

Analisis Potensi Energi Gelombang Laut di Perairan Selatan Sulawesi Tenggara: Studi Kasus Perairan Buton Selatan

Januar Saleh Kaimuddin¹, Mansur², Lalang¹, Nanang Endriatno³, Riska⁴, dan La Ode M. Gunawan Giu⁵

¹ Teknik Kelautan, Universitas Halu Oleo, ² Teknik Elektro, Universitas Halu Oleo, ³ Teknik Mesin, Universitas Halu Oleo,

⁴ Ilmu Kelautan, Universitas Sembilanbelas November Kolaka, ⁵ Ikatan Sarjana Kelautan Indonesia

Corresponding Author: januarsalehkaimuddin@uho.ac.id

Abstract — The sea area of Southeast Sulawesi Province is nearly three times larger than its land area, reaching 11 million hectares. This vast area holds significant potential, one of which is wave energy. Wave energy is an accumulation of the potential and kinetic energy of waves. This study aims to identify the potential energy and wave power in the southern water of Southeast Sulawesi, specifically in the waters of South Buton. The research approach considers that wave energy is influenced by the density of seawater and wave height. Furthermore, wave power is the energy per unit of time transmitted in the direction of wave propagation. Wave data was obtained from reanalysis-ERA5 predictions in the deep sea, followed by wave propagation (deformation) analysis by extrapolating Airy wave theory to obtain the wave-forming variables propagating towards the shore. The result of the wave deformation analysis were then used to calculate the potential power and energy of ocean waves in the study area.

Keyword — Wave energy, wave power, Airy wave theory, South Buton waters.

Abstrak — Luas wilayah laut Provinsi Sulawesi Tenggara hampir tiga kali lebih besar dari luas daratannya, yang mencapai 11 juta hektar. Hal ini menyimpan potensi besar, salah satunya adalah energi gelombang laut. Energi gelombang merupakan akumulasi dari energi potensial dan energi kinetik gelombang. Studi ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi energi dan daya gelombang di wilayah selatan perairan Sulawesi Tenggara, tepatnya di perairan Buton Selatan. Pendekatan penelitian ini mempertimbangkan bahwa energi gelombang dipengaruhi oleh densitas (kerapatan) massa air laut dan tinggi gelombang. Selanjutnya, daya gelombang merupakan energi per satuan waktu yang ditransmisikan dalam arah perambatan gelombang. Data gelombang diperoleh dari prediksi reanalysis ERA5 di laut dalam yang selanjutnya dilakukan analisis perambatan gelombang (deformasi) dengan mengekstrapolasi teori gelombang Airy untuk mendapatkan variabel-variabel pembentuk gelombang yang merambat ke pantai. Hasil prediksi gelombang tersebut kemudian digunakan untuk menghitung potensi daya dan energi gelombang laut di lokasi studi.

Kata kunci — Energi gelombang, daya gelombang, teori gelombang Airy, perairan Buton Selatan.

I. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan negara yang memiliki potensi energi laut yang dapat dikembangkan meliputi energi pasang surut, gelombang, angin, dan panas laut. Namun energi laut merupakan sektor energi terbarukan yang paling sedikit berkembang di Indonesia [1]. Kementerian ESDM pada

tahun 2016 melaporkan, potensi teoritis dan teknis kolektif energi laut masing-masing sebesar 288 GW dan 18-72 GW [2]. Pada tahun 2021, telah dimutakhirkan data potensi energi laut yang mencapai 60 GW. Adapun jenis energi gelombang laut sebagai potensi energi baru dan terbarukan memiliki potensi mencapai 18 MW [3]. Meskipun demikian, potensi ini belum dioptimalkan khususnya dalam hal pemanfaatannya. Potensi energi laut tersebut masih dianalisis secara global dengan menerapkan berbagai asumsi. Oleh sebab itu, perhitungan potensi energi laut perlu diteliti lebih mendalam dengan menyesuaikan karakteristik perairan setempat [4].

Provinsi Sulawesi Tenggara memiliki luas wilayah daratan mencapai 38140 km² dengan garis pantai mencapai 1740 km. Adapun luas wilayah lautnya mencapai 110000 km² [5]. Wilayah perairan yang hampir mencapai tiga kali lebih luas dari wilayah daratannya ini menyimpan sumber daya non hayati yang salah satunya adalah potensi energi laut. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi potensi energi gelombang di perairan Sulawesi Tenggara dengan mengambil studi kasus di perairan Buton Selatan. Hal ini didasarkan pada laporan Kementerian ESDM yang menyebutkan bahwa pada wilayah perairan Sulawesi Tenggara bagian selatan sangat potensial untuk dikembangkan energi angin. Dalam hal ini, angin pada wilayah perairan sisi selatan tersebut tepatnya di perairan Buton Selatan memiliki kecepatan 4-6 meter/detik [6].

Dengan mempertimbangkan bahwa gelombang di laut dominan dibangkitkan oleh angin, penelitian ini dilakukan dengan menggunakan data prediksi gelombang dari ERA5 yaitu data karakteristik gelombang berupa tinggi dan periode gelombang. Data gelombang yang digunakan dalam analisis adalah tinggi dan periode gelombang signifikan. Selanjutnya dianalisis perambatan gelombang (deformasi) yang menuju pantai dengan pendekatan teori gelombang Airy. Hasil ekstrapolasi perambatan gelombang atau deformasinya kemudian digunakan untuk menghitung potensi energi dan daya gelombang di lokasi studi.

II. ENERGI GELOMBANG LAUT

Penelitian terkait potensi energi gelombang laut di Indonesia telah banyak dilakukan. Utami (2010), mengkaji

potensi konversi energi gelombang laut menggunakan sistem *Oscillating Water Column* (OWC) di tiga puluh wilayah lautan Indonesia. Sistem OWC dipilih karena keunggulannya yang cocok dengan karakteristik wilayah pantai Indonesia. Sebagai hasilnya, untuk perairan di wilayah selatan Pulau Sulawesi memiliki potensi 63 MW pada kondisi maksimum [7]. Sona et al. (2014) mengkaji kinerja sistem OWC dalam menangkap dan mengkonversi energi gelombang laut menjadi energi listrik. Dengan menggunakan konfigurasi peralatan yang mencakup pelampung dan silinder OWC, serta memvariasikan panjang dan tinggi gelombang, ditemukan kinerja paling efektif dicapai pada panjang gelombang 0.9 m dan tinggi gelombang 0.23 m, menghasilkan tekanan 1.11 bar, kecepatan 39.39 m/s dan volume 0.0057 m³ dalam silinder OWC [8]. Zikra (2017) melakukan penilaian awal potensi energi gelombang di Indonesia dengan menggunakan data dari *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF) selama 35 tahun (1980-2014). Zikra menjelaskan lokasi di selatan Laut Jawa menunjukkan potensi energi gelombang tertinggi dengan daya gelombang tahunan mencapai maksimum 22 kW/m, terutama dari Januari hingga Desember [9]. Setyawan (2018) melakukan penelitian lanjutan yang fokus pada pemetaan potensi energi gelombang di perairan Indonesia. Metode *Inverse Distance Weight* digunakan untuk menghitung potensi energi dari data terbatas, terutama data dari citra satelit Altimetri resolusi 1° x 1°. Hasil penelitiannya menunjukkan perairan Indonesia memiliki potensi energi gelombang sebesar 717.000 MW [10]. Faulincia (2019) menganalisis potensi daya konversi tenaga gelombang laut menggunakan sistem OWC di perairan Kendari. Hasil analisis menunjukkan daya terkecil yang dihasilkan adalah 348.5 Watt, sementara daya terbesar mencapai 623291.4 Watt. Penerapan sistem OWC di perairan kendari memiliki efisiensi mencapai 11.97% [11].

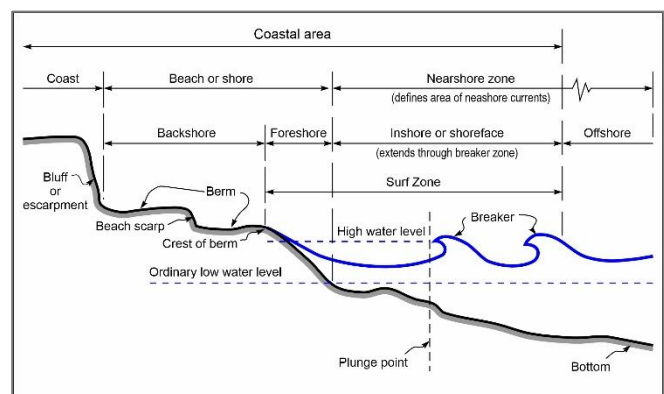
Kondisi geografis Indonesia yang lebih luas wilayah perairannya dapat menjadikan gelombang laut sebagai sumber energi yang efektif [12]. Indonesia menghadapi permintaan listrik yang terus meningkat dimana sebagian besar masih dipenuhi oleh bahan bakar fosil. Pemerintah telah merumuskan kebijakan untuk pengelolaan energi terbarukan melalui Perpres Nomor 22 Tahun 2017 tentang Rencana Umum Energi Nasional (RUEN). Rencana ini untuk mendorong peningkatan penggunaan *Renewable Energy Technologies* (RET), namun implementasinya masih lambat. Langer et al. (2021) mengulas literatur tentang potensi sembilan RET di Indonesia dan berkesimpulan bahwa potensi RET di Indonesia mungkin lebih besar dari yang di asumsikan. Ia juga mengungkapkan bahwa dalam penelitian konverter energi gelombang, teknologi dengan sistem OWC yang paling sering dipelajari di Indonesia dimana potensi spesifik energi gelombang diukur dalam satuan kW/m [1]. Energi gelombang memiliki potensi tertinggi di antara energi terbarukan lainnya seperti energi surya dan angin. Chenari et al. (2016) memperkenalkan sistem energi gelombang dan beberapa kemungkinan untuk meningkatkan teknologinya

dengan mengemukakan berbagai jenis konverter energi gelombang (*Wave Energy Converters/WECS*) [13].

Lautan menyimpan cadangan energi yang sangat besar tersebar dalam berbagai fenomena. Diantara jenis energi utama yang terkait dengan laut meliputi arus laut, salinitas osmotik, OTEC (*Ocean Thermal Energy Conversion*), pasang surut, dan gelombang laut [14]. Penelitian ini hanya akan fokus dalam membahas potensi energi gelombang laut.

A. Gelombang Laut

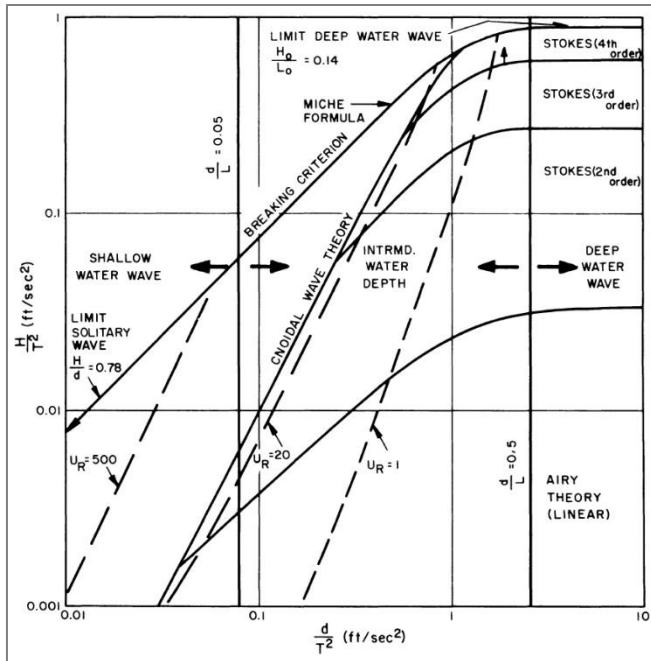
Gelombang laut dominan dihasilkan oleh interaksi angin dengan permukaan air laut. Gelombang awalnya terbentuk melalui proses resonansi dan tegangan yang kompleks, dimana gelombang dengan ketinggian, panjang, dan periode yang berbeda dihasilkan dan bergerak ke berbagai arah. Setelah terbentuk, gelombang laut dapat bergerak jauh menyebar dan berkurang ketinggiannya namun tetap mempertahankan panjang dan periodenya [15]. Saat gelombang mendekati garis pantai, gelombang mengalami perubahan bentuk oleh proses refraksi dan pendangkalan (*shoaling*) sebelum akhirnya pecah di pantai. Setelah pecah, gelombang masuk ke dalam zona yang disebut zona *surf*. Definisi visual yang menunjukkan profil pantai terkait dengan daerah gelombang pecah dan *surf zone* ditunjukkan pada Gambar 1. Refraksi terjadi karena adanya pengaruh perubahan kedalaman laut. Di laut dalam, gelombang merambat tanpa dipengaruhi oleh dasar laut namun di laut transisi dan dangkal, dasar laut mempengaruhi gelombang. Bila ditinjau suatu garis puncak gelombang, bagian dari puncak yang berada di air yang lebih dangkal akan merambat dengan kecepatan yang lebih kecil. Akibatnya garis puncak gelombang akan membelok dan berusaha untuk sejajar dengan garis kontur dasar laut [16].



Gambar 1. Definisi visual dari istilah yang menggambarkan profil pantai [17].

Secara umum, gelombang laut sebenarnya sangat kompleks dan sulit dijelaskan secara matematis karena ketidak-linieran, tiga dimensi, dan bentuknya yang acak [17]. Terdapat beberapa teori dengan berbagai derajat kompleksitas dan ketelitian untuk menggambarkan

gelombang di laut, diantaranya adalah teori gelombang Airy, Stokes, Gerstner, Mich, Knoidal, dan tunggal. Masing-masing dari teori tersebut mempunyai batasan yang berbeda. Teori gelombang yang paling sederhana adalah teori gelombang linier atau teori gelombang amplitudo kecil yang dikemukakan oleh Airy pada tahun 1845 [16].



Gambar 2. Batas validitas untuk berbagai teori gelombang [28].

Teori gelombang amplitudo kecil diturunkan berdasarkan persamaan Laplace untuk aliran tak rotasi (*irrotational flow*) dengan kondisi batas di permukaan air dan dasar laut. Kondisi batas di permukaan air didapat dengan melinierkan persamaan Bernoulli untuk aliran tak mantap. Penyelesaian persamaan tersebut memberikan potensial kecepatan periodik untuk aliran tak rotasional. Potensi kecepatan ini kemudian digunakan untuk menurunkan persamaan dari berbagai karakteristik gelombang seperti fluktuasi muka air, kecepatan dan percepatan partikel, tekanan, kecepatan rambat gelombang, dan sebagainya [16].

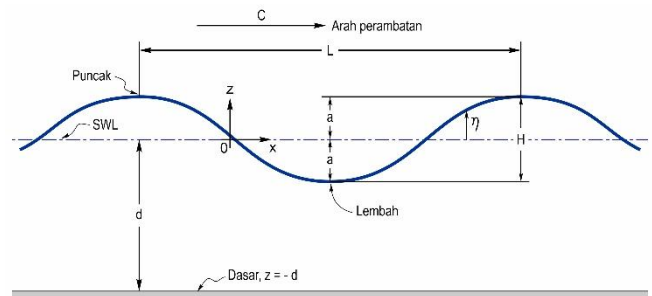
Penjelasan sederhana dari teori gelombang amplitudo kecil dengan mendeskripsikan secara mendasar dari gelombang osilasi sinusoidal meliputi panjang gelombang L , yaitu jarak horizontal antara titik-titik yang sesuai pada dua gelombang berturut-turut, tinggi H , yaitu jarak vertikal dari puncak ke dasar gelombang, periode T , yaitu waktu yang dibutuhkan dua puncak berturut-turut untuk melewati satu titik tertentu, dan kedalaman d , yaitu jarak dari dasar ke permukaan air diam, SWL . Lihat Gambar 3.

Pengaruh kedalaman terhadap perubahan bentuk gelombang yang dijelaskan di atas dapat diklasifikasikan sebagai perbandingan kedalaman relatif yang bertujuan untuk menyederhanakan rumus-rumus gelombang. Klasifikasi

tersebut berdasarkan besarnya d/L dan batas yang dihasilkan dari fungsi $\tanh(2\pi d/L)$ (lihat Tabel 1).

Tabel 1. Nilai klasifikasi gelombang berdasarkan kedalaman relatif [17]

Klasifikasi	d/L	$2\pi d/L$	$\tanh(2\pi d/L)$
Laut dalam	$> 1/2$	$> \pi$	≈ 1
Laut transisi	$1/20$ s/d $1/2$	$1/5$ s/d π	$\tanh(2\pi d/L)$
Laut dangkal	$< 1/20$	$< 1/5$	$2\pi d/L$



Gambar 3. Sketsa definisi gelombang [17].

Gambar 3 menunjukkan suatu gelombang yang berada pada koordinat Kartesian dua dimensi, dimana gelombang menjalar pada arah sumbu x positif. Notasi η menunjukkan perpindahan permukaan air relatif terhadap SWL dan merupakan fungsi x dan waktu t . Pada puncak gelombang, η sama dengan amplitudo (a) atau setengah dari tinggi gelombang (H).

d : jarak antara muka air rata-rata terhadap muka air diam

$\eta(x, t)$: fluktuasi muka air terhadap muka air diam

a : amplitudo gelombang

H : tinggi gelombang ($2a$)

L : panjang gelombang

T : periode gelombang

C : kecepatan rambat gelombang (L/T)

k : angka gelombang ($2\pi/L$)

σ : frekuensi gelombang ($2\pi/T$)

Teori gelombang amplitudo kecil diturunkan dari persamaan kontinuitas untuk aliran tak rotasi (Persamaan Laplace), yaitu:

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} = 0 \quad (1)$$

Dengan:

$$u = \frac{\partial \varphi}{\partial x}; v = \frac{\partial \varphi}{\partial y} \quad (2)$$

Dimana φ merupakan potensial kecepatan, u kecepatan partikel sumbu x , dan v kecepatan partikel sumbu y . Kondisi batas di dasar laut dari pers. (2) adalah kecepatan vertikal nol.

$$v = \frac{\partial \phi}{\partial y} = 0; y = -d \quad (3)$$

Kondisi batas pada permukaan diperoleh dari pers. Bernoulli untuk aliran tak mantap.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2) + gy + \frac{p}{\rho} = 0 \quad (4)$$

g adalah percepatan gravitasi, p adalah tekanan dan ρ adalah rapat massa zat cair.

Apabila persamaan tersebut di linierkan, yaitu dengan mengabaikan u^2 dan v^2 pada permukaan $y = \eta$, dalam hal ini $\eta = 0$, maka persamaan Bernoulli pada kondisi batas tersebut menjadi:

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t} \Big|_{y=0} \quad (5)$$

Persamaan tersebut diselesaikan untuk mendapatkan nilai ϕ . Berdasarkan nilai ϕ tersebut, maka persamaan potensial yang mendasari sifat-sifat gelombang seperti fluktuasi muka air, kecepatan rambat gelombang, kecepatan partikel, dan sebagainya dapat diturunkan [16]. Persamaan tersebut diturunkan menjadi:

$$\phi = \frac{ag \cosh k(d+y)}{\sigma \cosh kd} \sin(kx - \sigma t) \quad (6)$$

Cepat rambat gelombang C sebagai fungsi T dan d serta L sebagai fungsi kedalaman diformulasikan masing-masing sebagai berikut:

$$C = \frac{gT}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (7)$$

$$L = \frac{gT^2}{2\pi} \tanh \frac{2\pi d}{L} \quad (8)$$

Selanjutnya, dengan memasukkan nilai pada Tabel 1, dapat diperoleh untuk laut dalam:

$$C_0 = \frac{gT}{2\pi} \quad (9)$$

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (10)$$

Dengan memasukkan percepatan gravitasi $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ maka pers. (5) menjadi:

$$L_0 = 1,56T^2 \quad (11)$$

Indeks 0 untuk menunjukkan bahwa nilai-nilai tersebut untuk kondisi laut dalam. Untuk kondisi laut dangkal diperoleh persamaan sebagai berikut:

$$C = \sqrt{gd} \quad (12)$$

$$L = \sqrt{gd} T = C T \quad (13)$$

Ilustrasi pengaruh kedalaman terhadap perubahan bentuk gelombang diilustrasikan pada Gambar 4.

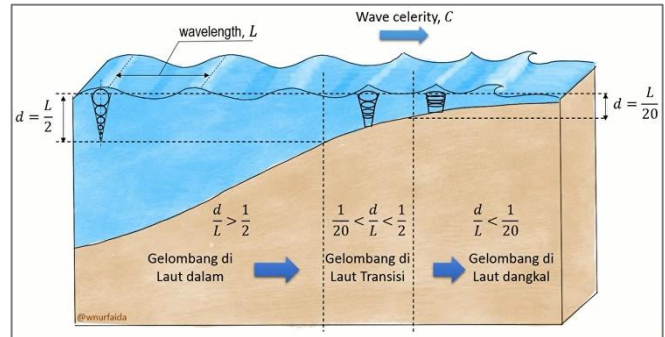
Profil muka air dapat dihitung dari kondisi batas di muka

air (pers. 5), yaitu:

$$\eta = -\frac{1}{g} \frac{\partial \phi}{\partial t}; y = 0$$

Dengan memasukkan nilai ϕ (pers. 6) ke dalam pers. (5) tersebut, untuk $y = 0$, diperoleh:

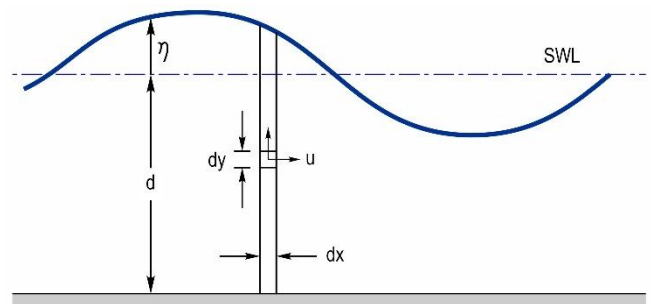
$$\eta = a \cos(kx - \sigma t) \quad (14)$$



Gambar 4. Pengaruh kedalaman terhadap perubahan bentuk gelombang [29]

B. Energi dan Daya Gelombang

Energi mekanik gelombang merupakan penjumlahan dari energi kinetik dan energi potensial [18]. Persamaan untuk masing-masing energi dapat diturunkan dengan mempertimbangkan Gambar 5. Energi kinetik untuk lebar satuan puncak gelombang dan untuk satu panjang gelombang E_k sama dengan integral selama satu panjang gelombang dan kedalaman air dari setengah kali massa elemen diferensial dikalikan dengan kecepatan kuadrat elemen tersebut.



Gambar 5. Sketsa definisi penurunan energi gelombang.

$$E_k = \int_0^L \int_{-d}^0 \frac{1}{2} \rho (u^2 + v^2) dx dy$$

Dengan mensubstitusikan pers. (2), terhadap persamaan di atas, persamaan energi kinetik didapatkan:

$$E_k = \frac{\rho g H^2 L}{16} \quad (15)$$

Jika kita mengurangi energi potensial gelombang dengan energi potensial dari masa air diam seperti

ditunjukkan Gambar 5, akan didapatkan energi potensial yang disebabkan oleh gerak gelombang. Energi potensial yang dihasilkan oleh satu panjang gelombang tiap satuan lebar puncak gelombang E_p adalah:

$$E_p = \int_0^L \rho g (d + \eta) \left(\frac{d + \eta}{2} \right) dx - \rho g L d \left(\frac{d}{2} \right)$$

Dengan mensubstitusi pers. (14) ke dalam persamaan di atas, diperoleh:

$$E_p = \frac{\rho g H^2 L}{16} \quad (16)$$

Jadi, energi kinetik dan energi potensial adalah sama, sehingga total energi tiap satuan lebar puncak adalah:

$$E = E_k + E_p = \frac{\rho g H^2 L}{8} \quad (17)$$

Energi gelombang bervariasi dari suatu titik ke titik yang lain sepanjang panjang gelombang, dan rata-rata energi tiap satuan luas adalah:

$$\bar{E} = \frac{E}{L(1)} = \frac{\rho g H^2}{8} \quad (18)$$

Selanjutnya, daya atau tenaga gelombang (*wave power*) merupakan energi gelombang per satuan waktu yang ditransmisikan dalam arah perambatan gelombang. Daya gelombang dapat ditulis sebagai hasil kali dari gaya yang bekerja pada bidang vertikal yang tegak lurus penjalaran gelombang dengan kecepatan partikel yang melintasi bidang tersebut. Daya gelombang untuk satu komponen gelombang tunggal adalah [19].

$$P(\omega) = \rho g S(\omega) \cdot C_g(\omega) \quad (19)$$

dimana suku pertama pada ruas kanan merupakan energi pada gelombang dan suku kedua $C_g(\omega)$ merupakan kelompok kecepatan dimana energi merambat. Kecepatan tersebut bergantung pada frekuensi gelombang (ω) (bisa juga dinotasikan σ) dan kedalaman air (d). Gaya ditimbulkan gelombang diberikan oleh tekanan dinamis (total tekanan dikurangi tekanan hidrostatik) dan kecepatan aliran adalah komponen horizontal dari kecepatan partikel, sehingga daya gelombang P dapat dinyatakan:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T \int_{-d}^0 (p + \rho g y) u dy dt \quad (20)$$

Persamaan di atas dapat diintegrasikan terhadap periode gelombang dan kedalaman air [20]. Sehingga P dapat dihitung menggunakan:

$$P = \bar{E} C_g n = \bar{E} \left(\frac{gT}{2\pi} \tanh kd \right) n \quad (21)$$

dengan

$$n = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right)$$

Apabila pers. (18) disubstitusi ke pers. (21), maka persamaan tersebut dapat disederhanakan menjadi:

$$P = \frac{nE}{T} \quad (22)$$

Nilai n meningkat saat gelombang merambat menuju pantai yang memiliki hubungan dengan kedalaman relatif. Yong (2015) memberikan masing-masing nilai n pada pada setiap kondisi klasifikasi gelombang [20].

Pada laut dalam dimana $d/L \geq 1/2$; $n = 1/2$; dan $\tanh kd \approx 1$, disubstitusikan ke pers. (21), maka diperoleh:

$$P = \frac{\rho g^2}{64\pi} H^2 T \approx 0,5 H^2 T \quad (23)$$

Untuk laut dangkal dimana $d/L < 1/20$; $n = 1$; dan $\tanh kd \approx 2\pi d$, maka diperoleh:

$$P = \frac{\rho g^2}{16} H^2 \sqrt{gd} \quad (24)$$

Untuk laut transisi dimana $1/20 \leq d/L \leq 1/2$, maka persamaan daya gelombang dapat ditulis:

$$P = \bar{E} \left(\frac{gT}{2\pi} \tanh kd \right) \left[\frac{1}{2} \left(1 + \frac{2kd}{\sinh 2kd} \right) \right] \quad (25)$$

III. DATA DAN METODOLOGI

Untuk keperluan perencanaan, dalam hal ini analisis, perlu dipilih tinggi dan periode gelombang yang merepresentasikan spektrum gelombang. Data gelombang yang didapatkan diurutkan dari nilai tertinggi ke terendah atau sebaliknya, yang selanjutnya dapat ditentukan gelombang representatif yang digunakan (H_n). H_n merupakan rerata dari n persen gelombang tertinggi [16]. Cara yang sama dapat diterapkan untuk periode gelombang. Beberapa bentuk H_n yang digunakan, yaitu:

- H_{10} : Tinggi rerata dari 10% gelombang tertinggi;
- $H_{33} (H_s)$: Tinggi gelombang signifikan (paling banyak digunakan sebagai gelombang representatif), yaitu tinggi rerata dari 33% gelombang tertinggi;
- $H_{100} (\bar{H})$: Tinggi rata-rata gelombang

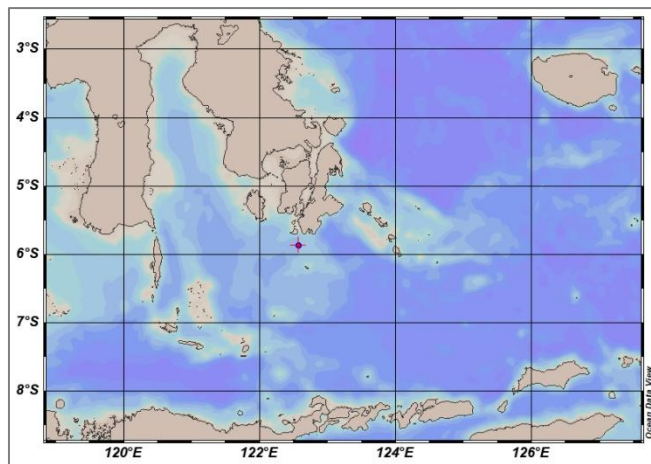
Penelitian ini mengambil lokasi di daerah perairan sisi selatan provinsi Sulawesi Tenggara, yaitu perairan Buton Selatan. Data yang digunakan meliputi data gelombang dan profil batimetri di lokasi penelitian. Adapun data gelombang diperoleh dari pemodelan data ERA5 (hasil analisis prediksi) yang bersumber dari *European Centre for Medium Range Weather Forecast* (ECMWF). ERA5 merupakan produk reanalisis yang dirilis pada tahun 2017 menggantikan produk reanalisis sebelumnya ERA-I dengan kinerja yang lebih tinggi [21]. Produk generasi kelima dari ECMWF ini juga mencakup iklim dan cuaca global selama 8 dekade terakhir dengan ketersediaan data dari tahun 1940 dan seterusnya [22]. Dataset lengkap ERA5 memiliki cakupan global dengan resolusi spasial horizontal 31 km dengan menyediakan analisis dan prakiraan per jam [23].

Data ERA5 yang diunduh berada di lepas pantai Buton Selatan pada koordinat 5.87° LS, 122.57° BT. Adapun lokasi pengukuran dilakukan di perairan Pantai Watiginanda pada koordinat 5.67° LS, 122.68° BT yang berjarak 17 km dari lokasi pengambilan data. Data ERA5 yang diunduh pada periode Mei 2023-April 2024.

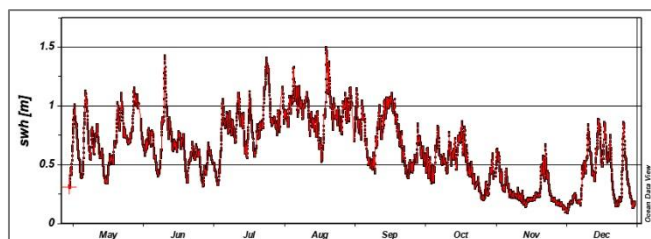


Gambar 6. Titik pengambilan data dan titik lokasi pengukuran [24].

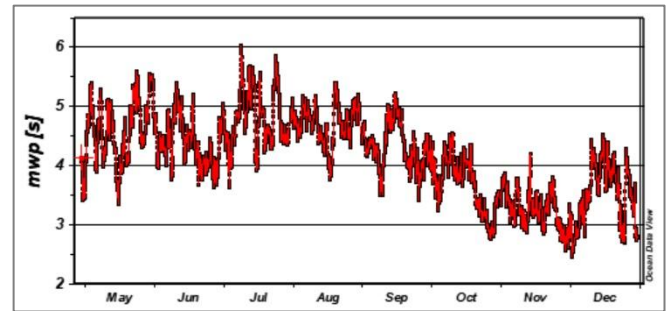
Selanjutnya dilakukan pembacaan data yang telah diunduh dari ECMWF dengan menggunakan *software* Ocean Data View (ODV), yaitu sebuah perangkat lunak yang bersifat *open source* untuk eksplorasi interaktif, analisis, dan visualisasi data oseanografi [25].



Gambar 7. Visualisasi lokasi pengambilan data gelombang, koordinat 5.87° LS, 122.57° BT.

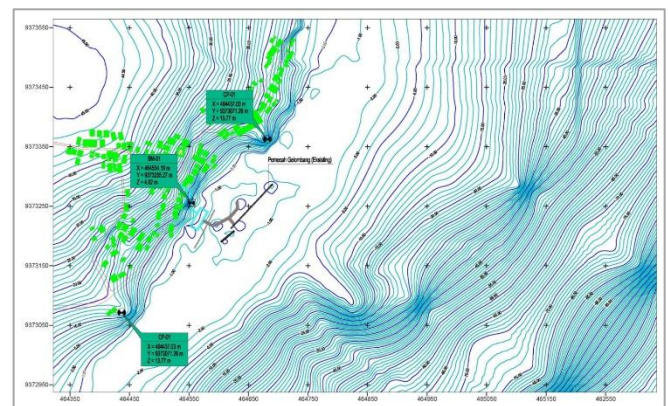


Gambar 8. Grafik tinggi gelombang signifikan pada periode Mei-Desember 2023, koordinat 5.87° LS, 122.57° BT.



Gambar 9. Grafik periode puncak gelombang pada periode Mei-Desember 2023, koordinat 5.87° LS, 122.57° BT.

Pemilihan data berikutnya terkait dengan peta batimetri yang diperoleh dari Dinas Sumber Daya Air dan Bina Marga pada lokasi perairan Pantai Watiginanda.



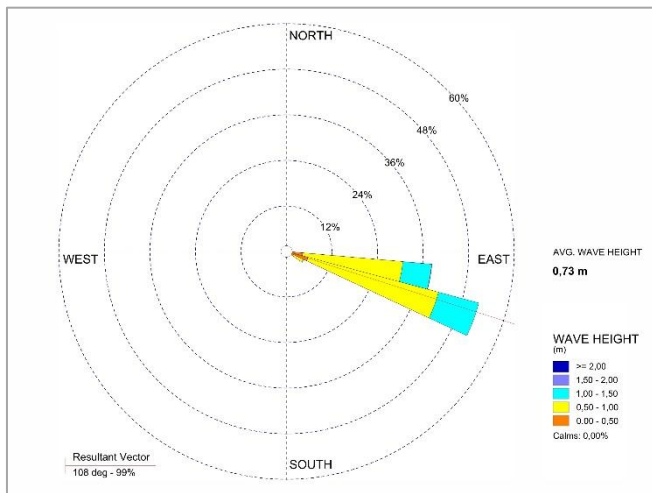
Gambar 10. Peta situasi topografi dan batimetri Pantai Watiginanda [26].

Pada tahapan akhir yaitu menganalisis perambatan gelombang dari lokasi pengambilan data sampai dengan lokasi pengamatan (pengukuran). Data gelombang representatif yang digunakan adalah tinggi dan periode gelombang signifikan (H_s dan T_s). Selanjutnya dilakukan perhitungan potensi energi dan daya gelombang (*wave power*) dengan menggunakan persamaan (23) sampai dengan persamaan (25). Hasil analisis pada tahapan akhir ini digunakan untuk menarik kesimpulan serta saran (rekomendasi) yang diperlukan.

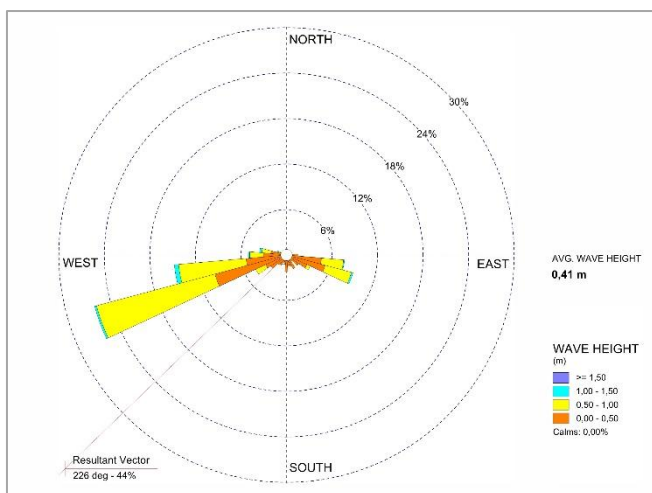
IV. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Data gelombang yang didapatkan dipetakan untuk dianalisis lebih lanjut. Adapun data gelombang representatif yang digunakan adalah tinggi gelombang signifikan (H_s) dan periode puncak gelombang (T). Data gelombang disajikan dalam bentuk tabel dan mawar gelombang (*wave rose*) untuk mengetahui distribusi arah dan jumlah kejadian gelombang di lokasi penelitian. Distribusi tersebut juga mewakili kondisi perairan pada dua kondisi musim di wilayah Sulawesi dengan merujuk pada informasi dari BMKG [27].

Dalam pencatatan data gelombang selama kurun waktu bulan Mei 2023 - April 2024, diketahui bahwa secara keseluruhan gelombang dominan datang dari arah Timur Tenggara sebanyak 47.85% dan dari arah Barat-Barat Daya sebanyak 19.19%. Hal tersebut menunjukkan kondisi tinggi dan arah gelombang datang sesuai dengan kondisi musim, dimana pada saat musim Monsun Timur (Mei-Oktober) gelombang dominan datang dari arah Timur Tenggara. Sedangkan pada saat musim Monsun Barat (November-April), gelombang dominan datang dari arah Barat-Barat Daya (lihat Gambar 11 dan Gambar 12).



Gambar 11. Distribusi arah dan tinggi gelombang di perairan Buton Selatan pada periode Mei-Oktober (Angin Monsun Timur).



Gambar 12. Distribusi arah dan tinggi gelombang di perairan Buton Selatan pada periode November-April (Angin Monsun Barat).

Pencatatan data gelombang yang diperoleh dari ERA5 merupakan data gelombang representatif yang mewakili satu kejadian gelombang setiap jam. Dalam hal ini, data gelombang tersebut menunjukkan jumlah kejadian selama

8784 jam (satu tahun). Untuk membantu dalam analisis, dilakukan pengelompokan data gelombang yang mewakili beberapa sifat statistik gelombang. Pengelompokan tersebut seperti disajikan pada Tabel 2, dimana tinggi gelombang H_s dinyatakan dalam interval 0.5 meter dan periode gelombang T dinyatakan dalam interval 1 detik. Hubungan antara tinggi dan periode gelombang menunjukkan distribusi jumlah kejadian gelombang selama satu tahun.

Tabel 2. Distribusi Jumlah Kejadian Gelombang dalam Interval Tertentu, *Time Step* 1 Tahun

T [s]	H_s [m]				Total
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	
0.0-1.0	0	0	0	0	0
1.0-2.0	0	0	0	0	0
2.0-3.0	764	0	0	0	764
3.0-4.0	2294	824	0	0	3118
4.0-5.0	652	3195	358	0	4205
5.0-6.0	0	414	279	1	694
6.0-7.0	0	3	0	0	3
Sub Total	3710	4436	637	1	8784

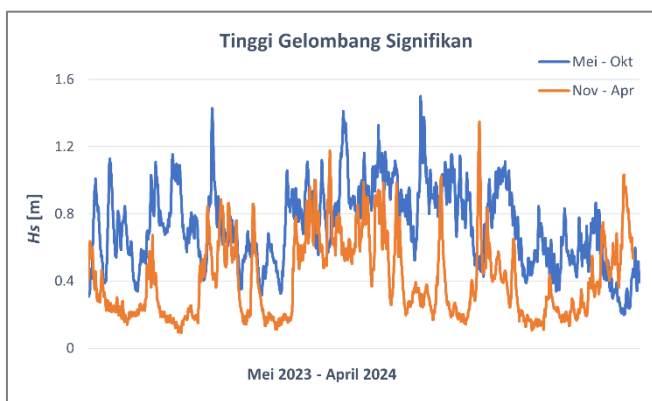
Dari Tabel 2 diketahui bahwa karakteristik gelombang di perairan Buton Selatan yang paling banyak terjadi selama periode Mei 2023 sampai dengan April 2024 yaitu kelompok gelombang pada rentang tinggi 0.5-1.0 meter dengan periode 4.0-5.0 detik sebanyak 3195 kejadian, disusul oleh kelompok gelombang pada rentang ketinggian di bawah 0.5 meter dengan periode 3.0-4.0 detik sebanyak 2294 kejadian. Adapun kelompok gelombang yang paling sedikit adalah gelombang dengan ketinggian di atas 1.5 m dan periode lebih dari 5 detik yang hanya terjadi satu kali dalam setahun. Untuk karakteristik gelombang setiap bulannya disajikan pada tabel berikut.

Tabel 3. Tinggi dan Periode Gelombang dalam 1 Tahun

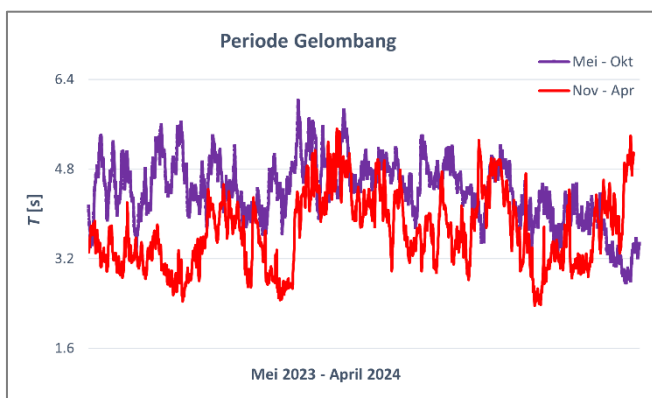
Bulan	H_s [m]			T [s]		
	Max	Min	Avg	Max	Min	Avg
Mei - 2023	1.15	0.31	0.72	5.63	3.34	4.58
Jun - 2023	1.43	0.32	0.65	5.53	3.63	4.39
Jul - 2023	1.41	0.33	0.79	6.02	3.64	4.64
Agt - 2023	1.50	0.52	0.95	5.40	3.75	4.71
Sep - 2023	1.15	0.39	0.73	5.22	3.41	4.32
Okt - 2023	0.87	0.20	0.49	4.54	2.76	3.66
Nov - 2023	0.67	0.09	0.28	4.20	2.55	3.25
Des - 2023	0.89	0.09	0.39	4.52	2.44	3.41
Jan - 2024	1.18	0.11	0.53	5.52	2.46	3.92
Feb - 2024	1.02	0.17	0.48	4.97	2.96	3.90
Mar - 2024	1.35	0.11	0.34	5.31	2.35	3.71
Apr - 2024	1.03	0.11	0.40	5.39	2.75	3.66

Pada Tabel 3 menunjukkan bahwa kondisi gelombang tertinggi terjadi pada bulan Agustus dengan rata-rata

ketinggian dan periode masing-masing sebesar 0.95 meter dan 4.71 detik. Disusul pada bulan Juli dengan kondisi tinggi dan periode gelombang masing-masing sebesar 0.79 meter dan 4.64 detik. Dari tabulasi tersebut juga dapat diketahui bahwa karakteristik gelombang pada bulan Mei sampai dengan Oktober 2023 (kondisi musim Monsun Timur) lebih tinggi dari pada bulan November 2023 sampai dengan bulan April 2024 (musim Monsun Barat). Dalam rentang bulan Mei – Oktober 2023, gelombang memiliki ketinggian rata-rata relatif diatas 0.5 meter dan periode gelombang rata-rata relatif diatas 3.7 detik. Sedangkan pada bulan November 2023 – April 2024 memiliki karakteristik gelombang yang lebih kecil dengan ketinggian rata-rata relatif kurang dari 0.5 meter dan periode rata-rata relatif kurang dari 3.7 detik.



Gambar 13. Grafik tinggi gelombang signifikan selama satu tahun pencatatan (biru untuk kondisi pada bulan Mei - Oktober, orange untuk kondisi bulan November - April). Diolah dari ERA5, koordinat 5.87° LS, 122.57° BT.



Gambar 14. Grafik periode gelombang selama satu tahun pencatatan (ungu untuk kondisi pada bulan Mei – Oktober, merah untuk kondisi bulan November – April). Diolah dari ERA5, koordinat 5.87° LS, 122.57° BT.

Langkah selanjutnya yaitu menganalisis deformasi gelombang yang sampai ke perairan pantai. Data gelombang yang diperoleh dari ERA5 diukur pada lokasi yang berjarak 17 km pada arah utara titik lokasi penelitian yang merupakan

kondisi gelombang di laut dalam (lihat Gambar 6 dan Gambar 7). Analisis deformasi untuk mengetahui karakteristik gelombang pada lokasi di perairan pantai Watiginanda pada kontur kedalaman 20 meter (lihat Gambar 10). Hal ini dilakukan karena gelombang merambat dari laut dalam menuju pantai akan mengalami deformasi yang disebabkan oleh refraksi gelombang dan kondisi pendangkalan. Sehingga data gelombang yang digunakan dalam analisis potensi energi dan daya gelombang merupakan kondisi gelombang yang mewakili kondisi di perairan lokasi penelitian, termasuk juga menentukan formulasi yang digunakan dalam analisis potensi tersebut yang dipengaruhi oleh kondisi kedalaman relatif (lihat Tabel 1 dan Gambar 4) .

Tabel 4. Koordinat Lokasi Analisis Karakteristik Gelombang

Lokasi	Koordinat	
	Latitude	Longitude
Reanalysis ERA5	5.87° LS	122.57° BT
Pengukuran ($d = -20$ m)	5.67° LS	122.68° BT

Dalam analisis, data gelombang dipetakan berdasarkan dua kondisi dimana hal tersebut terkait dengan arah dan perambatan gelombang yang mempengaruhi pengukuran di lokasi penelitian. Kondisi pertama, analisis dilakukan untuk karakteristik gelombang selama periode bulan Mei sampai dengan Oktober tahun 2023 yang memiliki arah datang dominan dari arah Timur Tenggara dengan resultan sudut (α_0) 108° (lihat Gambar 11). Kemudian dilanjutkan analisis perhitungan untuk kondisi karakteristik gelombang pada periode bulan November 2023 sampai dengan April 2024 dimana gelombang dominan datang dari arah Barat-Barat Daya dengan resultan sudut (α_0) 226° (lihat Gambar 12).

Dari pengelompokan data gelombang pada Tabel 2 selanjutnya hubungan antara tinggi dan periode gelombang dinyatakan dalam bentuk probabilitas kejadian gelombang, yaitu perbandingan antara jumlah kejadian gelombang dan jumlah total gelombang (n/N). Distribusi probabilitas ini akan menunjukkan probabilitas potensi energi dan daya gelombang pada lokasi penelitian.

Tabel 5. Probabilitas Jumlah Kejadian Gelombang dalam Interval Tertentu, Time Step 1 Tahun

T [s]	Hs [m]			
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0
0.0-1.0	0.00	0.00	0.00	0.00
1.0-2.0	0.00	0.00	0.00	0.00
2.0-3.0	0.0870	0.00	0.00	0.00
3.0-4.0	0.2612	0.0938	0.00	0.00
4.0-5.0	0.0742	0.3637	0.0408	0.00
5.0-6.0	0.00	0.0471	0.0318	0.0001
6.0-7.0	0.00	0.0003	0.00	0.00

Analisis potensi energi gelombang diperoleh dengan menggunakan persamaan (18) dalam satuan energi persatuan

panjang gelombang. Adapun variabel tinggi gelombang yang digunakan merupakan variabel tinggi gelombang hasil perhitungan deformasi tinggi gelombang pada kedalaman ($-d$) 20 meter. Hasil analisis potensi energi pada masing-masing *time step* dua musim disajikan sebagai berikut.

Tabel 6. Matriks Distribusi Potensi Energi Gelombang di Lokasi Studi (Joule/m)
Time Step: Mei - Oktober 2023

T [s]	H_s [m]				Total
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	
0.0-1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.0-2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.0-3.0	5.7	0.0	0.0	0.0	5.7
3.0-4.0	34.4	311.1	0.0	0.0	345.5
4.0-5.0	24.4	1567.4	659.9	0.0	2251.7
5.0-6.0	0.0	229.6	485.4	3.7	718.7
6.0-7.0	0.0	1.9	0.0	0.0	1.9
Sub Total	64.6	2110.0	1145.3	3.7	3323.5

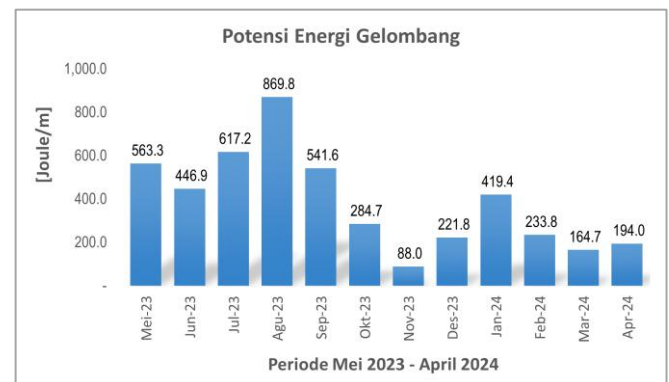
Tabel 7. Matriks Distribusi Potensi Energi Gelombang di Lokasi Studi (Joule/m)
Time Step: November 2023 - April 2024

T [s]	H_s [m]				Total
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	
0.0-1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.0-2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.0-3.0	54.3	0.0	0.0	0.0	54.3
3.0-4.0	145.8	271.5	0.0	0.0	417.3
4.0-5.0	26.8	691.5	43.2	0.0	761.4
5.0-6.0	0.0	49.9	38.8	0.0	88.7
6.0-7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sub Total	226.9	1012.8	82.0	0.0	1321.7

Pada Tabel 6 dan Tabel 7 menunjukkan matriks distribusi potensi energi berdasarkan frekuensi kejadian gelombang di lokasi penelitian dalam rentang interval tertentu. Dalam hal ini, nilai potensi energi merupakan akumulasi yang diperoleh dari hasil kali potensi energi dengan jumlah kejadian pada setiap interval karakteristik gelombang.

Pada Tabel 6, potensi energi di perairan lokasi studi didominasi ketika H_s dalam rentang 0.5-1.0 m dan T dalam rentang 4.0-5.0 detik selama 2217 jam kejadian. Sedangkan yang paling sedikit mengandung potensi energi terjadi pada rentang H_s 0.5-1.0 m dan T dalam rentang 6.0-7.0 detik. Jumlah potensi energi yang terkandung sepanjang periode waktu bulan Mei sampai dengan Oktober sebesar 3323.5 J/m. Selanjutnya, Tabel 7 menunjukkan potensi energi gelombang sepanjang periode waktu bulan November 2023 sampai dengan April 2024. Dari tabel tersebut, pada rentang H_s = 0.5-1.0 dan T = 4.0-5.0 mengandung potensi energi yang paling banyak dengan jumlah sebanyak 978 jam kejadian.

Sedangkan yang paling sedikit yaitu pada rentang H_s kurang dari 0.5 m dan T dalam rentang 4.0-5.0 detik. Jumlah potensi energi yang terkandung sepanjang periode tersebut sebesar 1321.7 J/m. Sehingga, total potensi energi yang terkandung selama setahun adalah sebesar 4645.3 J/m atau 4.65 kJ/m. Untuk potensi energi gelombang setiap bulannya disajikan pada gambar berikut.



Gambar 15. Potensi energi di lokasi penelitian setiap bulan selama 1 tahun.

Gambar 15 menunjukkan grafik akumulasi potensi energi setiap bulan dalam satu tahun. Dari grafik diketahui bahwa potensi energi gelombang terbanyak sepanjang tahun analisis terjadi pada bulan Agustus sebesar 869.8 J/m. Sedangkan yang paling sedikit mengandung potensi energi adalah pada bulan November yang berjumlah 88 J/m.

Sebagaimana telah diuraikan sebelumnya, analisis potensi daya (*wave power*) merupakan hasil dari energi persatuan luas di kali dengan kecepatan gelombang. Kecepatan gelombang dipengaruhi oleh variabel panjang dan periodenya. Adapun formulasi yang digunakan juga tergantung pada kondisi kedalaman relatif di lokasi kajian. Dari hasil analisis menunjukkan bahwa pada perambatan gelombang di kedalaman ($-d$) 20 meter, karakteristik gelombang berada dalam klasifikasi gelombang di laut dalam dan laut transisi. Sehingga untuk klasifikasi gelombang di laut dalam menggunakan persamaan (23) dan untuk gelombang di laut transisi menggunakan persamaan (25). Selanjutnya, dengan cara yang sama pada perhitungan potensi energi, hasil analisis potensi daya gelombang diakumulasi dengan distribusi frekuensi kelompok karakteristik gelombang dalam interval tertentu yang terdapat pada Tabel 2.

Sebagai gambaran analisis untuk perhitungan gelombang individu yang merambat dari laut dalam pada arah sudut datang (α) 32° dengan ketinggian mula-mula (H_0) 0.75 meter dan periode gelombang 5.5 detik maka gelombang pada kedalaman 20 meter berada pada klasifikasi laut transisi (d/L = $1/20$ s/d $1/2$, lihat Tabel 1). Sehingga dengan pendekatan persamaan (25) daya yang dihasilkan adalah sebesar 2.9 Watt/m. Selanjutnya dengan frekuensi sebanyak 339 kejadian

gelombang maka potensi daya yang dihasilkan adalah sebesar 985.8 Watt/m (lihat Tabel 8).

Tabel 8. Matriks Distribusi Potensi Daya (Wave Power) di Lokasi Studi (W/m)
Time Step: Mei - Oktober 2023

T [s]	H_s [m]				Total
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	
0.0-1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.0-2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.0-3.0	11.2	0.0	0.0	0.0	11.2
3.0-4.0	94.0	850.0		0.0	944.0
4.0-5.0	85.8	5506.3	2318.1	0.0	7910.3
5.0-6.0	0.0	985.8	2084.1	15.8	3085.8
6.0-7.0	0.0	9.6	0.0	0.0	9.6
Sub Total	191.0	7351.7	4402.2	15.8	11960.8

Tabel 9. Matriks Distribusi Potensi Daya (Wave Power) Berdasarkan Probabilitas Kejadian Gelombang (W/m)
Time Step: Mei - Oktober 2023

T [s]	H_s [m]				Total
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	
0.0-1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.0-2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.0-3.0	197.7	0.0	0.0	0.0	197.7
3.0-4.0	1186.3	1191.7	0.0	0.0	2378.1
4.0-5.0	842.3	6004.8	910.1	0.0	7757.2
5.0-6.0	0.0	918.2	698.8	2.7	1619.7
6.0-7.0	0.0	8.1	0.0	0.0	8.1
Sub Total	2226.4	8122.8	1608.9	2.7	11960.8

Tabel 8 menunjukkan besar potensi daya pada setiap kelompok tinggi gelombang signifikan dan periode dalam interval tertentu. Dari hasil tabulasi untuk periode pencatatan gelombang pada periode bulan Mei-Oktober, total potensi daya yang dihasilkan paling banyak pada kelompok $H_s = 0.5-1.0$ m dan $T = 4.0-5.0$ detik., yaitu sebesar 5506.3 Watt/m. Sedangkan yang paling sedikit adalah pada kelompok $H_s = 0.5-1.0$ m dan $T = 6.0-7.0$ detik. Adapun pada Tabel 9 merupakan hasil tabulasi berdasarkan distribusi probabilitas kejadian (n/N). Misalnya, diketahui dari hasil analisis pada Tabel 8 untuk kelompok gelombang dengan $H_s = 0.5-1.0$ m dan $T = 3.0-4.0$ detik menghasilkan potensi daya sebesar 850 W/m, namun berdasarkan distribusi probabilitasnya memiliki potensi daya sebesar 1191.7 W/m Tabel 9). Hasil ini diperoleh dari kelompok gelombang pada interval tersebut yang memiliki probabilitas (n/N) 0.1 dikalikan dengan potensi daya yang dihasilkan berdasarkan total potensi daya dalam seluruh kejadian gelombang ($N_{Mei-Oktober} = 4416$ kejadian) yaitu 11960.8 W/m sehingga diperoleh adalah sebesar 1191.7 W/m. Selanjutnya, analisis yang sama dilakukan pada pencatatan gelombang untuk periode bulan November 2023 sampai dengan April 2024.

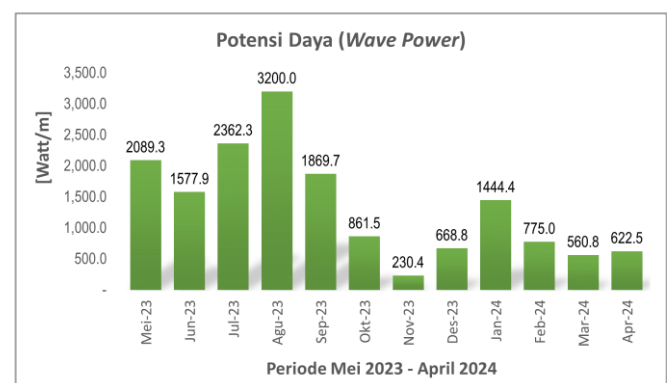
Dalam pencatatan gelombang pada bulan November - April berjumlah (N) sebanyak 4368 kejadian. Dari hasil tabulasi pada Tabel 10, potensi daya yang dihasilkan didominasi oleh kelompok gelombang dalam rentang $H_s = 0.5-1.0$ m dan $T = 4.0-5.0$ detik. Namun berdasarkan probabilitasnya, kandungan potensi daya terbanyak dihasilkan oleh kelompok gelombang dengan H_s kurang dari 0.5 m dan interval periode $T = 3.0-4.0$ detik, yaitu sebesar 1827.9 W/m (lihat Tabel 11). Total potensi daya sepanjang periode bulan November – April adalah sebesar 4301.9 W/m.

Tabel 10. Matriks Distribusi Potensi Daya (Wave Power) di Lokasi Studi (W/m)
Time Step: November 2023 - April 2024

T [s]	H_s [m]				Total
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	
0.0-1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.0-2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.0-3.0	105.9	0.0	0.0	0.0	105.9
3.0-4.0	398.4	741.8	0.0	0.0	1140.2
4.0-5.0	94.1	2429.0	151.8	0.0	2674.9
5.0-6.0	0.0	214.2	166.6	0.0	380.8
6.0-7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sub Total	598.4	3385.1	318.4	0.0	4301.9

Tabel 11. Matriks Distribusi Potensi Daya (Wave Power) Berdasarkan Probabilitas Kejadian Gelombang (W/m)
Time Step: November 2023 - April 2024

T [s]	H_s [m]				Total
	0.0-0.5	0.5-1.0	1.0-1.5	1.5-2.0	
0.0-1.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.0-2.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.0-3.0	680.5	0.0	0.0	0.0	680.5
3.0-4.0	1827.9	378.2	0.0	0.0	2206.1
4.0-5.0	335.8	963.2	21.7	0.0	1320.7
5.0-6.0	0.0	73.9	20.7	0.0	94.5
6.0-7.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Sub Total	2844.3	1415.2	42.3	0.0	4301.9



Gambar 16. Potensi daya (wave power) di lokasi penelitian setiap bulan selama 1 tahun.

Gambar 16 menunjukkan akumulasi potensi daya yang dihasilkan setiap bulan sepanjang periode kajian. Dapat dilihat bahwa kandungan potensi daya paling banyak terjadi pada bulan Agustus yaitu sebesar 3200 W/m. Sedangkan potensi daya terkecil dihasilkan pada bulan November sebesar 230.4 W/m. Hasil ini menunjukkan bahwa potensi daya gelombang berbanding lurus terhadap potensi energinya yang juga berkesesuaian dengan kondisi gelombang pada pencatatan periode musim Monsun Timur dan Monsun Barat. Adapun total potensi daya yang dihasilkan sepanjang tahun kajian adalah sebesar 16262.7 W/m atau 16.26 kW per meter panjang gelombang.

Hasil analisis di atas menunjukkan bahwa baik potensi energi maupun daya gelombang dipengaruhi oleh tiga variabel, yaitu tinggi gelombang signifikan, periode, dan frekuensi kejadian gelombang. Sehingga besar kecil nilai ketiga variabel tersebut berbanding lurus terhadap potensi energi dan daya yang dihasilkan. Adapun perubahan kedalaman menyebabkan perubahan karakteristik (deformasi) gelombang yang dipengaruhi oleh refraksi dan pendangkalan. Perambatan gelombang pada kedalaman tertentu yang lebih dangkal menyebabkan perubahan tinggi dan panjang gelombang berdasarkan kedalaman relatifnya sedangkan periode gelombang tetap.

V. KESIMPULAN

Pada pencatatan gelombang dari ERA5 menunjukkan perbedaan kondisi karakteristik gelombang pada musim Monsun Timur dan Monsun Barat. Dalam hal ini diketahui bahwa karakteristik selama pencatatan pada periode Mei – Oktober menunjukkan kondisi karakteristik gelombang yang lebih besar dari pada periode November – April. Hal tersebut berbanding lurus terhadap potensi energi dan daya yang dihasilkan sepanjang durasi masing-masing periode tersebut.

Berdasarkan hasil analisis, baik potensi energi maupun daya gelombang (*wave power*), potensi terbesar terjadi pada bulan Agustus, yaitu dengan potensi energi sebesar 869.8 J/m dan daya sebesar 3200 W/m. Sedangkan potensi terkecil terjadi pada bulan November dengan potensi energi sebesar 88 J/m dan daya sebesar 230.4 W/m.

Sepanjang periode bulan Mei – Oktober, jumlah potensi energi yang dihasilkan adalah sebesar 3323.5 J/m, selanjutnya potensi energi sepanjang periode November – April adalah sebesar 1321.7 J/m sehingga total jumlah energi yang dihasilkan selama satu tahun adalah sebesar 4645.3 J/m atau 4.65 kJ/m. Adapun potensi daya yang dihasilkan sepanjang periode bulan Mei – Oktober berjumlah 11960.8 W/m. Selanjutnya, jumlah potensi daya sepanjang periode November – April adalah sebesar 4301.9 W/m sehingga total potensi daya (*wave power*) sepanjang tahun kajian adalah sebesar 16262.7 W/m atau 16.26 kW/m.

Parameter utama yang mempengaruhi besar kecilnya potensi energi dan daya gelombang yaitu tinggi gelombang signifikan, periode, dan frekuensi kejadian gelombang.

Kondisi kedalaman juga mempengaruhi karakteristik gelombang. Pada kondisi laut yang lebih dangkal, gelombang akan mengalami deformasi karena pengaruh refraksi dan pendangkalan. Pengaruh kedalaman tersebut dapat diketahui dengan membandingkan panjang gelombang mula-mula dengan kedalaman pada titik lokasi kajian (d/L_0).

DAFTAR ACUAN

- [1] J. Langer, J. Quist and K. Blok, "Review of Renewable Energy Potentials in Indonesia and Their Contribution to a 100% Renewable Electricity System," *Energies*, pp. 14, 7033, 2021.
- [2] Direktorat Jenderal Energi Baru, Terbarukan dan Konversi Energi, "Statistik EBTKE 2016," Ditjen EBTKE, Jakarta, 2016.
- [3] PT. PLN (Persero), "Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) PT. PLN (Persero)," PT. PLN (Persero), Jakarta, 2021.
- [4] M. Y. Mumtaz, Studi Potensi Energi Gelombang Laut di Pantai Selatan Banyuwangi Menggunakan Sumber Data ERA5 (ECMWF) dan Pengukuran Lapangan, Surabaya: ITS, 2020.
- [5] Bidang Pengembangan Wilayah Bappeda Sultra, "Badan Perencanaan Pembangunan Daerah (Bappeda) Sulawesi Tenggara," [Online]. Available: <https://bangwilsultrablog.wordpress.com/>. [Accessed 4 Juli 2024].
- [6] R. Adiputra, M. I. Habib, Erwandi, A. R. Prabowo, A. S. D. Marta, W. W. Pandoe, N. Puryantini, R. B. Sitanggang and A. Nurfanani, "Ocean Renewable Energy in Indonesia: A Brief on the Current State and Development Potential," in *Renewable energy: Policy and Strategy*, Jakarta, BRIN Publishing, 2023, pp. 13-36.
- [7] S. R. Utami, Studi Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut dengan Menggunakan Sistem Oscillating Water Column (OWC) di Tiga Puluhan Wilayah Kelautan Indonesia, Depok: Universitas Indonesia, 2010.
- [8] R. A. Sona, S. P. Fitri and B. Cahyono, "Analisa Kinerja Pneumatic Wave Energy Converter (WEC) dengan Menggunakan Oscillating Water Column (OWC)," *Jurnal Teknik POMITS*, vol. 3, pp. F39-F42, 2014.
- [9] M. Zikra, "Preliminary Assessment of Wave Energy Potential around Indonesia Sea," *Applied Mechanics and Materials*, vol. 862, pp. 55-60, 2017.
- [10] F. O. Setyawan, Identifikasi dan Pemetaan Lokasi Potensial Energi Gelombang Laut di Perairan Indonesia, Surabaya: ITS, 2018.
- [11] Faulincia, "Studi Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut dengan Metoda Oscillating Water Column di Perairan Kendari Indonesia," *Journal of Mechanical Engineering and Mechatronics*, vol. 4, pp. 7-14, 2019.

- [12] F. Y. Nagifea, Sudarti and Yushardi, "Potensi Pembangkit Listrik Tenaga Gelombang Laut (PLTGL) sebagai Energi Alternatif Indonesia," *Jurnal Technopreneur*, vol. 10, pp. 17-24, November 2022.
- [13] B. Chenari, S. S. Saadatian and A. Ferreira, "Wave Energy Systems: an Overview of Different Wave Energy Converters and Recommendation for Future Improvements," in *INTED2014, the 8th International Technology, Education and Development Conference*, Valencia, 2014.
- [14] D. Curto, V. Franzitta and A. Guercio, "Sea Wave Energy. A Review of the Current Technologies and Perspectives," *Energies*, pp. 14, 6604, 2021.
- [15] D. Reeve, A. Chadwick and C. Fleming, *Coastal Engineering: Processes, Theory and Design Practice*, Third Edition ed., Taylor & Francis Group, CRC Press, 2018.
- [16] B. Triatmojo, *Teknik Pantai*, Edisi Pertama ed., Yogyakarta: Beta Offset, 1999.
- [17] Coastal Engineering Research Center, *Shore Protection Manual*, Volume I ed., Washington: US Army Corps of Engineers, 1984.
- [18] R. M. Sorensen, *Basic Coastal Engineering*, Third Edition ed., New York: Springer, 2006.
- [19] A. Pecher, *Handbook of Ocean Wave Energy*, vol. 7, J. P. Kofoed, Ed., Springer, 2016.
- [20] W. Yong, Z. Jie, M. Junmin and W. Jing, "A wave energy resource assessment in the China's seas based on multi-satellite merged radar altimeter data," *Acta Oceanologica Sinica*, vol. 34, no. 3, p. 115–124, 2015.
- [21] C. Albergel, E. Dutra, S. Munier¹, J.-C. Calvet¹, J. Munoz-Sabater, P. d. Rosnay and G. Balsamo, "ERA-5 and ERA-Interim driven ISBA land surface model simulations : Which one performs better?," *Hydrology and Earth System Sciences*, vol. 22, no. 6, 2018.
- [22] European Centre for Medium Range Weather Forecast, "ERA5 hourly data on single levels from 1940 to present," The Copernicus Climate Change Service, [Online]. Available: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>. [Accessed 3 Juli 2024].
- [23] C. Wang, R. M. Graham, K. Wang, S. Gerland and M. A. Granskog, "Comparison of ERA5 and ERA-Interim near-surface air temperature, snowfall and precipitation over Arctic sea ice: effects on sea ice thermodynamics and evolution," *The Cryosphere*, vol. 13, no. 6, p. 1661–1679, 2019.
- [24] Earth, Google Pro, Google. [Online]. [Accessed 3 Juli 2024].
- [25] R. Schlitzer and A. Wegener, "Ocean Data View," Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung (AWI), [Online]. Available: <https://odv.awi.de/>. [Accessed 1 Juli 2024].
- [26] Dinas Sumber Daya Air dan Bina Marga Provinsi Sulawesi Tenggara, "Peta Situasi dan Topografi Pengaman Pantai Watiginanda," Kendari, 2022.
- [27] Pusat Informasi Perubahan Iklim Kedeputan Bidang Klimatologi, "Prediksi Musim Kemarau 2024 di Indonesia," Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika, Jakarta, 2024.
- [28] B. L. Mehaute, *An Introduction to Hydrodynamics & Water Waves*, New York: Springer Science+Business Media, LLC, 1976.
- [29] W. Nurfaida, "Angin, Gelombang, & Pasang Surut (3)," You Tube, 1 Mei 2020. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=sNltWqz26i8>. [Accessed 27 Juli 2024].