $t$  adalah durasi angin bertiup dalam satuan (detik). Pada persamaan (6), nilai yang perlu untuk dicari adalah nilai durasi ( $t$ ), setelah nilai durasi diketahui maka penentuan kondisi sempurna dan tidak sempurna pembangkitan gelombang akibat angin akan dapat diketahui berdasarkan perbandingan nilai hasil dengan koefisien  $7,15 \times 10^4$ . Apabila nilai durasi lebih dari  $7,15 \times 10^4$ , maka kondisi gelombang adalah sempurna, yang artinya gelombang terbentuk sepenuhnya oleh angin, sehingga dapat langsung ditentukan nilai tinggi gelombang ( $H_{m0}$ ) dan periodenya ( $T_p$ ). Sedangkan apabila nilai durasi yang dihasilkan kurang dari sama dengan  $7,15 \times 10^4$ , maka gelombang masuk dalam kondisi tidak sempurna, yang artinya pembangkitan gelombang bergantung pada dua kondisi selanjutnya, yaitu berdasarkan kondisi *fetch limited* atau *duration limited*. Alur metode SPM ini digambarkan dalam bagan alir yang ditunjukkan pada Gambar 2 (Muliati, 2020).



Gambar 2 Bagan Alir Metode SPM

Selanjutnya, setelah tinggi gelombang dan periode pada setiap hari dalam 10 tahun terakhir didapatkan dengan metode SPM 1984, dilakukan klasterisasi tinggi gelombang maksimum yang terjadi. Sehingga didapatkan nilai tinggi gelombang maksimum dan periodenya pada setiap tahun. Analisis tinggi gelombang laut jangka panjang diolah dengan menggunakan Metode Distribusi *Weibull* (Sari dkk., 2020). Panjang dan Cepat rambat gelombang di laut dalam atau di titik awal pembangkitan gelombang, ditentukan dengan persamaan berikut ini

$$L_0 = 1,56T^2 \quad (10)$$

$$C_0 = \frac{L_0}{T} \quad (11)$$

Dengan,  $L_0$  adalah panjang gelombang di laut dalam,  $T$  adalah periode awal pembangkitan gelombang, dan  $C_0$  adalah cepat rambat gelombang di laut dalam. Perubahan tinggi gelombang ditentukan dengan persamaan berikut ini.

$$H = K_r K_s H_0 \quad (12)$$

Dengan,  $H$  adalah tinggi gelombang pada kedalaman tertentu,  $K_s$  adalah koefisien pendangkalan, dan  $K_r$  adalah koefisien refraksi. Koefisien refraksi dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan berikut:

$$K_r = \sqrt{\frac{\cos \alpha_0}{\cos \alpha_1}} \quad (13)$$

Dengan  $\alpha_1$  yang merupakan perubahan sudut datang gelombang didapatkan dari iterasi persamaan matematis berikut ini.

$$\sin \alpha_1 = \left( \frac{C_1}{C_0} \right) \sin \alpha_0 \quad (14)$$

Dimana,  $\alpha_0$  adalah sudut datang gelombang pada lokasi pembangkitan gelombang, dan  $C_1$  adalah cepat rambat gelombang pada kedalaman yang ditinjau. Sedangkan untuk nilai  $K_s$  dapat ditentukan dengan persamaan sebagai berikut.

$$K_s = \sqrt{\frac{n_0 L_0}{n_1 L_1}} \quad (15)$$

Dengan, nilai  $n_1$  dapat diambil dalam tabel lampiran A-1 (Triatmodjo, 2003).

Tahapan akhir adalah melakukan penilaian pada tinggi gelombang yang terjadi, apakah masih masuk dalam batas keamanan untuk kegiatan bongkar muat kapal yang berlabuh di Pelabuhan-pelabuhan Pantai Barat Pulau Tarakan. Ukuran tinggi gelombang yang digunakan menjadi batasan adalah tinggi gelombang yang diperkenankan berdasarkan ukuran dan jenis kapal yang berlabuh, seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1 berikut ini.

**Tabel 1. Tinggi gelombang yang diperkenankan**

Jenis Kapal	Ukuran Kapal	Tinggi Gelombang
Barang Padat Umum	Kapal: 1.000 DWT	Maks. 0,20 m
	Kapal: (1.000-3.000) DWT	Maks. 0,60 m
	Kapal: (1.300-15.000) DWT	Maks. 0,80 m
Barang Cair/gas	Kapal: Ro/Ro	Maks. 0,20 m
	Kapal Tanker (50.000 DWT)	Maks. 1,20 m
Barang Khusus	LASH ( <i>Lighter Aboard Ship</i> )	
	Kapal Peti Kemas	Maks. 0,60 m
	BACAT ( <i>Barge Aboard Catamaran</i> )	

Sumber: (Kramadibrata, 2002)

Apabila nilai tinggi gelombang yang dihasilkan dari peramalan dan prediksi di daerah Pelabuhan melebihi nilai tinggi gelombang yang ditunjukkan pada Tabel 1, maka dapat disimpulkan bahwa infrastruktur Pelabuhan membutuhkan perlindungan dari gelombang yang terjadi.

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1. Analisis Angin

Hasil perolehan data kecepatan dan arah angin dalam kurun waktu tahun 2012-2021, ditunjukkan dalam bentuk frekuensi distribusi arah dan kecepatan angin yang ditunjukkan pada Tabel 2.

**Tabel 2. Frekuensi distribusi arah dan kecepatan angin (Januari 2012 - Desember 2021)**

Arah Datang Angin	Klasifikasi Kecepatan Angin (m/s)					Total (%)
	0,0 - 2,0	2,0 - 4,0	4,0 - 6,0	6,0 - 8,0	8,0 - >12,0	
Utara	5,61	3,63	0,70	0,03	0,00	9,97
Timur Laut	6,10	7,63	1,47	0,02	0,00	15,22
Timur	6,25	13,46	1,98	0,01	0,00	21,70
Tenggara	5,21	5,37	0,26	0,00	0,00	10,84
Selatan	4,87	3,58	0,40	0,00	0,00	8,86
Barat Daya	6,05	3,55	0,16	0,00	0,00	9,76
Barat	7,43	4,60	0,10	0,00	0,00	12,12
Barat Laut	7,09	4,29	0,14	0,00	0,00	11,52
Sub-Total	48,61	46,10	5,21	0,06	0,00	99,99
<i>Calms</i>						0,00
<i>Miissing</i>						0,01
Total						100,0

Berdasarkan tabel tersebut dapat diketahui bahwa dominasi kejadian angin 21,70% bertiup dari arah Timur menuju ke Barat, dengan rentang kecepatan angin 13,46% sebesar 2,0 – 4,0 m/s, dan dari arah Timur Laut dengan persentase kejadian 15,22%. Hasil temuan ini disesuaikan dengan data arah angin rata-rata yang diberikan oleh BPS – Kota Tarakan, yang mana pada tahun 2019 – 2020, arah angin terbanyak bertiup berasal dari arah Utara, Timur Laut, Timur, dan Tenggara, dengan kejadian terbanyak adalah dari arah Timur (BPS Kota Tarakan, 2022). Sedangkan frekuensi angin yang berhadapan langsung dengan letak Pantai Barat Pulau Tarakan ditunjukkan pada Tabel 3 berikut ini.

**Tabel 3. Frekuensi distribusi arah dan kecepatan angin untuk posisi depan pantai Barat Pulau Tarakan, (Januari 2012-Desember 2021)**

Arah Datang Angin	Klasifikasi Kecepatan Angin (m/s)					Total (%)
	0,0 - 2,0	2,0 - 4,0	4,0 - 6,0	6,0 - 8,0	8,0 - >12,0	
Tenggara	0,86	0,62	0,04	0,00	0,00	1,52
Selatan	15,99	11,76	1,33	0,00	0,00	29,08
Barat Daya	22,98	14,09	0,28	0,00	0,00	32,03
Barat	22,98	14,09	0,28	0,00	0,00	37,33
Sub-Total	59,67	38,10	2,19	0,00	0,00	99,96
<i>Calms</i>						0,00
<i>Miissing</i>						0,04
Total						100,0

Berdasarkan Tabel 3, dapat diketahui bahwa dari tiga arah angin yang diperkirakan mendominasi sebagai pembangkit angin untuk Pantai Barat Pulau Tarakan, arah datang angin dari Barat yang memiliki frekuensi paling besar yaitu 37,33%. Sedangkan pembangkitan angin dari arah Barat Daya menuju

Timur Laut memiliki frekuensi 32,03%. Data hasil hubungan posisi dan arah angin ini akan dipergunakan untuk tahapan analisis selanjutnya.

### 3.2. Analisis Fetch

Pembentukan *fetch* dilakukan pada 8 arah mata angin, karena data angin yang dipergunakan memiliki titik pengambilan data di wilayah lautan. Adapun hasil pengukuran panjang *fetch* efektif ditunjukkan pada Tabel 4. Tabel tersebut menunjukkan nilai panjang *fetch* efektif untuk masing-masing arah datang angin yang akan membangkitkan gelombang. Pada arah *fetch* Barat Daya yang merupakan daerah penjarangan gelombang dominan ke pantai Barat Pulau Tarakan, hanya memiliki panjang sebesar 11,84 km. Nilai tinggi gelombang dan periode yang digunakan untuk prediksi transformasi gelombang akan dipilih dari hasil terbesar yang terjadi pada ketiga arah tersebut.

**Tabel 4. Hasil panjang *fetch* efektif untuk masing-masing arah angin**

Arah	Panjang <i>Fetch</i> Efektif	
	(km)	(m)
Utara (U)	6,56	6.557,65
Timur Laut (TL)	11,08	11.077,64
Timur (T)	505,51	505.508,52
Tenggara (Tg)	252,62	252.619,26
Selatan (S)	13,84	13.837,37
Barat Daya (BD)	11,84	11.844,35
Barat (B)	15,61	15.607,71
Barat Laut (BL)	7,10	7.095,41

### 3.3. Analisis Peramalan Pembangkitan Gelombang

Hasil peramalan pembangkitan gelombang dengan metode SPM ditunjukkan pada Tabel 5 berikut ini.

**Tabel 5. Hasil peramalan pembangkitan gelombang kondisi sempurna**

Tahun	Arah Datang	$H_{mo,max}^{*arah}$ (m)
2012	Tenggara & Timur	1,05 *Timur
2013	Selatan, Tenggara & Timur	0,87 *Timur
2014	Tenggara & Timur	1,23 *Timur
2015	Tenggara, Timur & Timur Laut	0,99 *Timur
2016	Barat, Tenggara & Timur	1,38 *Timur
2017	Tenggara, & Timur	0,99 *Timur
2018	Tenggara & Timur	0,78 *Timur
2019	Tenggara, Timur & Timur Laut	1,07 *Timur
2020	Tenggara & Timur	1,06 *Timur
2021	Tenggara & Timur	0,75 *Timur

Berdasarkan hasil yang ditunjukkan pada Tabel 5 tersebut, maka dapat diketahui bahwa kondisi pembangkitan gelombang sempurna yang memang benar dibangkitkan oleh kecepatan angin didominasi dari arah Timur. Selain dari besarnya kecepatan angin, hal ini juga dipengaruhi oleh panjang *fetch* efektif yang mana jika dilihat dari peta menunjukkan bahwa sisi Timur Kalimantan Utara terutama daerah Pulau Tarakan memang berhadapan langsung dengan laut lepas. Garis *fetch* untuk sisi Timur tersebut dapat mencapai daerah pulau-pulau di sisi Utara Pulau Sulawesi hingga ke Maluku Utara. Adapun gelombang tertinggi yang terbangkitkan dari arah Timur adalah sebesar 1,38 meter.

Sedangkan arah pembangkitan gelombang lainnya rata-rata terbangkitkan dengan kondisi *Non developed sea*, termasuk arah-arah pembangkitan gelombang yang arah penjarannya menuju Pantai Barat Pulau Tarakan. Secara keseluruhan gelombang yang terbangkitkan pada lokasi penelitian tidak menunjukkan signifikansi perubahan disetiap tahun-nya. Pola perubahan disetiap tahun cenderung



fluktuatif tidak meningkat secara linier. Hal ini menunjukkan pengaruh pemanasan global yang mengakibatkan perubahan temperatur di laut dan mengakibatkan perubahan kecepatan angin sehingga memberikan dampak perubahan terhadap tinggi gelombang tidak begitu berpengaruh. Meskipun demikian, perubahan tinggi gelombang tetap terjadi disetiap tahunnya, dengan rata-rata perubahan setiap tahun adalah  $\pm 1,57$  mm.

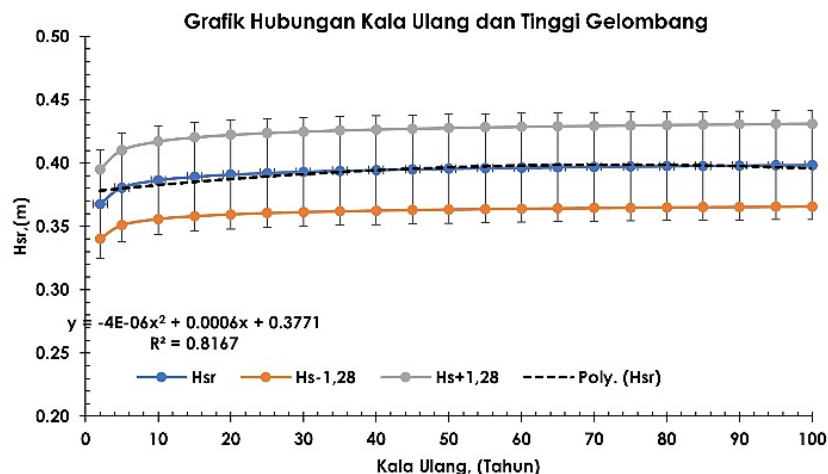
Analisis prediksi tinggi gelombang yang menuju Pantai Barat Pulau Tarakan, menggunakan nilai tinggi gelombang maksimum yang terjadi pada tiga arah datangnya gelombang. Adapun nilai tinggi gelombang tersebut ditunjukkan pada Tabel 6. Berdasarkan Tabel 6, ditunjukkan bahwa pada tiga arah dominan gelombang yang bergerak ke Pantai Barat Pulau Tarakan, rata-rata gelombang tertinggi terjadi dari arah Barat Daya, yaitu sebesar 0,34 meter, dengan kejadian tinggi gelombang tertinggi yaitu 0,37 meter pada tahun 2018. Walaupun tinggi gelombang terbesar terjadi dari arah Selatan yaitu sebesar 0,42 meter, namun nilai reratanya masih di bawah rerata tinggi gelombang dari arah Barat Daya, sehingga untuk analisis selanjutnya pada prediksi kejadian gelombang jangka panjang dilakukan pada nilai-nilai tinggi gelombang yang terjadi dari arah pembangkitan Barat Daya menuju Timur Laut.

**Tabel 6. Tinggi gelombang arah Barat, Selatan dan Barat Daya**

Tahun	Tinggi Gelombang, $H_{m0}$ (meter)		
	Barat	Barat Daya	Selatan
2012	0,28	0,34	0,35
2013	0,25	0,31	0,31
2014	0,28	0,35	0,26
2015	0,37	0,26	0,40
2016	0,32	0,34	0,42
2017	0,34	0,29	0,35
2018	0,33	0,37	0,34
2019	0,34	0,30	0,38
2020	0,24	0,27	0,30
2021	0,28	0,28	0,33
Rerata	0,30	0,34	0,31
Max.	0,37	0,37	0,42

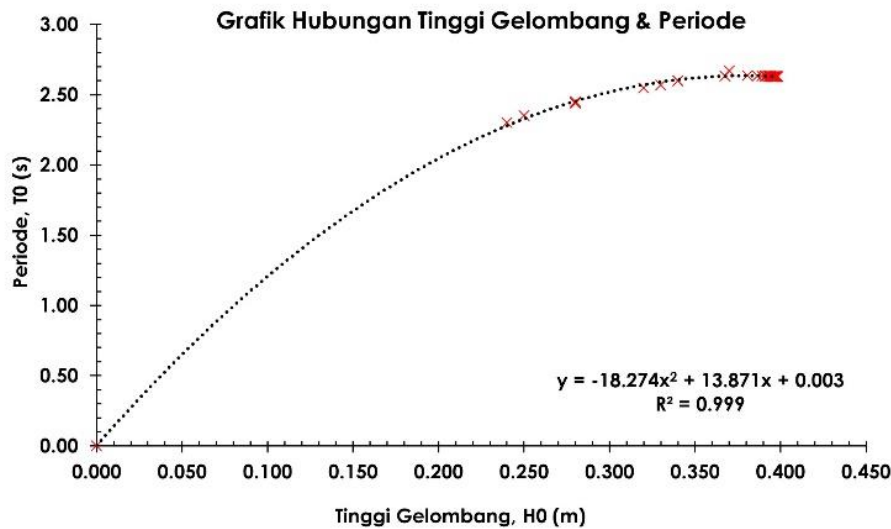
### 3.4. Analisis Prediksi Tinggi Gelombang Jangka Panjang

Prediksi tinggi gelombang jangka panjang dilakukan dengan menggunakan metode *Weibull*, dengan menetapkan periode ulang sampai dengan 100 tahun dari tahun 2021. Hasil analisis prediksi tinggi gelombang ini ditunjukkan pada Gambar 3 sebagai berikut.



**Gambar 3 Grafik Prediksi Tinggi Gelombang Jangka Panjang Metode Weibull**

Berdasarkan grafik yang ditunjukkan pada Gambar 3, dapat dinyatakan bahwa tidak terjadi peningkatan tinggi gelombang yang signifikan pada kala ulang waktu 100 tahun yang terletak pada tahun 2121, tinggi gelombang diperkirakan akan mencapai pada nilai 0,39 meter. Standar deviasi dari sebaran data tinggi gelombang maksimum selama 100 tahun dalam analisis ini adalah 0,043, dengan tingkat kepercayaan sebesar 81,67% dengan pendekatan regresi polynomial. Selanjutnya, periode gelombang ditentukan dengan acuan regresi yang sama dengan hasil ditunjukkan pada Gambar 4.



**Gambar 4 Grafik Hubungan Tinggi Gelombang dengan Periode Gelombang**

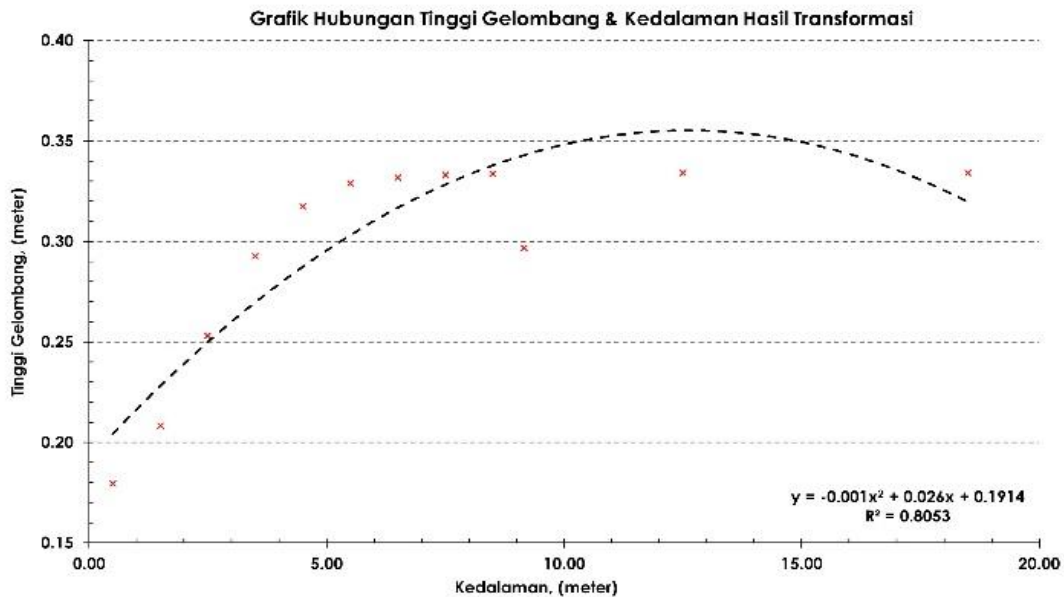
Berdasarkan Gambar 4, maka periode gelombang dapat ditentukan menggunakan pendekatan persamaan regresi yang dihasilkan. Berdasarkan hal tersebut, maka nilai tinggi gelombang dan periode gelombang pada 100 tahun yang akan datang adalah  $H_0 = 0,39$  meter, dan  $T_0 = 2,63$  detik.

### 3.5. Analisis Transformasi Gelombang

Transformasi tinggi gelombang dipengaruhi oleh kedalaman perairan. Pada penelitian ini kedalaman diukur dari kondisi pasang tertinggi, dimana berdasarkan data sekunder, elevasi air pasang tertinggi adalah sebesar 3,50 meter. Dari kondisi pasang tertinggi kemudian diukur kedalaman perairan, yang mana nilai elevasi dasar perairan menggunakan data BATNAS. Hal ini akan menyebabkan terjadi perubahan tinggi gelombang, panjang gelombang dan cepat rambatnya berdasarkan fungsi kedalaman.

Berdasarkan pemodelan dari data Batimetri, ditemukan bahwa kondisi kemiringan dari sisi Pantai Barat Pulau Tarakan ke titik pembangkitan angin tidak linear memiliki kemiringan yang sama. Terdapat cekungan dengan nilai elevasi lebih rendah dibandingkan posisi elevasi di titik pembangkitan gelombang. Daerah tersebut merupakan alur pelayaran kapal-kapal yang beroperasi di sekitar Pulau Tarakan. Berdasarkan hal tersebut, transformasi tinggi gelombang diperhitungkan dan mendapatkan hasil sebaran hubungan kedalaman perairan dengan tinggi gelombang yang terjadi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5.

Gambar 5 menunjukkan hubungan regresi antara kedalaman dengan tinggi gelombang pada tingkat kepercayaan sebesar 80,53%. Selanjutnya dengan menggunakan persamaan yang dihasilkan dari grafik regresi tersebut, maka akan dapat diketahui nilai tinggi gelombang pada setiap Infrastruktur Pelabuhan dengan memberikan input nilai kedalaman disetiap lokasi Pelabuhan ke persamaan regresi yang dihasilkan.



**Gambar 5 Grafik Hubungan Kedalaman dengan Tinggi Gelombang Hasil Transformasi**

### 3.6. Analisis Tinggi Gelombang di Daerah Pelabuhan

Analisis terakhir adalah menilai kondisi gelombang yang terjadi dari pembangkitan dengan kala ulang 100 tahun pada beberapa Infrastruktur Pelabuhan yang tersebar di Pantai Barat Pulau Tarakan. Berdasarkan analisis dari data kontur yang dihasilkan maka akan ditemukan nilai elevasi dasar perairan untuk masing-masing Pelabuhan yang digunakan untuk menghitung tinggi gelombang. Hasil perhitungan ditunjukkan pada Tabel 7 berikut ini.

**Tabel 7. Tinggi gelombang dan periode arah pembangkitan Barat Daya menuju Timur Laut**

Pelabuhan	Elevasi HWL (m)	Elevasi Seabed (m)	d (m)	H (m)
Tengkayu II	3,50	-5,00	8,50	0,34
Tengkayu I	3,50	-10,00	13,50	0,36
Malundung	3,50	-15,00	18,50	0,33
Rerata				0,34

Berdasarkan Tabel 7 didapatkan informasi nilai tinggi gelombang yang terjadi pada ketiga lokasi perairan Pelabuhan yang berada di Pantai Barat Pulau Tarakan rata-rata sebesar 0,34 meter untuk prediksi kala ulang pada 100 tahun yang akan datang. Apabila nilai rata-rata tinggi gelombang tersebut dikorelasikan dengan persyaratan tinggi gelombang untuk wilayah Pelabuhan yang ditunjukkan pada Tabel 1, maka diperkirakan bahwa pada 100 tahun kedepan, kapal barang umum dengan ukuran  $\leq 1.000$  DWT sudah tidak memungkinkan untuk melakukan kegiatan bongkar muat di perairan Pelabuhan tersebut, pada kondisi kecepatan angin  $> 6,61$  m/s.

## 4. KESIMPULAN

### 4.1. Kesimpulan

Hasil studi ini mendapatkan informasi bahwa perubahan tinggi gelombang akibat pemanasan global tidak signifikan terjadi, dengan rerata perubahan sebesar  $\pm 1,57$  mm/tahun pada kondisi yang fluktuatif, dan untuk 100 tahun yang akan datang infrastruktur Pelabuhan yang tersebar di wilayah perairan laut

sisi Barat Pulau Tarakan masih aman untuk dipergunakan dalam kegiatan bongkar muat kapal yang berlabuh, selama tinggi gelombang yang terjadi adalah  $< 0,34$  meter. Namun, apabila tinggi gelombang yang terjadi mencapai  $> 0,34$  meter, maka kapal-kapal dengan ukuran  $\leq 1.000$  DWT akan mengalami kesulitan melakukan kegiatan bongkar muat di Dermaga Pelabuhan. Hal ini dapat terjadi apabila kecepatan angin yang berhembus dari arah Barat Daya mencapai  $> 6,61$  m/s.

#### 4.2. Saran

Agar mendapatkan hasil penelitian yang valid, maka penelitian ini perlu didukung dengan adanya pengamatan dan pengukuran tinggi gelombang di beberapa lokasi Pelabuhan yang ditinjau. Hal tersebut dapat dilakukan pada penelitian selanjutnya.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih diberikan kepada Program Studi Teknik Sipil Universitas Borneo Tarakan atas dukungannya kepada penulis dalam menyelesaikan penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- Badan Informasi Geospasial. (2021, Januari 5). *Geoportal Badan Informasi Geospasial*.
- Badan Informasi Geospasial. (2023, Januari 5). *DEMNAS, Seamless Digital Elevation Model (DEM) dan Batimetri Nasional*.
- Badarusman, B., Soraya Batubara, U. F., & Nasution, S. (2018). Analisis Terminal Peti Kemas dan Kapal serta Arus Peti Kemas Pelabuhan Tarakan. *Jurnal Manajemen Bisnis Transportasi dan Logistik (JMBTL)*, 5(1), 51–60.
- Bakri, M. D., Mansur, A. Z., & Bunga, S. (2020). Analisis Kinerja Bongkar Muat di Pelabuhan Tengkeyu II Tarakan. *SIKLUS: Jurnal Teknik Sipil*, 6(2), 204–215.
- BPS Kota Tarakan. (2022). *Kota Tarakan Dalam Angka 2022* (Vol. 1).
- Djarmiko, E. B. (2012). *Perilaku dan Operabilitas Bangunan Laut di atas Gelombang Acak* (1 ed., Vol. 1). ITS PRESS.
- Hardani, Auliya, N. H., Andriani, H., Fardani, R. A., Ustiawaty, J., Utami, E. F., Sukmana, D. J., & Istiqomah, R. R. (2020). *Metode Penelitian Kualitatif & Kuantitatif*. Pustaka Ilmu.
- Holthuijsen, L. H. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. Cambridge University Press.
- Illona, D. J., Jaya, Y. V., Koenawan, C. J., & Suhana, M. P. (2018). Global Warming dan Pengaruhnya Terhadap Karakteristik Gelombang Laut di Pantai Timur Pulau Bintan yang Ditinjau dari Prespektif Klimatologi. *Dinamika Maritim, Coastal and Marine Resources Research Center*, 7(1), 20–26.
- Kasim, J. S. (2003). *Implmentasi Otonomi Daerah di Kota Tarakan (Sebuah Gagasan, Wawasan, Terapan dan Renungan)* (Vol. 1). PT. Media Otda.

- Kementerian Perhubungan Republik Indonesia. (2021). *Peraturan Menteri Perhubungan Republik Indonesia Nomor KM 222 Tahun 2021 Tentang Rencana Induk Pelabuhan Tarakan/Malundung Provinsi Kalimantan Utara*.
- Kramadibrata, S. (2002). *Perencanaan Pelabuhan*. ITB.
- Mori, N., Yasuda, T., Mase, H., Tom, T., & Oku, Y. (2010). Projection of Extreme Wave Climate Change under Global Warming. *Hydrological Research Letters*, 4(1), 15–19.
- Muliati, Y. (2020). *Rekayasa Pantai* (1 ed.). Itenas.
- Purwono, N. A. S., & Sismiani, A. (2018). Peramalan Kejadian Gelombang Pantai Watunohu dengan Pendekatan Empiris Analisa Data Angin. *Teodolita*, 19(2), 1–10.
- Sari, L. P., Muliadi, & Risiko. (2020). Estimasi Tinggi Gelombang Laut di Perairan Pantai Kijing Kabupaten Mempawah Kalimantan Barat. *Prisma Fisika*, 8(1), 50–56.
- Suhana, M. P. (2020, Oktober 16). Climatology Module 02-Copernicus Wind Data Processing Part1. <https://www.youtube.com/watch?v=r9mnlT3xvT8&list=PL56LpORY0z3k6hTrR6wzegWgEicypWTzD&index=2&t=155s>.
- Syafik, A., Kunarso, & Hariadi. (2013). Pengaruh Sebaran dan Gesekan Angin Terhadap Sebaran Suhu Permukaan Laut di Samudera Hindia (Wilayah Pengelolaan Perikanan Republik Indonesia 573). *J-OCE UNDIP, Jurnal Oseanografi*, 2(3), 318–328.
- Syahailatua, A. (2008). Dampak Perubahan Iklim Terhadap Perikanan. *Oseana*, 33(2), 25–32.
- Triatmodjo, B. (2003). *Pelabuhan* (Vol. 6). Beta Offset.
- Triatmodjo, B. (2014). *Perencanaan Bangunan Pantai* (3 ed.). Beta Offset.
- Triatmodjo, B. (2016). *Teknik Pantai* (8 ed.). Beta Offset.
- Utomo, E. (2021). Analisis Kelayakan Struktur Dermaga IV Pelabuhan Malundung Kota Tarakan untuk Kapasitas Mobil Crane Bongkar Muat. *Borneo Engineering: Jurnal Teknik Sipil*, 5(1), 103–116.
- Zulfikar, Jaya, Y. V., Pratomo, A., Putra, R. D., & Suhana, M. P. (2018). Variabilitas Spasial Suhu Permukaan Laut Pulau Bintan Provinsi Kepulauan Riau pada Empat Musim Berbeda. *Dinamika Maritim, Coastal and Marine Research Center, Raja Ali Haji Maritime University.*, 6(2), 12–15.