

## SISTEM NAVIGASI KESELAMATAN PELAYARAN PERAIRAN DARAT BERBASIS WEB

<sup>1</sup>Anton Widodo✉, <sup>1</sup>I Putu Putra Wira Sarwa Yudha, <sup>2</sup>Maulana Putra,  
<sup>1</sup>Agustina Rachmawardani, <sup>1</sup>Nardi

<sup>1</sup>Instrumentasi-MKG, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Tangerang, Indonesia

<sup>2</sup>Direktorat Instrumentasi dan Kalibrasi, BMKG, Jakarta, Indonesia

Email: [anton.widodo@stmkg.ac.id](mailto:anton.widodo@stmkg.ac.id)

DOI: <https://doi.org/10.46880/jmika.Vol9No2.pp363-371>

### ABSTRACT

Navigation safety in inland waters is often threatened by extreme weather conditions such as strong winds and high waves. This study developed SIGADANA, a web-based navigation system that provides early warnings of weather and water conditions in seven major ports: Ajibata, Ambarita, Balige, Muara, Simanindo, Sipinngan, and Tigaras. The system integrates real-time data with hourly temporal intervals from the OpenMeteo API, including wind speed, wind direction, temperature, and humidity, and utilises the JONSWAP model with Boussinesq corrections to estimate significant wave height (Hs) based on local topography and water depth. Furthermore, to assist the analyst team in understanding weather and water patterns in the test area, the system also stores early warning data for a five-year period, 2020-2024. SIGADANA has three main features: (1) historical monitoring of water condition trends, (2) real-time predictions for early warnings up to two hours in advance, and (3) navigation route advisories. To date, particularly in Indonesia, there has been no project estimating wave conditions prior to SIGADANA. Therefore, the system was only evaluated using OLS regression, with results showing that the model was able to explain more than 70% of the data variation. However, there are indications of residual autocorrelation and potential multicollinearity that need to be considered in the interpretation. In the future, SIGADANA is expected to improve navigation safety and has the potential to become a model for other inland waters in Indonesia.

**Keywords:** Early Warning, Strong Winds, High Waves, JONSWAP, Boussinesq.

### ABSTRAK

Keselamatan pelayaran di perairan pedalaman sering terancam oleh kondisi cuaca ekstrem seperti angin kencang dan gelombang tinggi. Penelitian ini mengembangkan SIGADANA, sistem navigasi pelayaran berbasis web yang memberikan peringatan dini terhadap kondisi cuaca dan perairan di tujuh pelabuhan utama: Ajibata, Ambarita, Balige, Muara, Simanindo, Sipinngan, dan Tigaras. Sistem ini mengintegrasikan data real-time dengan interval temporal per jam dari API OpenMeteo, meliputi kecepatan angin, arah angin, suhu, dan kelembapan, serta memanfaatkan model JONSWAP dengan koreksi Boussinesq untuk estimasi tinggi gelombang signifikan (Hs) berdasarkan topografi lokal dan kedalaman perairan. Adapun, untuk membantu tim analis dalam memahami pola cuaca serta perairan di wilayah pengujian, sistem ini juga menyimpan data peringatan dini dalam rentang lima tahun, 2020-2024. SIGADANA memiliki tiga fitur utama: (1) monitoring historis untuk tren kondisi perairan, (2) prediksi real-time untuk peringatan dini hingga dua jam ke depan, dan (3) himbauan terhadap rute navigasi. Sampai saat ini, khususnya di Indonesia, belum ada proyek estimasi kondisi gelombang sebelum SIGADANA. Sehingga, sistem hanya dievaluasi menggunakan regresi OLS dengan hasil bahwa model mampu menjelaskan lebih dari 70% variasi data. Meskipun, ada indikasi autokorelasi residual dan potensi multikolinearitas yang perlu diperhatikan dalam interpretasi. Ke depannya, SIGADANA diharapkan mampu meningkatkan keselamatan pelayaran dan berpotensi menjadi model untuk perairan pedalaman lain di Indonesia.

**Kata Kunci:** Peringatan Dini, Angin Kencang, Gelombang Tinggi, JONSWAP, Boussinesq.

### PENDAHULUAN

Perairan terbagi menjadi dua, yaitu perairan darat dan perairan laut. Meskipun tidak seluas perairan laut, perairan darat juga memiliki peran multisektor

yang saling berkaitan satu sama lain (Wisudo, 2014). Dengan kata lain, aktivitas pelayaran di perairan laut maupun perairan darat memiliki risiko yang sama besarnya. Dinamika cuaca dan kondisi geografis

merupakan tantangan utama dalam menjaga keselamatan pelayaran (Dian Minarto & Kurniawan Teguh Santoso, 2023). Terlebih lagi, kondisi cuaca dan gelombang tinggi yang dinamis memiliki tingkat pengaruh dan tingkat risiko yang lebih besar dibandingkan *human error* dalam keselamatan pelayaran (Sinaga & Harahap, 2024). Penelitian ini secara khusus membahas mengenai keselamatan pelayaran di perairan darat berdasarkan kondisi cuaca dan perairan setempat.

Salah satu perairan darat dengan aktivitas pelayaran yang sangat padat di Indonesia adalah Danau Toba. Danau yang terletak di Sumatera Utara ini memiliki panjang 87 km, lebar 27 km, dan kedalaman maksimum mencapai 505 meter (Wal hidayat & Nasution, 2019). Danau Toba selalu dipadati oleh kapal penyeberangan, nelayan, maupun pariwisata. Aktivitas pelayaran yang padat ini tentunya perlu diimbangi dengan peningkatan upaya dalam menjaga keselamatan pelayaran. Mengingat, Danau Toba pernah mengalami insiden berupa tenggelamnya Kapal Motor (KM) Sinar Bangun pada 18 Juni 2018 silam dengan korban jiwa mencapai ratusan orang (Yahsyi, 2018). Kepala Pusat Data Informasi dan Humas BNPB, Sutopo Purwo Nugroho, menyatakan bahwa kapal yang tengah berlayar dari Pelabuhan Simanindo menuju Pelabuhan Tigaras tersebut tenggelam akibat cuaca buruk dan gelombang tinggi (Erlangga, 2018).

Insiden tersebut menunjukkan bahwa kita sebagai manusia tidak memiliki kemampuan untuk mengetahui secara tepat bagaimana kondisi cuaca bahkan untuk beberapa jam ke depan saja. Meskipun demikian, kita masih bisa mempelajari pola cuaca dan melakukan upaya mitigasi dengan merancang serta terus mengembangkan sistem peringatan dini agar siapapun yang berlayar punya kesempatan untuk kembali ke keluarganya lagi. Untuk itu, peneliti bersama-sama merancang sistem navigasi pelayaran berbasis *website* berdasarkan peringatan dini angin kencang dan gelombang tinggi. Proyek ini dinamai Sistem Informasi Gelombang dan Angin Danau (SIGADANA). Kami merancang SIGADANA ini semata-mata karena tidak sanggup mendapat laporan korban jiwa lagi akibat insiden yang serupa dengan tenggelamnya KM Sinar Bangun tersebut.

Sampai saat ini, khususnya di Indonesia, belum ada proyek resmi terkait sistem estimasi kondisi gelombang maupun sistem navigasi di perairan pedalaman. Sehingga, sistem yang kami rancang ini masih berupa *prototype* dengan lokasi pengujian di Danau Toba. *Prototype* SIGADANA dirancang memiliki tiga fitur utama. Pertama, fitur *Prediksi Real-*

*Time*, untuk memberikan peringatan *real-time* terkait kondisi angin dan gelombang berdasarkan data API OpenMeteo untuk jam sekarang dan dua jam ke depan. Kedua, fitur *Monitoring*, untuk menampilkan tren historis lima tahun (2020-2024) terkait tinggi gelombang signifikan, kecepatan arus gelombang, kecepatan angin, dan arah angin dari data OpenMeteo, dengan resolusi per jam. Ketiga, fitur *Himbauan* terhadap Rute Navigasi dengan mempertimbangkan kondisi perairan.

## METODE PENELITIAN

### Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan dua sumber data. Pertama, data batimetri Danau Toba dari *Google Earth Engine* yang diperoleh melalui situs <https://code.earthengine.google.com/>. Kedua, data pengamatan cuaca untuk tujuh pelabuhan Danau Toba dari OpenMeteo yang diperoleh melalui situs <https://open-meteo.com>. Data batimetri dari *Google Earth Engine* yang masih mentah dengan format *Javascript* diolah terlebih dahulu menggunakan *Jupyter Notebook* untuk menentukan kedalaman, kontur, dan estimasi panjang *fetch* berdasarkan penghalang topografi alami. Selanjutnya, peneliti akan menerapkan persamaan-persamaan yang tertera dalam buku *Introduction to Physical Oceanography* oleh Robert H. Stewart (2008).

### Estimasi Variasi Kedalaman Danau

Dalam pemodelan gelombang, kedalaman air merupakan salah satu parameter yang sangat penting karena secara langsung memengaruhi proses propagasi gelombang, termasuk fenomena *shoaling* (pengangkatan gelombang) dan *breaking* (pecahnya gelombang) yang terjadi saat gelombang mendekati wilayah pantai atau pelabuhan. Secara matematis, jika  $\theta$  adalah *input* arah angin dan  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  adalah dua sudut terdekat dari dataset dengan nilai kedalaman masing-masing  $h_1$  dan  $h_2$ , maka kedalaman  $h_{(\theta)}$  dihitung menggunakan interpolasi linear sebagai berikut:

$$h_{(\theta)} = h_1 + \left( \frac{\theta - \theta_1}{\theta_2 - \theta_1} \right) \cdot (h_2 - h_1) \quad (1)$$

### Estimasi Panjang Fetch

Definisi *fetch* adalah jarak tak terputus yang dilalui angin di atas permukaan air yang berpengaruh langsung pada pembentukan gelombang (Hasselmann et al., 1973). Semakin panjang *fetch*, semakin besar energi yang dapat ditransfer dari angin ke permukaan

air. Energi ini berbanding lurus dengan tinggi, panjang, dan kekuatan gelombang yang dihasilkan. Secara matematis, jika  $\theta$  adalah *input* arah angin dan  $\theta_1$  dan  $\theta_2$  adalah dua sudut terdekat dari dataset dengan nilai *fetch* masing-masing  $F_1$  dan  $F_2$ , maka kedalaman  $F_{(\theta)}$  dihitung menggunakan interpolasi linear sebagai berikut:

$$F_{(\theta)} = F_1 + \left( \frac{\theta - \theta_1}{\theta_2 - \theta_1} \right) \cdot (F_2 - F_1) \quad (2)$$

Dalam praktiknya, panjang *fetch* yang dihitung secara geometris berdasarkan arah angin belum tentu merepresentasikan *fetch* yang sebenarnya. Terdapat faktor pemengaruh berupa hambatan topografi seperti pulau, tanjung, dan bukit. Hambatan topografi dapat menghalangi lintasan angin sehingga mengurangi potensi transfer energi angin ke permukaan air. Untuk mengadaptasi hal ini, model SIGADANA menerapkan koreksi *fetch* menggunakan pendekatan koefisien reduksi berbasis arah angin dan posisi pelabuhan. Prinsip yang digunakan adalah logika fisika sederhana. Di mana, angin yang terblokir oleh topografi lokal akan membuat *fetch* dari arah tersebut menjadi lebih pendek.

**Tabel 1.** Koreksi Panjang *Fetch*

Pelabuhan	Penghalang	Arah Angin Terhalang	Koef. Reduksi
Ajibata, Ambarita, Simanindo, Sipinggan	Pulau Samosir	90°–135°	0.7
Balige, Muara	Bukit Barisan	0°–30° dan 180°–210°	0.8
Tigaras	Bukit Tele	210°–240°	0.8

Koefisien reduksi ditetapkan secara empiris berdasarkan studi literatur dan praktik pemodelan gelombang di danau atau perairan tertutup oleh Young & Verhagen (Young & Verhagen, 1996). Penyesuaian numerik juga umumnya digunakan dalam model SWAN dan MIKE21 untuk kalibrasi lokal. Dalam SIGADANA, nilai 0.7 dan 0.8 dipilih sebagai nilai konservatif yang mencerminkan hambatan sedang hingga tinggi, sesuai dengan skala Pulau Samosir dan bukit-bukit di sekitar Danau Toba.

**Estimasi Tinggi Gelombang Signifikan**

Pembentukan gelombang permukaan, baik laut maupun danau, mengikuti prinsip superposisi di mana setiap gelombang individu menyumbang terhadap bentuk total permukaan air yang kompleks (Holthuijsen, 2007). Tinggi gelombang signifikan, sebagaimana didefinisikan sebagai rata-rata sepertiga tertinggi dari ketinggian gelombang, merupakan

parameter utama dalam menentukan tingkat kenyamanan serta keselamatan pada pelayaran. Parameter ini digunakan secara luas dalam perancangan struktur terapung, analisis stabilitas kapal, serta sistem mitigasi risiko kelautan karena mampu memperkirakan besarnya beban hidrodinamik, risiko oleng, dan potensi kerusakan akibat gelombang ekstrim (Chakrabarti, 2005; Det Norske Veritas, 2010).

Sistem ini mengestimasi tinggi gelombang signifikan dengan menggunakan pendekatan model *Joint North Sea Wave Project* (JONSWAP) sebagai persamaan dasarnya. Dalam penerapannya, pendekatan ini mengestimasi tinggi gelombang signifikan berdasarkan parameter angin seperti kecepatan, durasi, dan *fetch*. Menggabungkan topografi wilayah dengan kondisi angin lokal dapat memberikan representasi yang lebih akurat tentang tinggi gelombang dalam kondisi tertentu (Holthuijsen, 2007). Persamaan JONSWAP dinotasikan sebagai berikut:

$$S(f) = \alpha g^2 f^{-5} \exp\left(-\frac{\beta g^2}{U^2 f^4}\right) \cdot \gamma \exp\left(-\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}\right) \quad (3)$$

**Keterangan:**

- $S(f)$  : jumlah energi gelombang perairan pada frekuensi tertentu
- $\alpha$  : koefisien empiris (0.0081)
- $g$  : percepatan gravitasi bumi (9.81 m/s<sup>2</sup>)
- $f$  : frekuensi gelombang perairan (Hz)
- $U$  : kecepatan angin di atas permukaan laut (m/s)
- $\beta$  : disipasi energi gelombang perairan (0.74)
- $\gamma$  : *peak enhancement factor*
- $f_p$  : frekuensi puncak spektrum (Hz)
- $\sigma$  : lebar spektrum di sekitar  $f_p$

Estimator tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ) pada SIGADANA dirancang menggunakan prinsip fisika di mana angin yang bertiup di atas danau akan menghasilkan gaya gesek dan menciptakan gelombang. Kemudian, gelombang akan tumbuh dengan mengikuti distribusi spektrum JONSWAP dan menyebarkan energi di berbagai frekuensi. Tinggi gelombang signifikan diestimasi menggunakan integrasi spektrum energi sebagai berikut:

$$H_s = 4\sqrt{m_0} \quad (4)$$

Persamaan (4) menyatakan bahwa tinggi gelombang signifikan sebanding dengan empat kali akar kuadrat dari momen spektrum orde nol ( $m_0$ ) yang ditentukan berdasarkan:

$$m_0 = \int_0^\infty \alpha g^2 f^{-5} \exp\left(-\frac{\beta g^2}{U^2 f^4}\right) \cdot \gamma \exp\left(-\frac{(f-f_p)^2}{2\sigma^2 f_p^2}\right) \quad (5)$$

Secara empiris, gelombang yang terbentuk dipengaruhi oleh energi kinetik angin yang ditransfer ke permukaan air. Ditinjau secara vektorial, tinggi gelombang signifikan berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan angin ( $U^2$ ) dan berbanding terbalik dengan percepatan gravitasi bumi ( $g$ ). Berdasarkan prinsip fisis oseanografi, pertumbuhan gelombang permukaan di perairan ditentukan oleh tiga faktor utama: Kecepatan angin ( $U$ ), kedalaman ( $d$ ), dan panjang fetch ( $F$ ). Mengikuti prinsip tersebut, bentuk non-dimensional tinggi gelombang signifikan dinyatakan dalam:

$$\left(\frac{H_s g}{U^2}\right) = f\left(\frac{gF}{U^2}, \frac{gd}{U^2}\right) \quad (6)$$

Pada tahap ini, efek kedalaman ( $\frac{gd}{U^2}$ ) diabaikan sementara dan fungsi  $f\left(\frac{gF}{U^2}\right)$  diubah ke dalam bentuk akar. Sehingga, persamaan (6) dapat disederhanakan menjadi:

$$\frac{H_s g}{U^2} = A \cdot \sqrt{\frac{gF}{U^2}} \quad (7)$$

Konstanta  $A$  dinyatakan sebesar 0.0016 berdasarkan eksperimen dan regresi data lapangan oleh penelitian terdahulu. Dengan demikian, didapati bentuk empiris awal untuk tinggi gelombang signifikan dalam kondisi *fetch-limited* sebagai berikut:

$$H_{s,deep} = 0.0016 \cdot \frac{U^2}{g} \cdot \sqrt{\frac{gF}{U^2}} \quad (8)$$

Estimasi awal ini valid untuk pengukuran pada perairan dalam. Namun, ketika gelombang merambat ke daerah perairan dangkal, efek interaksi dasar perairan mulai signifikan. Untuk itu, model SIGADANA menerapkan koreksi perairan dangkal terhadap nilai  $H_{s,deep}$  selaku hasil estimasi awal.

### Koreksi Boussinesq

Dalam simulasi propagasi gelombang,  $H_s$  hasil estimasi awal perlu dikoreksi saat gelombang bergerak ke wilayah perairan dangkal. Hal ini dikarenakan kedalaman air yang relatif kecil terhadap panjang gelombang ( $L_0$ ) menyebabkan terjadinya redaman

amplitudo akibat interaksi dengan dasar danau. Pada tahap inilah, efek kedalaman yang sebelumnya diabaikan sementara, diterapkan kembali. Dalam hal ini, model SIGADANA menggunakan fungsi hiperbolik tanh sebagai koefisien transfer energi. Koreksi ini merupakan bentuk turunan dari Persamaan Boussinesq. Suatu model yang umum digunakan untuk menggambarkan propagasi gelombang di perairan dangkal (*shallow water*) dengan mempertimbangkan efek non-linier dan dispersi gelombang. Dikembangkan oleh Joseph Boussinesq pada abad ke-19, Persamaan Boussinesq menjelaskan bagaimana energi gelombang berinteraksi dengan dasar perairan, khususnya pada wilayah dengan kedalaman yang lebih kecil dibandingkan panjang gelombangnya (Madsen et al., 1991).

Dengan memodelkan perubahan tinggi gelombang berdasarkan perubahan kedalaman (*shoaling effect*), didapatkan hubungan fungsional berbentuk:

$$H_s = H_{s,deep} \cdot shoaling_{factor}(h, L_0) \quad (9)$$

Di mana, fungsi *shoaling<sub>factor</sub>* dirumuskan sebagai fungsi hiperbolik tanh yang dinotasikan sebagai berikut:

$$shoaling_{factor} = \tanh\left(\frac{2\pi h}{L_0}\right) \quad (10)$$

Dengan demikian, bentuk final koreksi terhadap kondisi kedalaman perairan dilakukan dengan substitusi faktor *shoaling* yang dinotasikan dalam:

$$H_s = H_{s,deep} \cdot \tanh\left(\frac{2\pi h}{L_0}\right) \quad (11)$$

Persamaan akhir (11) merupakan model redaman energi di perairan yang sangat dangkal. Di mana, energi gelombang dilemahkan oleh gaya gesek dengan dasar danau. Semakin dangkal perairan, semakin besar peredaman gelombang yang terjadi, sehingga tinggi gelombang signifikan akan berkurang secara nonlinier mengikuti fungsi tanh. Persamaan ini sekaligus menutup proses estimasi tinggi gelombang signifikan pada model SIGADANA.

### Estimasi Kecepatan dan Arah Arus Gelombang

Arus gelombang merupakan hasil dari perpindahan massa air akibat interaksi antara gelombang dan dasar danau (Longuet-Higgins, 1953).

Arus gelombang pada perairan dangkal dapat dijelaskan melalui pendekatan konservasi momentum dan energi. Ketika gelombang memasuki daerah dangkal, amplitudo gelombang meningkat akibat *shoaling* dan sebagian energi berubah menjadi arus sepanjang lereng dasar danau. Hubungan antar parameter ini dijelaskan secara matematis oleh teori Boussinesq dan model *run-up* gelombang sebagai berikut:

$$U_c \propto \frac{H_s \cdot s}{T} \quad (12)$$

**Keterangan:**

- $U_c$  : kecepatan arus induksi (m/s)
- $H_s$  : tinggi gelombang signifikan (m)
- $s$  : kemiringan dasar danau dalam sudut derajat
- $T$  : periode gelombang (s)

Dengan mempertimbangkan nilai periode  $T$  yang tidak selalu diketahui dan bentuk gelombang yang bisa sangat kompleks di perairan dangkal, pendekatan ini disederhanakan dengan formula:

$$U_c = \begin{cases} \sqrt{g \cdot H_s \cdot \theta}, & d < 10 \text{ m} \\ 0.2 \cdot \sqrt{g \cdot H_s}, & d \geq 10 \text{ m} \end{cases} \quad (13)$$

**Keterangan:**

- $g$  : percepatan gravitasi bumi (9.81 m/s<sup>2</sup>)
- $\theta$  : slope dalam satuan radian
- $d$  : kedalaman statis perairan (m)

Persamaan (13) menunjukkan bahwa pada perairan dangkal, kecepatan arus meningkat tajam ketika gelombang tinggi bertemu dengan dasar perairan yang memiliki kemiringan curam. Adapun, pada perairan dalam, digunakan pendekatan empiris dengan koefisien reduksi sebesar 0.2 untuk menghindari *overestimated* dalam mengestimasi kecepatan arus. Persamaan ini sekaligus menutup proses estimasi kecepatan arus pada model SIGADANA. Selanjutnya, dilakukan estimasi terhadap arah arus gelombang.

Salah satu mekanisme alami dalam pembentukan arus gelombang adalah Spiral Ekman. Konsep ini pertama kali dikembangkan oleh Vagn Walfrid Ekman (1905) sebagai pola rotasi arah arus secara vertikal akibat interaksi antara gaya gesek dari angin dengan gaya *Coriolis* (rotasi bumi). Dalam teori Ekman klasik, arah arus permukaan tidak sejajar dengan arah angin, melainkan menyimpang sekitar 45° ke kanan dari arah angin di belahan bumi utara dan ke kiri di belahan bumi selatan, sebagai akibat langsung

dari defleksi *Coriolis*. Secara matematis, teori ini dinyatakan sebagai:

$$(\theta_c) = (\theta_w + \delta) \text{ mod } 360 \quad (14)$$

**Keterangan:**

- $\theta_c$  : arah arus permukaan (dalam derajat)
- $\theta_w$  : arah angin permukaan (dalam derajat)
- $\delta$  : sudut defleksi Ekman (45°)

**Klasifikasi Tingkat Bahaya**

Dalam menentukan tingkat bahaya, model SIGADANA mengadopsi panduan keselamatan pelayaran dari Stasiun Meteorologi Maritim Tanjung Priok (2022) yang ditandatangani oleh kepala stasiun terkait. Panduan tersebut, tentunya, sama persis dengan saran keselamatan pelayaran dari Pusat Maritim BMKG (2025).

**Tabel 2.** Klasifikasi Tingkat Bahaya

Jenis Kapal	Kecepatan Angin (knot)	Tinggi Gelombang (meter)	Arus Gelombang (m/s)
Perahu Nelayan	15	> 1.25	0.25
Kapal Tongkang	> 16	> 1.5	0.25–0.35
Kapal Feri	> 21	> 2.5	0.35–0.5
Kapal Besar	> 27	> 4.0	> 0.5

Klasifikasi ini kerap kali mengundang konflik karena masyarakat awam sering salah memahami konteks dari klasifikasi tersebut. Di mana, ketika kondisi perairan melebihi ambang batas untuk kapal nelayan berdasarkan klasifikasi di atas, muncul peringatan yang melarang kapal nelayan untuk berlayar. Menanggapi konflik tersebut, model SIGADANA akan menggunakan *Gross Tonnage* (GT) sebagai klasifikasi jenis kapal.

**Klasifikasi Gross Tonnage**

*Gross Tonnage* (GT) merupakan ukuran standar internasional berdasarkan kovensi yang diberlakukan oleh (*International Convention on Tonnage Measurement of Ships*, n.d.) pada tahun 1969 silam. *Gross Tonnage* dinyatakan sebagai sebagai besaran tak berdimensi (*dimensionless unit*) yang tidak memiliki satuan. GT mengukur volume total ruang internal kapal termasuk ruang kargo, mesin, akomodasi kru, dan lain sebagainya. GT dihitung menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$GT = K \cdot V \quad (15)$$

Di mana, total volume internal kapal ( $V$ ) dalam meter kubik ( $m^3$ ) dikalikan dengan koefisien  $K$  yang ditentukan menggunakan perhitungan logaritmik sebagai berikut:

$$K = 0.2 + 0.02 \cdot (V) \quad (16)$$

**Tabel 3.** Perhitungan Volume Internal Kapal

Jenis Kapal	Volume Internal ( $m^3$ )	GT ( $0.2 + 0.02 \cdot (V) \cdot V$ )
Perahu/Sampan	600 $m^3$	150
Feri Penumpang	1200 $m^3$	300
Feri Besar	2000 $m^3$	500

Kondisi perairan di Danau Toba jauh berbeda dengan kondisi di laut lepas. Oleh sebab itu, diperlukan suatu penyesuaian. Dalam hal ini, peneliti memilih pendekatan IQR karena mampu mengukur sebaran data secara robust tanpa terlalu dipengaruhi oleh nilai ekstrem (*outlier*). Dengan memanfaatkan selisih antara kuartil atas ( $Q_3$ ) dan kuartil bawah ( $Q_1$ ), IQR merepresentasikan rentang nilai tengah data yang paling stabil. Sehingga, dapat ditentukan ambang batas yang lebih realistis dan adaptif. Di mana, langkah awal dalam proses ini adalah melakukan kalkulasi statistik pada data historis 2020-2024 untuk mengetahui tren historis pada rentang waktu tersebut.

**Tabel 4.** Perhitungan Volume Internal Kapal

Statistik	Wind Speed (m/s)	Hs (m)	Wave Current (m/s)
Q1	3.1	0.03	0.11
Q3	6.9	0.17	0.27
IQR	3.8	0.14	0.16
Batas Bawah	0	0	0
Batas Atas	12.6	0.38	0.51

Hasil kalkulasi statistik pada tabel 4 digunakan sebagai acuan untuk membuat klasifikasi tingkat bahaya khusus perairan Danau Toba. Dengan rincian: Batas atas dijadikan batas maksimum,  $Q_3$  dijadikan batas minimum, adapun nilai tengah dari Batas atas dan  $Q_3$  dijadikan rentang tengah. Adapun, pembagian kapal didasarkan pada perhitungan GT yang sebelumnya dilakukan pada Tabel 3.

**Tabel 5.** Klasifikasi Tingkat Bahaya Khusus Perairan Danau Toba

GT	Kecepatan Angin (m/s)	Tinggi Gelombang (meter)	Arus Gelombang (m/s)
150 – 300	6.9	0.17	0.27
300 – 500	9.75	0.28	0.39
>500	12.6	0.38	0.51

## Sistem Navigasi

Prinsip kerja sistem navigasi pada SIGADANA adalah dengan mengidentifikasi arah-arah angin dan gelombang yang dinilai berisiko tinggi terhadap stabilitas kapal kecil maupun kapal penyeberangan. Jika arah angin dominan dan arah gelombang melawan arah perjalanan kapal, maka sistem akan mengeluarkan himbuan untuk menghindari lintasan tersebut. Pendekatan ini mengacu pada metode *rule-based alert system* seperti pada sistem evaluasi risiko milik Xu et al. (2020). Menggunakan *threshold* meteorologi berupa kecepatan angin dan tinggi gelombang signifikan, ketika kondisi teramati atau terprediksi melewati *threshold* yang ditetapkan, sistem akan memberikan himbuan sederhana berupa "hindari arah ini", "tunda pelayaran", atau "batasi kecepatan", untuk memudahkan pengambilan keputusan keselamatan bagi operator kapal.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Pengujian Simulasi Model

Seluruh proses simulasi ini diimplementasikan dalam *Notebook LAKE\_TOBA TIFF\_EXTRACT.ipynb* dan hasil akhirnya disimpan dalam dua dataset. Pertama, tersimpan sebagai dataset *Fetch\_Depth\_DanauTobaPort.csv* yang berisi nilai *fetch* dan kedalaman perairan pada setiap arah mata angin dari  $0^\circ$  hingga  $360^\circ$  dengan interval  $15^\circ$  untuk masing-masing pelabuhan. Kedua, tersimpan sebagai *dataframe Contour\_Slope\_DanauTobaPort.csv* yang berisi nilai estimasi lereng (*slope*) rata-rata danau berdasarkan jarak vertikal dan horizontal antara titik-titik kontur terdekat. Sampel yang akan dipaparkan adalah estimasi kondisi perairan Danau Toba pada arah  $146^\circ$  untuk Pelabuhan Ajibata.



**Gambar 1.** Sampel Monitoring Area Sekitar Pelabuhan Ajibata

Berdasarkan Gambar 1, diketahui arah angin  $146^\circ$  (Tenggara) pada Pelabuhan Ajibata, tercatat pada tanggal 25 April 2020, pukul 10:00 WIB. Kecepatan angin ( $U$ ) pada waktu tersebut diketahui 1.3 m/s. Adapun, percepatan gravitasi bumi dinyatakan sebesar

9.81 m/s<sup>2</sup>. Setelah mendapatkan informasi-informasi dasar ini, sistem memulai kalkulasinya.

Diawali dari estimasi kedalaman, langkah pertama yang dilakukan sistem adalah mencari dua titik terdekat. Dalam kasus ini, arah 146° berada di antara arah 135° dan 150°. Berdasarkan *dataframe Fetch\_Depth\_DanauTobaPort.csv*, diketahui *depth\_Ajibata* untuk kedua arah tersebut masing-masing 7.42 dan 9.76 dalam satuan meter. Kemudian, menggunakan persamaan interpolasi linear, sistem akan menghitung kedalaman danau pada arah tersebut dengan:

$$h_{(146)} = h_{150} + \left(\frac{146 - 135}{150 - 135}\right) \cdot (h_{150} - h_{135})$$

$$h_{(146)} = 7.42 + \left(\frac{11}{15}\right) \cdot (9.76 - 7.42)$$

$$h_{(146)} = 9.136 \text{ meter}$$

Selanjutnya, sistem melakukan estimasi panjang *fetch*. Berdasarkan *dataframe Fetch\_Depth\_DanauTobaPort.csv*, diketahui *fetch\_Ajibata* untuk arah 135° dan 150° adalah 250 dan 300 dalam satuan meter. Kemudian, menggunakan persamaan interpolasi linear (2), sistem akan menghitung panjang *fetch* sebagai berikut:

$$F_{(146)} = F_{135} + \left(\frac{146 - 135}{150 - 135}\right) \cdot (F_{150} - F_{135})$$

$$F_{(146)} = 250 + \left(\frac{11}{15}\right) \cdot (300 - 250)$$

$$F_{(146)} = 286.67 \text{ meter}$$

Interpolasi antar arah ini sekaligus melakukan koreksi *fetch* secara spasial, sebagaimana dijelaskan pada Table 1, dengan mengkombinasikan arah angin dengan lokasi geografis pelabuhan.

Masuk ke persamaan JONSWAP, mula-mula hitung periode puncak ( $T_p$ ):

$$T_p = 0.286 \cdot \frac{U}{g} \left(\frac{gF}{U^2}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$T_p = 0.286 \cdot \frac{1.3}{9.81} \left(\frac{9.81 \cdot 286.67}{1.3^2}\right)^{\frac{1}{3}}$$

$$T_p = 0.286 \cdot 0.1325 \cdot 11.79$$

$$T_p = 0.446 \text{ s}$$

Selanjutnya, hitung panjang gelombang ( $L_0$ ):

$$L_0 = \frac{gT_p^2}{2\pi}$$

$$L_0 = \frac{9.81 \cdot 0.446^2}{2(3.141)}$$

$$L_0 = 0.3105 \text{ meter}$$

Estimasi tinggi gelombang bergantung pada dua kondisi, perairannya dalam atau dangkal. Maka, langkah selanjutnya adalah memeriksa apakah perairan tersebut termasuk dangkal menggunakan pertidaksamaan *mask\_shallow* ( $h < \frac{L_0}{20}$ ) sebagai berikut:

$$\text{shallow factor} = \frac{L_0}{20}$$

$$\text{shallow factor} = \frac{0.3105}{20}$$

$$\text{shallow factor} = 0.0155 \text{ meter}$$

Kedalaman ( $h$ ) 9.136 meter jauh lebih besar atau lebih dalam dari 0.0155 meter, sehingga perairan tersebut masih tergolong *deep water* dan tidak perlu koreksi *shoaling*. Maka, estimasi tinggi gelombang akan digunakan menggunakan persamaan:

$$H_{s,deep} = 0.0016 \cdot \frac{U^2}{g} \cdot \sqrt{\frac{gF}{U^2}}$$

$$H_{s,deep} = 0.0016 \cdot \frac{1.3^2}{9.81} \cdot \sqrt{\frac{9.81 \cdot 286.67}{1.3^2}}$$

$$H_{s,deep} = 0.01 \text{ meter}$$

Hasil kalkulasi dan *output monitoring* sama-sama menunjukkan nilai 0.01 meter untuk tinggi gelombang signifikan. Hal ini menunjukkan bahwa persamaan JONSWAP dan koreksi Boussinesq berhasil diimplementasikan dengan baik oleh sistem. Tidak hanya itu, persamaan yang digunakan untuk interpolasi kedalaman dan panjang *fetch*, serta logika untuk membedakan perairan dalam dan dangkal juga berfungsi dengan baik.

Beralih ke estimasi kecepatan arus gelombang. Nilai estimasi kedalaman dan panjang *fetch* kembali disubstitusikan, dengan tambahan parameter kemiringan dasar danau (*slope*). Estimasi *slope* dilakukan melalui fungsi *calculate\_slope*. Fungsi ini menghitung rata-rata *slope* di sekitar masing-masing pelabuhan dari 10 titik kontur terdekat dari lokasi pengujian berdasarkan jarak geodesik. Setiap titik kontur memiliki informasi elevasi dan posisi spasial yang telah dikonversi ke dalam nilai kemiringan (dalam derajat). Proses ini membandingkan lokasi pengujian dengan ratusan titik kontur yang dikumpulkan dalam

*dataframe* *Contour\_Slope\_DanauTobaPort.csv*. Pengujian dilakukan di Pelabuhan Ajibata dengan *Latitude* dan *Longitude* diketahui masing-masing 2.656475066475027° LS dan 98.93174216141608° BT. Dengan bantuan kalkulasi dari fungsi *calculate\_slope*, dapat diketahui bahwa *slope* pada arah ini adalah 2.86°.

Berdasarkan formula empiris untuk estimasi kecepatan arus gelombang ( $U_c$ ) pada Persamaan (13), kedalaman ( $h$ ) 9.136 meter tergolong dangkal. Dengan demikian, estimasi kecepatan arus gelombang menggunakan persamaan:

$$U_c = \sqrt{g \cdot H_s \cdot \theta}$$

Di mana,

$$\theta = \tan(2.86^\circ)$$

$$\theta = 0.0499$$

Maka,

$$U_c = \sqrt{9.81 \cdot 0.01 \cdot 0.0499}$$

$$U_c = 0.07 \text{ m/s}$$

Kemudian, arah arus gelombang diukur menggunakan Spiral Ekman sebagai berikut:

$$(\theta_c) = (\theta_w + \delta) \text{ mod } 360$$

$$(\theta_c) = (146 + 45) \text{ mod } 360$$

$$(\theta_c) = 191^\circ \text{ (Selatan)}$$

Hasil kalkulasi dan *output monitoring* sama-sama menunjukkan nilai 0.07 m/s untuk kecepatan arus gelombang dan 191° untuk arah arusnya. Hal ini menunjukkan bahwa persamaan empiris dan prinsip Spiral Ekman berhasil diimplementasikan dengan baik oleh sistem. Tidak hanya itu, logika untuk membedakan perairan dalam dan dangkal juga berfungsi dengan baik.

### Evaluasi Sistem

Evaluasi terhadap hasil kalkulasi sistem dilakukan untuk menilai performa dan validitas hasil pemodelan gelombang dalam sistem SIGADANA. Evaluasi ini menjadi sangat penting mengingat tidak tersedianya data observasi lapangan (*ground truth*) yang memungkinkan verifikasi secara langsung. Oleh karena itu, pendekatan yang digunakan dalam evaluasi adalah verifikasi dan validasi internal berbasis statistik dan prinsip fisika gelombang.

Analisis statistik digunakan untuk mengevaluasi parameter utama dalam *output* model. Bagian ini menghitung metrik seperti nilai minimum, maksimum, rata-rata, median, modus, kuartil (Q1 dan Q3), serta batas outlier berdasarkan metode IQR.

- 1) Tinggi Gelombang Signifikan  
 Minimum 0 m, terjadi saat *fetch* < 200 m atau kecepatan angin = 0. Maksimum 2.39 m (tercatat di Pelabuhan Tigaras), masih dalam batas yang wajar untuk perairan danau besar.
- 2) Panjang *Fetch*  
 Berkisar antara 0 m (tercatat di lokasi seperti Pelabuhan Muara yang menghadap arah terhalang) hingga 48.44 km, sesuai dengan geometri terbuka Danau Toba.
- 3) Kecepatan Angin  
 Nilai maksimum mencapai 29.8 m/s di Pelabuhan Tigaras, mencerminkan kemungkinan kondisi ekstrem cuaca di wilayah perairan danau.
- 4) Arus Gelombang  
 Nilai maksimum tercatat 0.97 m/s (tercatat di Pelabuhan Tigaras), tergolong realistis untuk arus akibat gelombang pada kondisi *fetch* panjang dan kecepatan angin tinggi.

Hasil analisis statistik tersebut menunjukkan bahwa sistem SIGADANA dapat digunakan sebagai dasar awal sistem peringatan dini, meskipun belum divalidasi terhadap data observasi lapangan. Untuk memperkuat kredibilitas sistem, dilakukan pengaplikasian model OLS untuk mengukur ketepatan prediksi Tinggi Gelombang Signifikan dan Kecepatan Arus Gelombang menggunakan prediktor: *wind\_speed\_10m*, *wind\_dir\_sin*, *wind\_dir\_cos*, dan *fetch*.

**Tabel 6.** Hasil Evaluasi Model OLS

Parameter	R <sup>2</sup>	Durbin-Watson	Condition No.
Tinggi Gelombang Signifikan (Hs)	0.752	0.778	1.69×10 <sup>4</sup>
Kecepatan Arus Gelombang (Wave_Current)	0.732	0.830	1.69×10 <sup>4</sup>

Tabel 6 menunjukkan bahwa parameter Tinggi Gelombang Signifikan (Hs) dan Kecepatan Arus Gelombang dapat dijelaskan dengan baik oleh variabel prediktor. Model untuk Hs memiliki nilai koefisien determinasi R<sup>2</sup> sebesar 0.752 yang berarti sekitar 75% variasi tinggi gelombang mampu diprediksi, sedangkan model untuk Kecepatan Arus Gelombang memiliki R<sup>2</sup> sebesar 0.732 atau sekitar 73% variasi dapat dijelaskan. Kedua model ini menunjukkan pola diagnostik yang serupa, yaitu adanya autokorelasi residual yang ditunjukkan oleh nilai Durbin-Watson masing-masing sebesar 0.778 dan 0.83, serta potensi multikolinearitas



yang tercermin dari condition number yang sama-sama tinggi sebesar  $1.69 \times 10^4$ .

## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan sebagai berikut:

- 1) Sistem SIGADANA mampu mengintegrasikan data cuaca numerik dan pemodelan gelombang dengan pendekatan JONSWAP untuk menghasilkan estimasi tinggi gelombang signifikan ( $H_s$ ), arus permukaan, dan arah angin di tujuh pelabuhan utama Danau Toba.
- 2) Sistem peringatan dini berbasis ambang batas pelayaran berhasil mengklasifikasikan kondisi menjadi beberapa tingkat risiko (aman, waspada, berbahaya, dan sangat berbahaya), yang ditampilkan dalam antarmuka web secara informatif dan mudah dipahami.
- 3) Validasi internal melalui skrip Verifikasi.ipynb dan Validasi\_Pengujian.ipynb menunjukkan bahwa hasil pemodelan tidak mengandung nilai ekstrem yang tidak realistis dan telah memenuhi batas fisik parameter meteorologis dan oseanografis.
- 4) Visualisasi hasil monitoring dan rekomendasi navigasi membantu pengguna, khususnya operator pelayaran dan masyarakat pesisir, dalam mengambil keputusan terkait jadwal dan rute pelayaran secara lebih aman dan responsif terhadap kondisi cuaca.
- 5) Pengembangan sistem ini menunjukkan bahwa pendekatan berbasis data terbuka dan metode numerik sederhana dapat digunakan secara efektif dalam membangun sistem informasi cuaca lokal tanpa harus bergantung pada sensor lapangan atau pengamatan langsung.

## DAFTAR PUSTAKA

- Chakrabarti, S. K. (2005). *Handbook of Offshore Engineering: I*. Elsevier. [www.bookaid.org](http://www.bookaid.org)
- Det Norske Veritas. (2010). *Design of Offshore Wind Turbine Structures*. <http://www.dnv.com>
- Dian Minarto, & Kurniawan Teguh Santoso. (2023). Pengembangan Sistem Monitoring Dan Prediksi Cuaca Maritim Untuk Peningkatan Keselamatan Navigasi. *Sammajiva: Jurnal Penelitian Bisnis Dan Manajemen*, 1(4), 231–238. <https://doi.org/10.47861/sammajiva.v1i4.562>
- Erlangga, R. (2018). *Kapal Tenggelam di Danau Toba Saat Cuaca Buruk*. <https://news.detik.com/berita/d-4072771/kapal-tenggelam-di-danau-toba-saat-cuaca-buruk>
- Hasselmann, K., Barnett, T. P., Bouws, E., & Carlson, H. (1973). *Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea*

*Wave Project (JONSWAP)*.

<https://www.researchgate.net/publication/256197895>

- Holthuijsen, L. (2007). *Waves in Oceanic and Coastal Waters*. <https://doi.org/10.2277/0521860288>
- International Convention on Tonnage Measurement of Ships*. (2025). Retrieved September 23, 2025, from <https://www.imo.org/en/about/conventions/pages/international-convention-on-tonnage-measurement-of-ships.aspx>
- Longuet-Higgins, M. S. (1953). *Mass Transport in Water Waves*. <https://royalsocietypublishing.org/>
- Madsen, P. A., Murray, R., & Sorensen, O. R. (1991). *A new form of the Boussinesq equations with improved linear dispersion characteristics* (Vol. 15).
- Sinaga, T. F., & Harahap, A. S. (2024). *Pelayaran Rakyat Di Pelabuhan Tigaras Kabupaten Simalungun Provinsi Sumatera Utara*.
- Stewart, R. (2008). *Introduction To Physical Oceanography* (September 2008). Texas A & M University.
- Wal hidayat, T., & Nasution, I. (2019). Persepsi Publik Tentang Destinasi Pariwisata Danau Toba Sebagai Global Geopark Kaldera UNESCO. *Publikauma : Jurnal Administrasi Publik Universitas Medan Area*, 7(2), 88. <https://doi.org/10.31289/publika.v7i2.2943>
- Wisudo, S. (2014). *Wilayah Perairan Indonesia*.
- Xu, S., Ma, M., Yin, K., & Tang, S. (2020). Risk evaluation system of navigation security based on coupled wind and wave model: A case of study of Qiongzhou strait. *IET Intelligent Transport Systems*, 14(10), 1311–1318. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2019.0418>
- Yahsyi, A. (2018). *INFOGRAFIS: Deretan Insiden Kecelakaan Kapal di Danau Toba*. <https://www.cnnindonesia.com/nasional/20180621172333-23-307858/infografis-deretan-insiden-kecelakaan-kapal-di-danau-toba>
- Young, I. R., & Verhagen, L. A. (1996). The growth of fetch limited waves in water of finite depth. Part 1. Total energy and peak frequency. *Coastal Engineering*, 29(1–2), 47–78. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(96\)00006-3](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(96)00006-3)