

Potensi Energi Gelombang Laut Di Perairan Kabupaten Wakatobi Provinsi Sulawesi Tenggara

Ocean Wave Energy Potential in the Wakatobi Regency Waters, Southeast Sulawesi Province, Indonesia

La Ode Rusmianto Ruslan¹, Muliddin², A Ginong Pratikino²

¹Mahasiswa Program Studi Oseanografi, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Halu Oleo, Kendari

²Dosen Program Studi Oseanografi, Fakultas Matematika Dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Halu Oleo, Kendari

*Korespondensi : ilf120013laoderusmiantoruslan@student.uho.ac.id

Abstrak

Keterbatasan pasokan listrik berbasis bahan bakar fosil di Kabupaten Wakatobi membutuhkan solusi energi terbarukan. Penelitian ini mengkaji potensi energi gelombang laut di perairan Wakatobi melalui pemodelan numerik menggunakan software MIKE21. Data yang digunakan meliputi data batimetri, data angin dari BATNAS dan ECMWF, serta data tinggi gelombang signifikan H_s dari model WW3 dari BMKG untuk validasi. Analisis dilakukan pada 10 stasiun di perairan Wakatobi. Hasil model menunjukkan hasil yang baik dalam memprediksi tinggi gelombang signifikan dengan nilai $R^2=0.7244$ dan RMSE 0.45 m, menunjukkan bahwa masih dalam batas yang dapat diterima untuk studi gelombang laut. Tinggi gelombang rata-rata di Perairan Wakatobi menunjukkan variasi temporal, dengan puncaknya pada bulan Juli sebesar 1,32 m dan terendah pada bulan November sebesar 0,19 m, periode Juni-Juli-Agustus (JJA) menunjukkan tinggi gelombang rata-rata tertinggi sebesar 1,27 m, sedangkan periode September-Oktober-November (SON) memiliki tinggi gelombang rata-rata terendah sebesar 0,20 m. Tinggi gelombang rata-rata tahunan tertinggi pada tahun 2023 dengan 0,81 m, sementara tahun 2021 mencatatkan tinggi gelombang rata-rata tahunan terendah sebesar 0,17 m. Potensi daya gelombang berkisar antara 0,01 kW/m hingga 4,88 kW/m secara bulanan, 0,05 kW/m hingga 4,63 kW/m secara musiman, dan 0,4 kW/m hingga 2,23 kW/m secara tahunan stasiun 8 memenuhi tiga kriteria implementasi WEC (CoV, MVI, WEDI), sedangkan lainnya hanya memenuhi kriteria WEDI. Stasiun 10 mencatat daya gelombang tertinggi.

Kata kunci: Perairan Wakatobi, Gelombang Laut, MIKE21, Energi gelombang laut

Abstract

The limited supply of fossil fuel-based electricity in Wakatobi Regency necessitates renewable energy solutions. This study assesses the potential of ocean wave energy in Wakatobi waters through numerical modeling using MIKE21 software. The data used include bathymetric data, wind data from BATNAS and ECMWF, as well as significant wave height (H_s) data from the WW3 model by BMKG for validation. The analysis was conducted at 10 stations in Wakatobi waters.

The model results show good performance in predicting significant wave height, with an R^2 value of 0.7244 and an RMSE of 0.45 m, indicating an acceptable range for wave studies. The average wave height in Wakatobi waters exhibits temporal variation, peaking in July at 1.32 m and reaching its lowest in November at 0.19 m. The June-July-August (JJA) period recorded the highest average wave height at 1.27 m, while the September-October-November (SON) period had the lowest at 0.20 m. The highest annual average wave height was observed in 2023 at 0.81 m, whereas 2021 recorded the lowest annual average at 0.17 m. The wave power potential ranges from 0.01 kW/m to 4.88 kW/m monthly, 0.05 kW/m to 4.63 kW/m seasonally, and 0.4 kW/m to 2.23 kW/m annually. Station 8 meets three WEC (Wave Energy Converter) implementation criteria (CoV, MVI, WEDI), while the others only fulfill the WEDI criterion. Station 10 recorded the highest wave power potential.

Keywords: Wakatobi waters, Ocean waves, MIKE21, Wave energy

PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk Indonesia yang pesat menyebabkan peningkatan kebutuhan energi yang signifikan. Namun, ketergantungan pada bahan bakar fosil sebagai sumber energi utama menghadirkan tantangan besar, terutama karena cadangannya yang terbatas dan produksinya yang terus menurun (Mahiru Rizal *et al.*, 2019). Untuk mengatasi masalah ini, pemerintah telah menetapkan kebijakan diversifikasi energi dan pengembangan energi terbarukan, dengan target kontribusi energi terbarukan sebesar 31% pada tahun 2050. Penelitian terkait sumber energi terbarukan sangat penting untuk memenuhi permintaan energi yang terus meningkat (Prasodjo *et al.*, 2016).

Dari berbagai opsi energi terbarukan, energi laut memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan di Indonesia. Sebagai negara kepulauan dengan lebih dari 70% wilayahnya berupa perairan, pembangkit listrik tenaga gelombang menjadi salah satu pilihan strategis. Energi gelombang laut tidak hanya bersifat terbarukan dan ramah lingkungan, tetapi juga memiliki efisiensi daya yang tinggi dibandingkan sumber energi lain, seperti angin atau surya (Santoso *et al.*, 2023). Pemanfaatan energi gelombang laut dapat memainkan peran penting dalam perlindungan pesisir dalam hal mengurangi erosi pantai yang kuat dari energi gelombang tinggi yang datang dari laut terbuka (Mendoza *et al.*, 2014).

Pemanfaatan gelombang laut telah memicu minat para akademisi dan sektor industri selama beberapa dekade. Salah satu paten pertama untuk konversi energi gelombang tercatat pada tahun 1799 oleh Girard dan putranya di Prancis (Day *et al.*, 2015). Teknologi penangkap energi gelombang atau Wave Energy Converter (WEC) terus mengalami perkembangan signifikan dengan berbagai desain, seperti kolom air berosilasi, badan berosilasi, dan overtopping (Falcão, 2010). Beberapa WEC telah berhasil diuji dalam kondisi nyata di tangki uji maupun di laut terbuka, seperti Pelamis yang diteliti oleh (Dalton *et al.*, 2012) dan (Henderson, 2006). Proyek percontohan WEC telah dikembangkan di berbagai negara seperti, Jepang (Falcão, 2010), dan Australia (Behrens *et al.*, 2012).

Penelitian mengenai potensi energi gelombang laut di Indonesia telah dilakukan di beberapa wilayah. (Ribal & Zieger, 2016) menggunakan data satelit beresolusi 1° dan menemukan bahwa barat daya Sumatra, selatan Jawa, serta utara Papua memiliki potensi energi gelombang sebesar 20–30 kW/m. (Mahiru Rizal *et al.*, 2019) meneliti pantai selatan Jawa dan Kepulauan Nusa Tenggara, (Irhas & Suryaningsih, 2014) di Yogyakarta, serta (Sandro *et al.*, 2014) di Selat Sunda.

Kabupaten Wakatobi menghadapi tantangan dalam memenuhi kebutuhan energi listrik. Sebagian besar listrik masih bergantung pada pembangkit berbahan bakar fosil. Oleh karena itu, pemanfaatan energi gelombang laut sebagai solusi energi terbarukan dapat menjadi alternatif untuk memenuhi kebutuhan listrik di daerah ini (Maladeni & Ishak, n.d.).

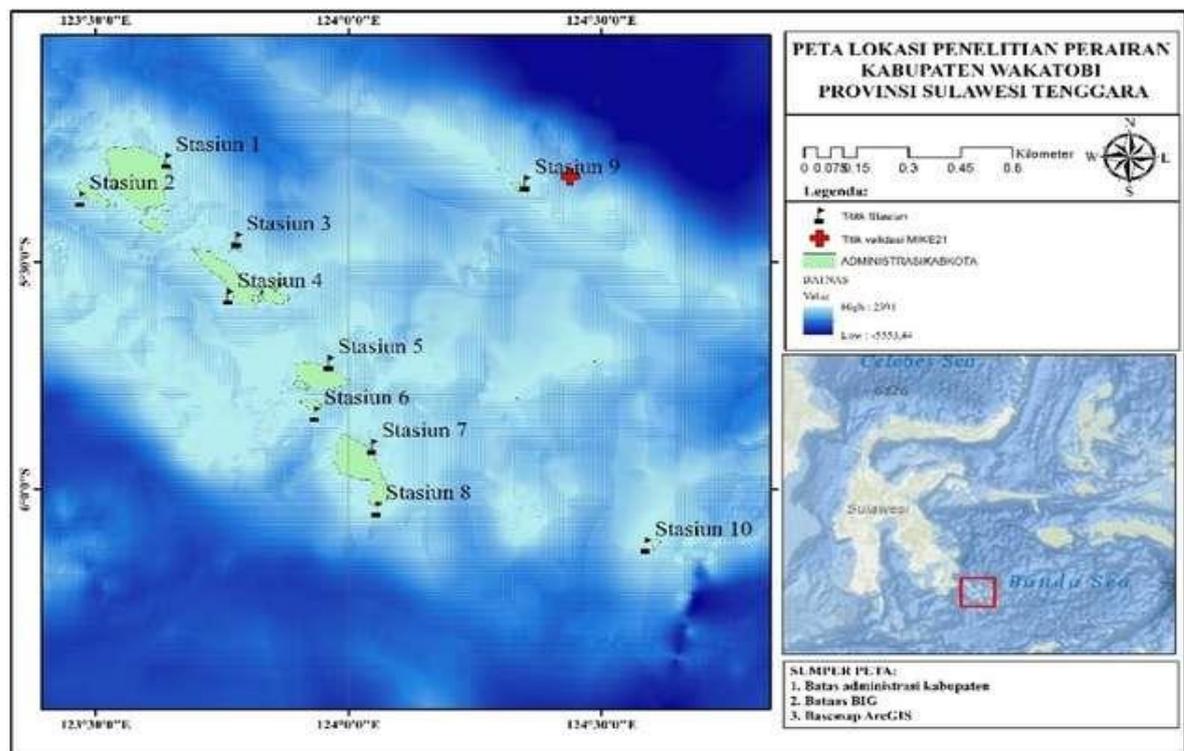
Penelitian mengenai energi gelombang di perairan wakatobi tidak hanya menganalisis potensi energi gelombang secara umum, tetapi juga melakukan evaluasi menggunakan berbagai parameter statistik (CoV, MVI, OHI, dan WEDI) untuk menemukan lokasi ideal implementasi WEC. Pendekatan multi-parameter ini memungkinkan penilaian yang lebih akurat terhadap lokasi potensial untuk penempatan WEC.

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis potensi energi gelombang laut, dan menentukan lokasi optimal untuk implementasi Wave Energy Converter (WEC) di Wakatobi.

METODE

Lokasi Penelitian

Penelitian ini dilakukan di Perairan Kabupaten wakatobi provinsi sulawesi tenggara dengan 10 stasiun pengambilan data Evaluasi Potensi Energi Gelombang (Gambar 1).



Gambar 1. Titik Stasiun pengamatan

Tabel 1. Titik Lokasi Penelitian untuk Evaluasi Potensi Energi Gelombang

Stasiun	Lokasi		Kedalaman (m)	Jarak dari garis pantai (m)	Keterangan
	Lintang	bujur			
1	-5.277	123.641	175	784	Timur laut Pulau Wangi-wangi
2	-5.361	123.471	199	826	Barat Pulau Kapota
3	-5.451	123.780	178	936	Timur laut Pulau Hoga
4	-5.576	123.763	234	1.157	Barat daya Pulau Kaledupa
5	-5.721	123.962	216	1.091	Timur laut Pulau Tomia
6	-5.833	123.934	122	1.055	Barat daya Pulau Lentea
7	-5.905	124.048	210	807	Timur laut Pulau Binongko
8	-6.042	124.056	13	1.296	Selatan Pulau Binongko
9	-5.326	124.350	226	1.383	Timur Laut Pulau Runduma
10	-6.122	124.588	290	968	Barat laut Pulau Murumaho

Sumber data

Data yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan data sekunder yang terdiri atas data angin, dari *European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF)* <https://cds.climate.copernicus.eu/> dengan resolusi spasial 0,25°×0,25°, dan data batimetri Batnas BIG <http://batnas.big.go.id/> dengan resolusi spasial 0,00166° (sekitar 185 meter).

Metode analisis data

Fluks energi gelombang J umumnya dimanfaatkan untuk menilai tingkat energi gelombang. Fluks ini merepresentasikan transportasi energi gelombang per satuan panjang puncak (Sheng & Li, 2017)

$$J = \rho g \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} C_g(\sigma, h) E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$$

Di mana ρ adalah massa jenis air laut (1025 kg/m^3), g adalah percepatan gravitasi ($9,81 \text{ m/s}^2$), C_g adalah kecepatan kelompok (m/s), $E(\sigma, \theta)$ adalah spektrum energi gelombang terarah ($\text{m}^2/\text{Hz}/\text{rad}$), σ adalah frekuensi relatif dan θ adalah arah perambatan gelombang, tegak lurus terhadap puncak gelombang. Kecepatan kelompok gelombang diberikan oleh teori gelombang linear sebagai:

$$C_g(\sigma, h) = \frac{\sigma}{2k} \left(1 + \frac{2kh}{\sinh^2(2kh)} \right)$$

di mana $k=2\pi/L$ adalah bilangan gelombang dan L adalah panjang gelombang. Dalam kondisi perairan dalam, fluks energi gelombang J dapat disederhanakan menjadi (Shi et al., 2022)

$$J = \frac{\rho g^2}{64\pi} T_e H_s^2$$

Di mana H_s adalah tinggi gelombang signifikan dan T_e adalah periode energi gelombang. Dalam model MIKE21 SW, momen spektral orde ke- n didefinisikan sebagai:

$$m_n = \int_0^{2\pi} \int_0^{\infty} \sigma^n E(\sigma, \theta) d\sigma d\theta$$

Oleh karena itu, periode energi gelombang T_e dan tinggi gelombang signifikan H_s masing-masing diberikan oleh:

$$T_e = T_{-1,0} = \frac{m_{-1}}{m_0}$$

$$H_s = H_{m0} = 4(m_0)^{1/2}$$

spektrum $E(\sigma, \theta)$ diadopsi untuk memastikan konservasi energi gelombang, Semua informasi tentang permukaan laut terkandung dalam spektrum variansi gelombang atau kerapatan energi $E(\sigma, \theta)$, yang mendistribusikan energi gelombang pada frekuensi σ dan arah propagasi θ .

$$N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta) / \sigma$$

Persamaan keseimbangan energi gelombang laut dapat dinyatakan dalam bentuk (*Swanetech*, n.d.)

$$\frac{\partial E}{\partial t} + \vec{c}_g \cdot \nabla_{\vec{\chi}} E + E \nabla_{\vec{\chi}} \cdot \vec{c}_g = S_{\text{tot}}$$

Persamaan di atas menggambarkan evolusi energi gelombang E dalam ruang dan waktu dengan mempertimbangkan propagasi serta efek divergensi kecepatan grup. $\frac{\partial E}{\partial t}$ merepresentasikan laju perubahan energi gelombang terhadap waktu pada suatu titik tetap dalam ruang. $\vec{c}_g \cdot \nabla_{\vec{\chi}} E$ menunjukkan perpindahan spasial energi gelombang yang dikendalikan oleh kecepatan grup \vec{c}_g ,

yang mengindikasikan bagaimana energi gelombang menyebar dalam domain geografis. $E \nabla_{\vec{\chi}} \cdot \vec{c}_g$ menggambarkan efek divergensi kecepatan grup terhadap distribusi energi gelombang, di mana perubahan kecepatan grup sepanjang jalur propagasi dapat menyebabkan penumpukan atau penyebaran energi dalam suatu wilayah. S_{tot} , merepresentasikan istilah sumber dan kehilangan energi gelombang yang dapat berasal dari berbagai proses fisik, seperti transfer energi dari angin ke gelombang, disipasi akibat gesekan dasar laut, pemecahan gelombang di perairan dangkal, atau interaksi non-linear antar gelombang.

Validasi model

Setelah dilakukan pemodelan, selanjutnya ialah membandingkan luaran model numerik. Luaran yang dibandingkan ialah komponen tinggi gelombang signifikan pada jangka waktu satu tahun mulai dari tanggal 1 Januari 2021 pukul 00:00 sampai dengan 31 Desember 2021 pukul 03:00. Validasi menggunakan persamaan (Rizal & Ningsih, 2022)

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (h_0 - \bar{h}_1)^2}{n}}$$

Analisis statistik

Penentuan lokasi optimal untuk Wave Energy Converter (WEC) di perairan Indonesia dilakukan dengan mempertimbangkan empat parameter, Koefisien Variasi (CoV), Indeks Variabilitas Bulanan (MVI), Identifikasi Hotspot Optimum (OHI), dan Indeks Perkembangan Gelombang (WEDI) (Rizal & Ningsih, 2022).

$$CoV = \frac{\sigma}{\mu}$$

$$MVI = \frac{P_{m_max} - P_{m_min}}{\mu}$$

$$OHI = \frac{\mu \times P_{p>2kW/m}}{MVI}$$

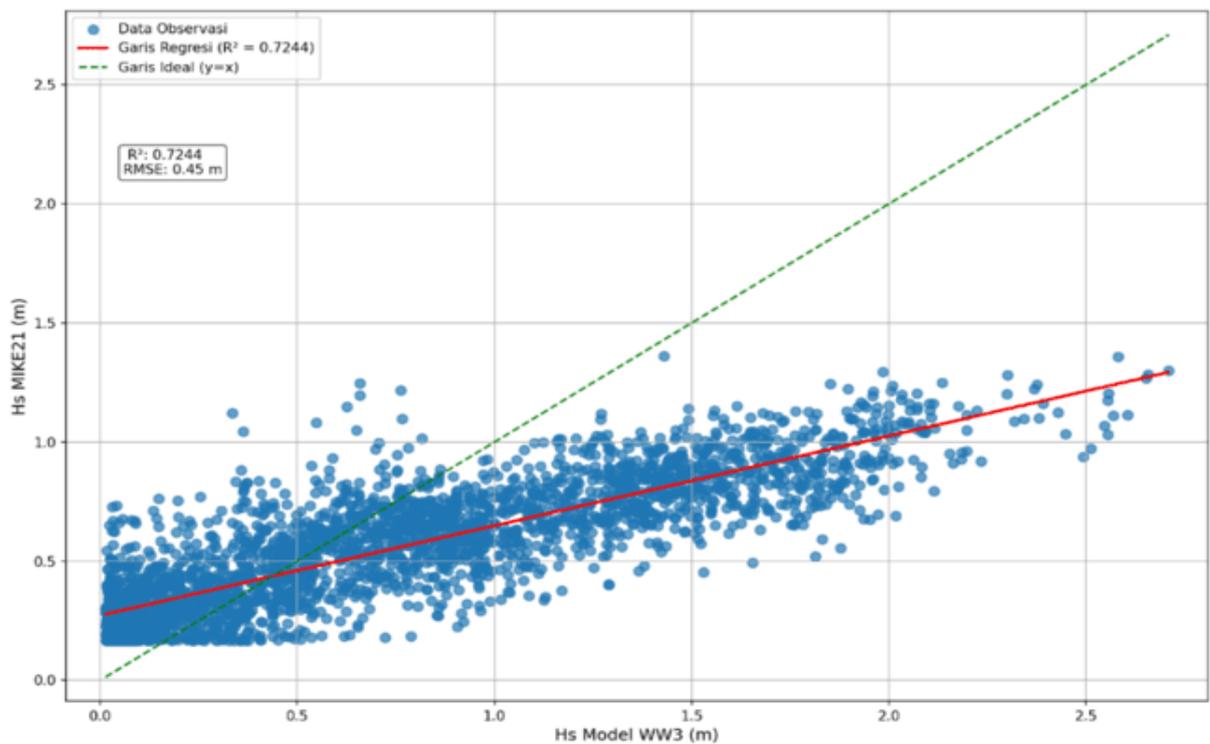
$$WEDI = \frac{\mu}{J_{wave}}$$

CoV dihitung berdasarkan standar deviasi energi gelombang (σ) dan rata-rata energi gelombang selama 5 tahun (μ), sementara MVI dihitung dari selisih antara energi gelombang bulanan tertinggi (P_{m_max}) dan terendah (P_{m_min}) yang dibagi dengan σ . Selain itu, parameter OHI digunakan untuk menentukan lokasi optimal pemasangan Wave Energy Converter (WEC) dengan mempertimbangkan μ , probabilitas kejadian tinggi gelombang signifikan (P), dan MVI. Untuk menganalisis kondisi gelombang ekstrem, WEDI diterapkan dengan membandingkan μ dengan energi gelombang tertinggi dalam periode simulasi 5 tahun (J_{wave}).

PEMBAHASAN

Validasi Model

Validasi dilakukan dengan membandingkan data hasil pemodelan gelombang dengan data model WW3 dari BMKG dengan membandingkan data H_s pada titik lokasi yang diverifikasi dalam periode 1 Januari hingga 31 Desember 2021. Model MIKE21 mampu memprediksi tinggi gelombang signifikan dengan akurasi yang baik ($R^2=0.7244$, $RMSE=0.45$ m), masih dalam batas yang dapat diterima untuk studi gelombang laut. Nilai RMSE di bawah 0.5 m menunjukkan bahwa masih dalam batas yang dapat diterima untuk studi gelombang laut (Rizal & Ningsih, 2022).

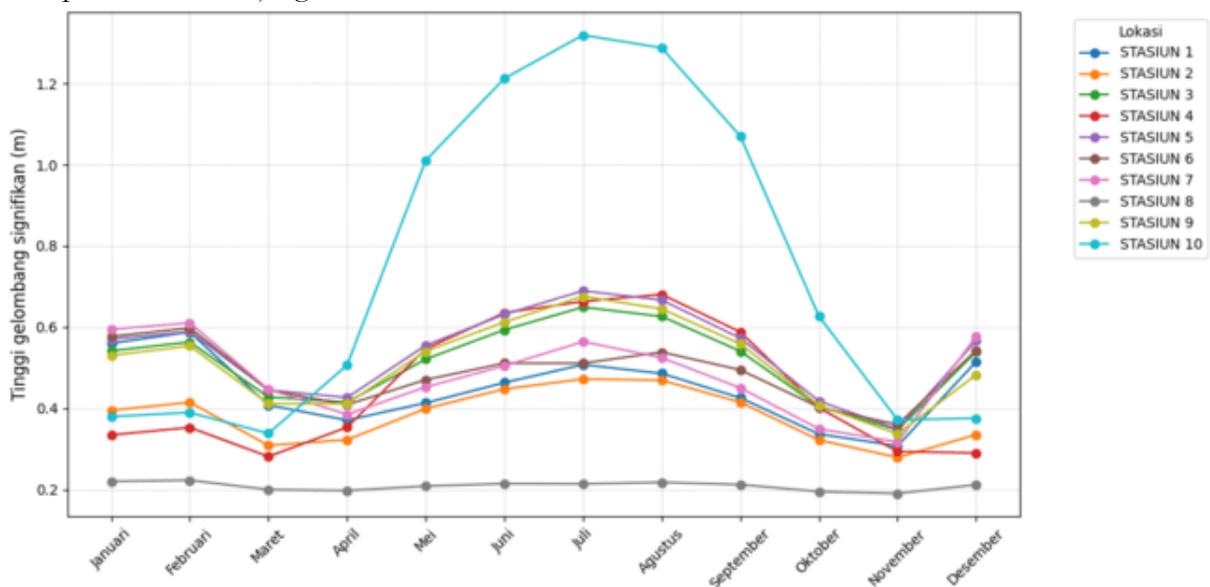


Gambar 2. Validasi Nilai Hs antara Luaran MIKE21 dengan Hs Model WW3 BMKG

Tinggi Gelombang Signifikan Rata Rata (*Hs_{mean}*)

Hasil pemodelan tinggi gelombang signifikan luaran MIKE21 di 10 titik stasiun dalam jangka waktu 5 tahun menunjukkan tinggi gelombang rata-rata *Hs_{mean}* yang cukup bervariasi pada periode bulanan, musiman, dan tahunan. dalam penelitian (Dewi & Sugianto, 2017) yang menyatakan pendangkalan dapat menentukan tinggi gelombang di suatu tempat berdasarkan karakteristik gelombang datang serta distribusi energi gelombang sepanjang Pantai.

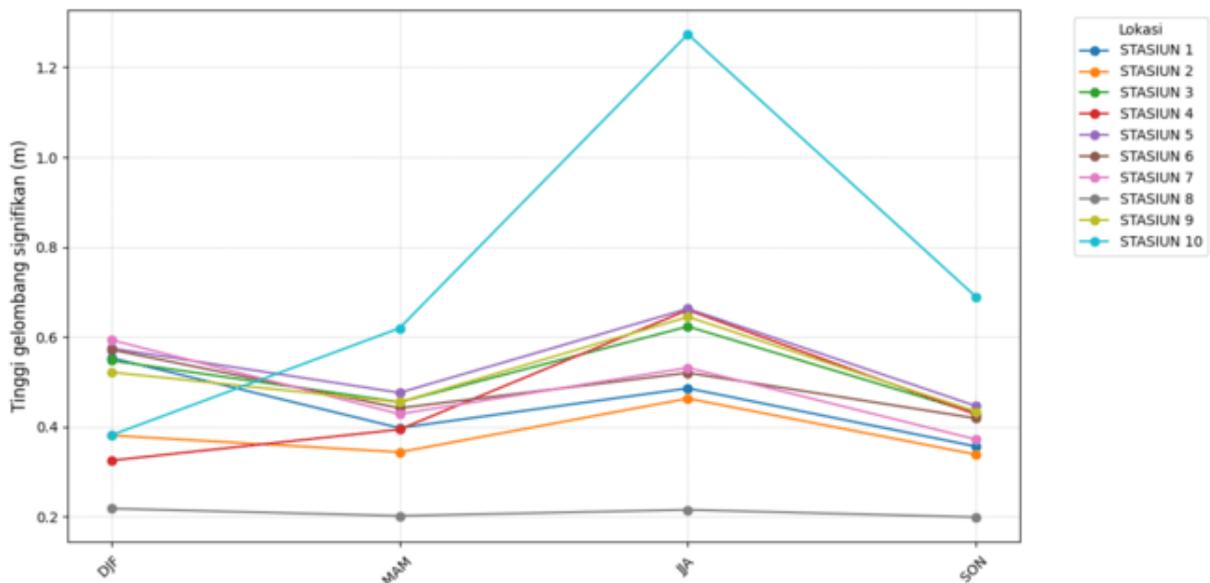
Nilai *Hs_{mean}* bulanan tertinggi selama 5 tahun terjadi di Stasiun 10 pada bulan juli dengan tinggi 1.32 m. Sedangkan nilai *Hs_{mean}* bulanan terendah terjadi pada bulan November di Stasiun 8 dengan tinggi 0.19 m. Dari 10 stasiun tersebut menunjukkan tren grafik *Hs_{mean}* bulanan yang cukup selaras dalam jangka waktu 5 tahun.



Gambar 3. Karakteristik *Hs_{mean}* Bulanan di 10 Stasiun Selama 5 Tahun

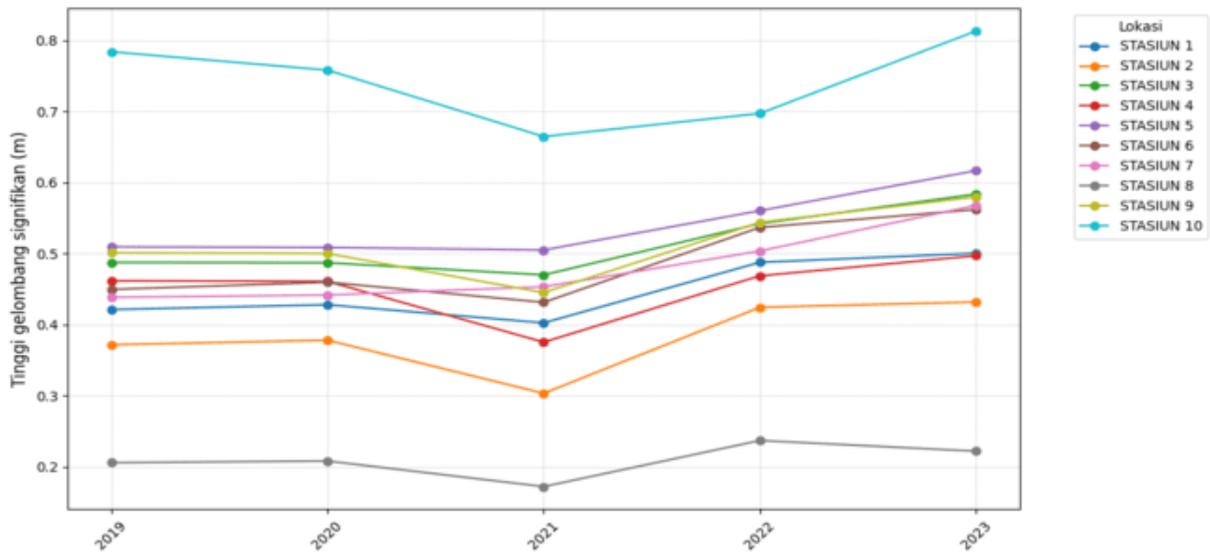
Kemudian, untuk *Hs_{mean}* musiman selama 5 tahun ditunjukkan pada Gambar 4 Dapat dilihat bahwa nilai *Hs_{mean}* musiman tertinggi terjadi di Stasiun 10 pada bulan Juni-Juli-Agustus

(JJA) yang mempunyai nilai sebesar 1.27 m. Sedangkan Hs_{mean} musiman terendah berada terjadi di Stasiun 8 pada musim peralihan 2 bulan September-Oktober-November (SON) yang mempunyai nilai sebesar 0.20 m. Dari 10 stasiun tersebut menunjukkan tren grafik Hs_{mean} musiman yang cukup selaras dalam jangka waktu 5 tahun. Hasil ini sesuai dengan karakteristik tinggi gelombang signifikan pada Perairan Pulau Buton (Amadhan Takwir *et al.*, 2024) Gelombang laut di Perairan Wakatobi cukup dinamis karena dipengaruhi langsung oleh Laut Banda dan Laut Flores yang memiliki kedalaman laut yang bervariasi dimana pada titik lokasi tersebut, Perairan Wakatobi menghadap langsung ke Samudera Hindia dan Laut Flores yang mengakibatkan tinggi gelombang signifikan tertinggi terjadi pada rentang bulan JJA dan tinggi gelombang signifikan terendah terjadi pada bulan SON.



Gambar 4. Karakteristik Hs_{mean} Bulanan di 10 Stasiun Selama 5 Tahun

Kemudian Hs_{mean} tahunan dengan jangka waktu 5 tahun ditunjukkan pada Gambar 5, dimana Hs_{mean} tahunan tertinggi terjadi di Stasiun 10 pada tahun 2023 dengan tinggi sebesar 0.81 m dan tinggi terendah Hs_{mean} tahunan berada di Stasiun 8 pada tahun 2021 sebesar 0.17 m. 10 titik lokasi stasiun menunjukkan tren grafik yang cenderung sama. Namun, pada tahun 2021 terjadi penurunan tinggi gelombang signifikan yang cukup drastis. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Azhari *et al.*, 2022) menganalisis karakteristik tinggi gelombang laut di Laut Banda selama periode monsun timur dan periode ulangnya. Yang menunjukkan bahwa tinggi gelombang signifikan terendah selama 10 tahun (2012 sampai dengan 2021) terjadi pada tahun 2021 dengan tinggi SWH 2.27 pada musim timur, hal tersebut berpengaruh langsung dengan tinggi gelombang signifikan di Perairan Wakatobi, dimana Gelombang laut di Perairan Wakatobi dipengaruhi langsung oleh Laut Banda.

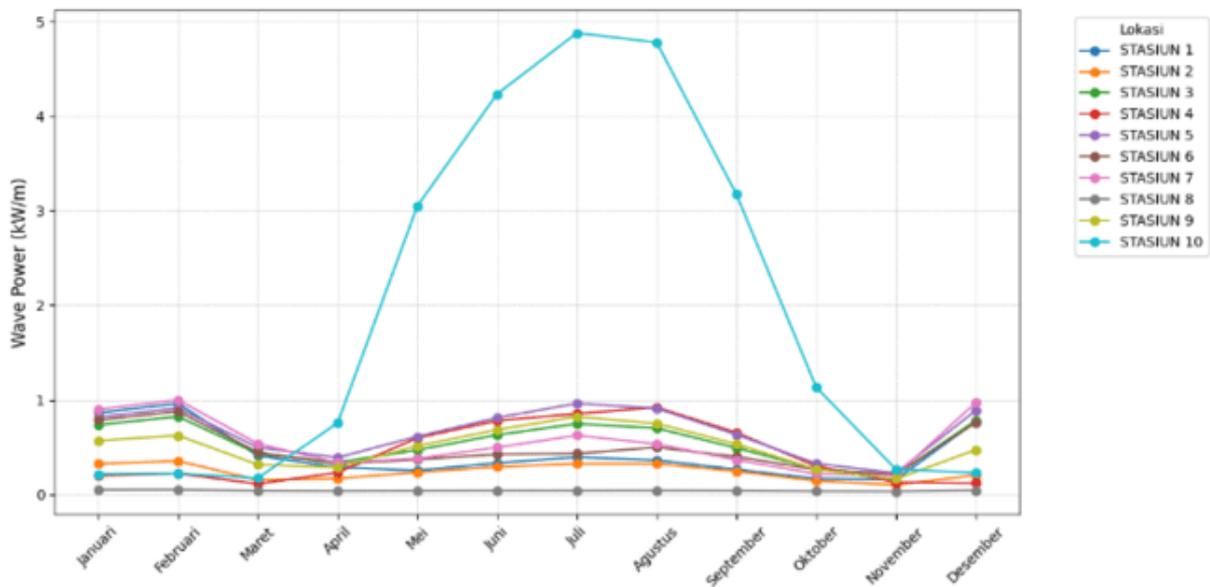


Gambar 5. Karakteristik Hs_{mean} tahunan di 10 Stasiun Selama 5 Tahun

Energi Gelombang Laut

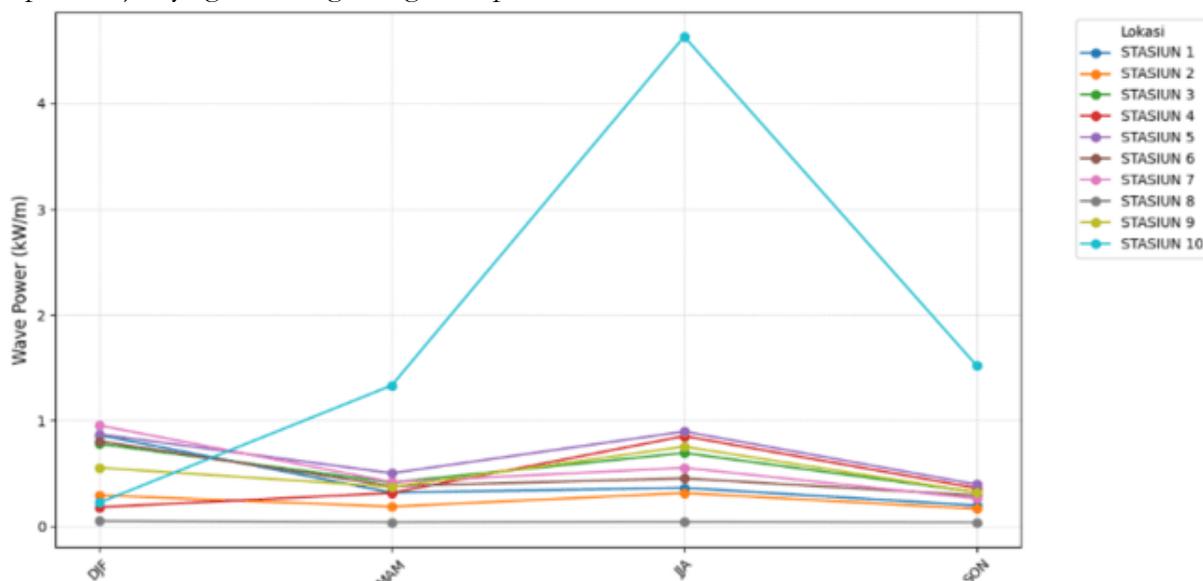
Rata-rata daya gelombang di 10 titik stasiun disajikan dalam Gambar 6, 7, dan 8, dengan distribusi energi gelombang pada 10 titik stasiun tersebut dianalisis berdasarkan daya bulanan, musiman, dan tahunan menggunakan data selama 5 tahun. Terlihat bahwa potensi daya terbesar pada periode bulanan, musiman, dan tahunan berada di Stasiun 10 dengan daya rata-rata gelombang berturut-turut 4.88 kW/m, 4.63 kW/m, dan 2.23 kW/m.

Sedangkan stasiun yang mempunyai daya gelombang rendah di yaitu Stasiun 8 selama periode bulanan, musiman, dan tahunan memiliki besaran 0.05 kW/m, 0.05 kW/m, dan 0.4 kW/m. Gambar 6 menunjukkan bahwa nilai daya rata-rata bulanan tertinggi di setiap stasiun terjadi pada bulan juli dan nilai terendah terjadi pada bulan November. Profil ini sejalan dengan hasil analisis gelombang signifikan sebelumnya dimana nilai Hs terus meningkat dari bulan mei hingga mencapai puncaknya pada bulan juli agustus, kemudian mengalami penurunan hingga bulan Desember. Hal ini dikarenakan nilai Hs merupakan variabel utama untuk mendapatkan daya gelombang. Grafik bulanan daya gelombang menunjukkan nilai daya gelombang yang semakin meningkat dimana pada bulan april memiliki nilai daya yang rendah dan semakin meningkat nilainya dengan daya tertinggi pada bulan Juli dan mengalami kembali penurunan yang signifikan pada bulan November.



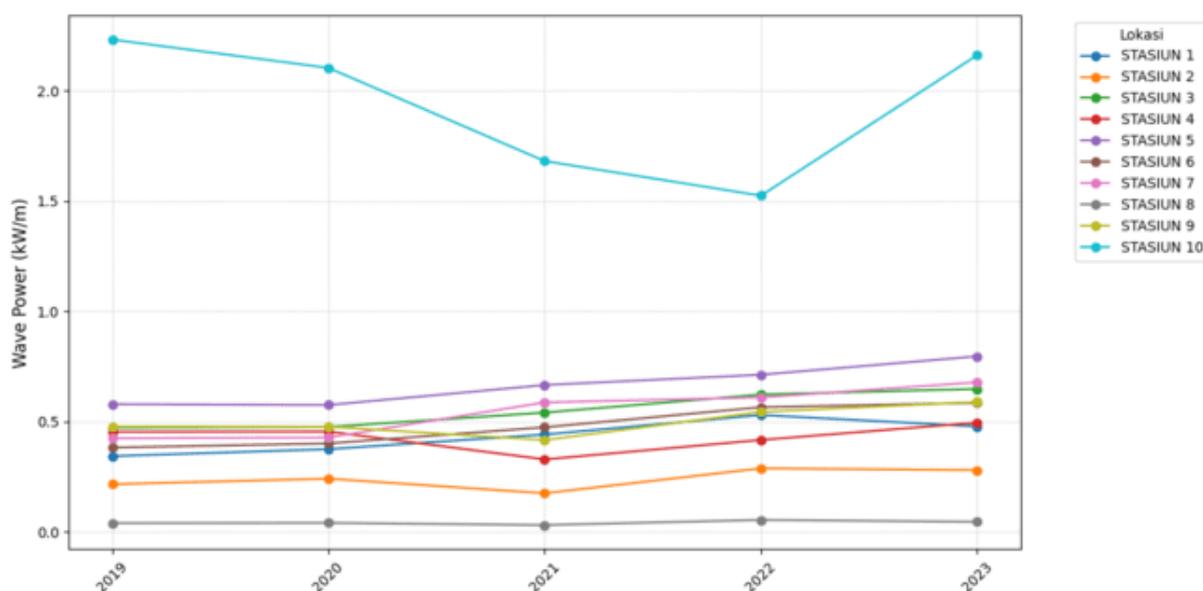
Gambar 6. Daya Rata-Rata Bulanan Selama 5 tahun di 10 titik stasiun

Gambar 7 menunjukkan bahwa pada periode musiman daya terbesar di setiap stasiun terjadi pada bulan-bulan musim JJA (Juni-Juli-Agustus) dengan daya sebesar 4.63 kW/m pada stasiun 10. Sebaliknya, pada musim SON (September-Oktober-November) daya gelombang turun ke nilai minimumnya dengan daya sebesar 0.04 di stasiun 8 nilai daya paling rendah. Untuk periode musiman yang lain merupakan Musim barat yaitu pada bulan DJF (Desember-Januari-Februari) dimana daya gelombang mulai meningkat sedangkan Musim peralihan 1 pada bulan MAM (Maret-April-Mei) daya gelombang mengalami penurunan.



Gambar 7. Daya Rata-Rata musiman Selama 5 tahun di 10 titik stasiun

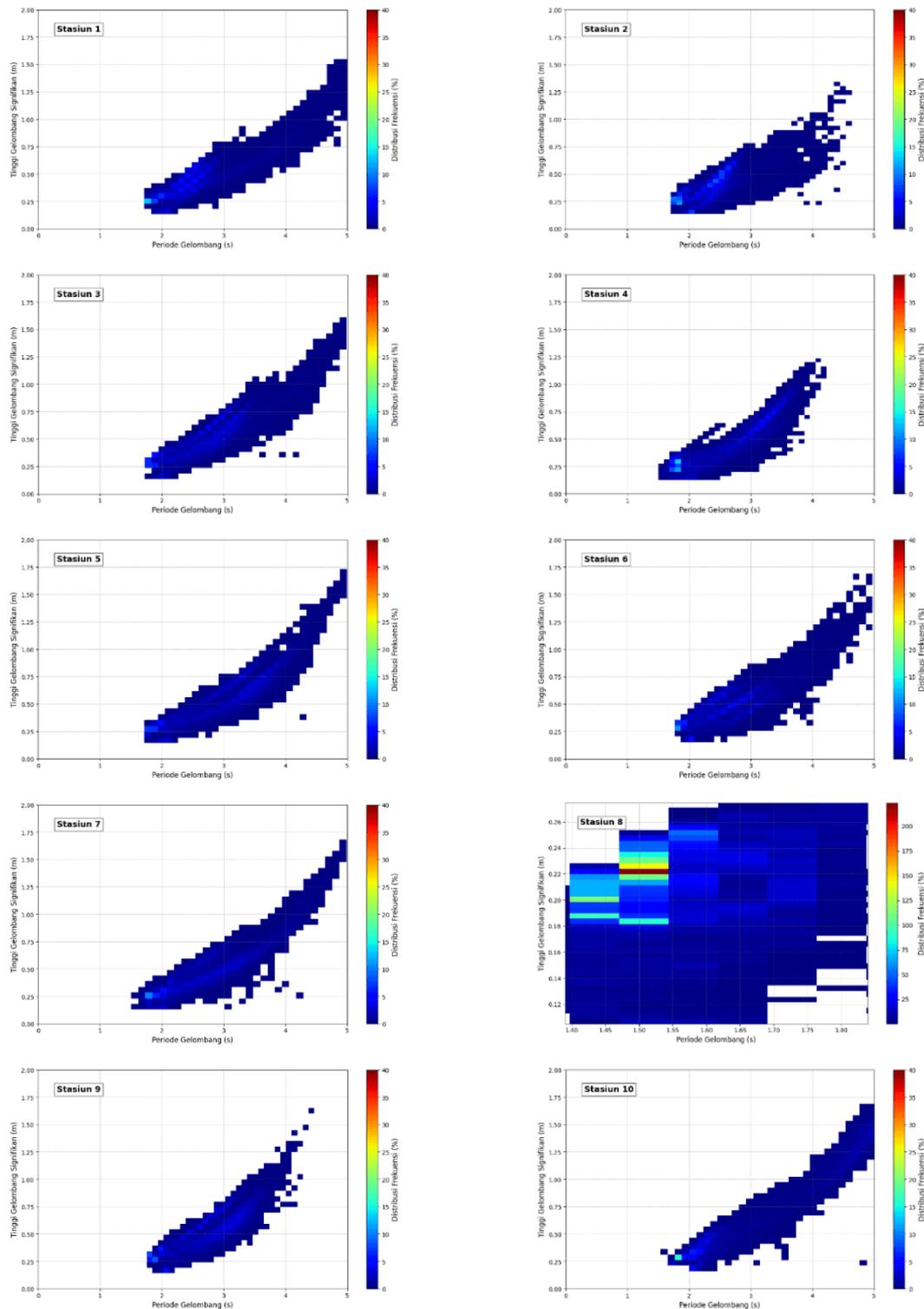
Gambar 8 mengilustrasikan variasi tahunan energi gelombang. Terlihat bahwa terdapat peningkatan daya gelombang dari tahun 2019 hingga 2023 dimana profil ini terlihat jelas pada semua Stasiun, Menariknya, penurunan daya gelombang terjadi pada tahun 2021 untuk stasiun 2, 4, 9, Hal ini terjadi karena pada tahun tersebut terdapat nilai Hs mengalami penurunan pada tahun tersebut yang berdampak pada nilai daya gelombang.



Gambar 8. Daya Rata-Rata tahunan Selama 5 tahun di 10 titik stasiun

Diagram *bivariate*

Diagram bivariate pada Gambar 9 menunjukkan bahwa frekuensi kemunculan tertinggi terjadi antara H_s berkisar 0.26–0.31 m dan T_e berkisar 1.77–1.85 s. Dimana frekuensi paling tinggi terjadi pada stasiun 1, 10 dan 4 dengan frekuensi 11-15% dan stasiun 2, 3, 5, 6, 7 dan 9 dengan frekuensi 10% berbeda dengan stasiun lain stasiun 8 merupakan stasiun yang memiliki distribusi H_s dan T_e paling tinggi >200% dengan T_e 1.50 s dan H_s 0.22 m akan tetapi stasiun 8 merupakan stasiun yang memiliki nilai H_s dan T_e yang paling rendah di antara semua stasiun.

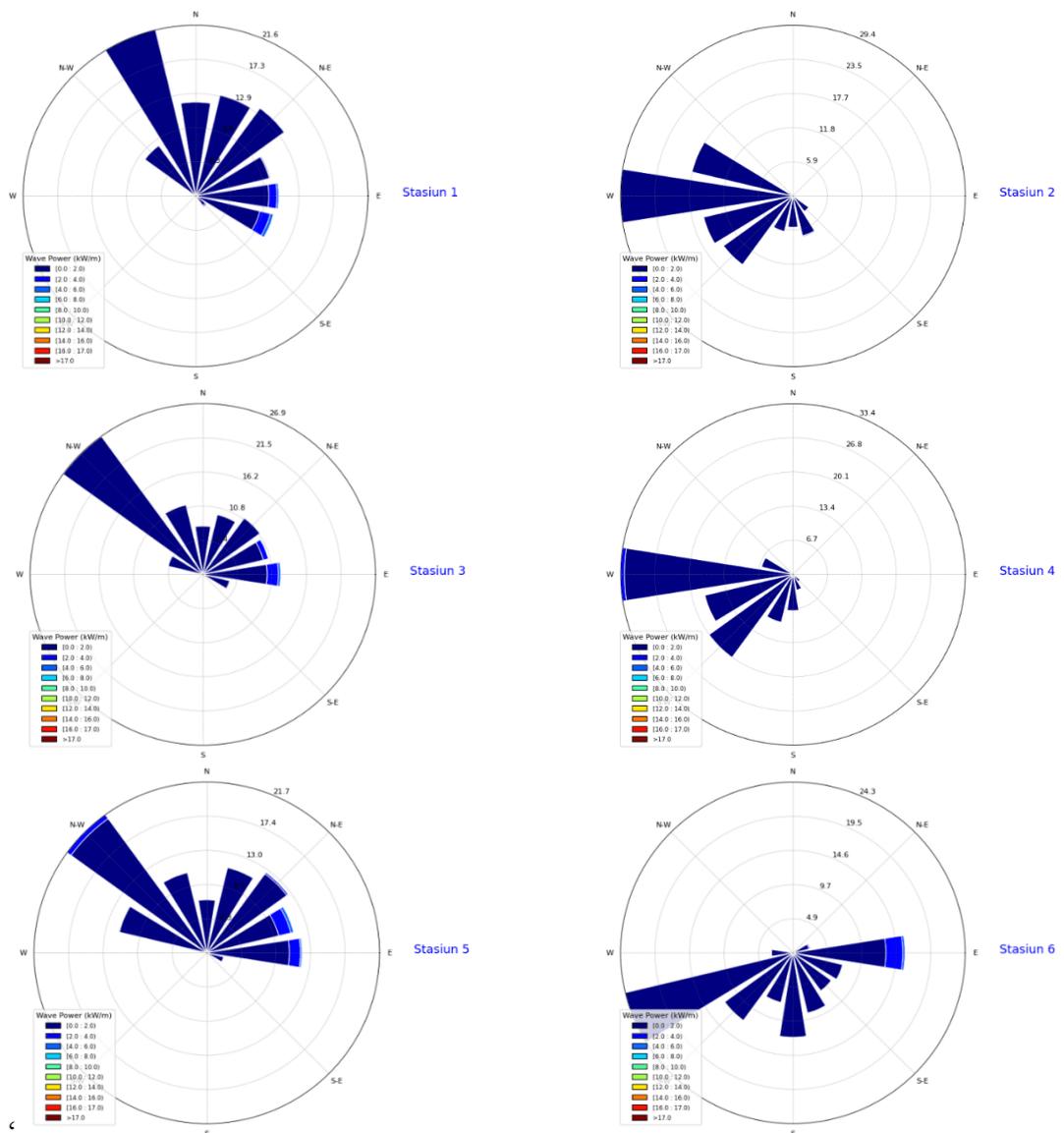


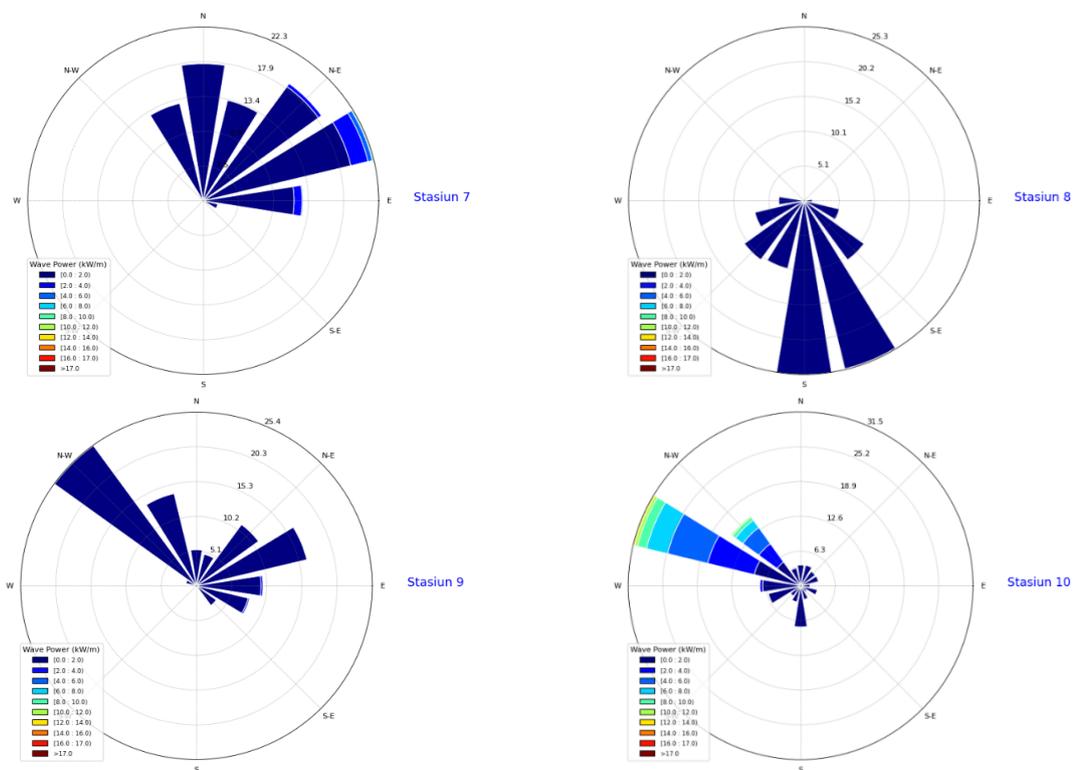
Gambar 9 Diagram *Bivariate* Selama 5 tahun di 10 titik stasiun

Wave power rose

Karakteristik wave power rose merepresentasikan arah gelombang juga diperlukan untuk perancangan instalasi WEC. Terlihat pada Gambar 5, menunjukkan arah gelombang yang cukup bervariasi selama rentang waktu 5 tahun di 10 stasiun tersebut hal ini sesuai dalam penelitian Rizal dan Ningsih (2022), daerah yang terbuka langsung ke Samudra Hindia dan Pasifik memiliki arah gelombang yang relatif sempit, sedangkan laut dalam Indonesia menunjukkan propagasi gelombang dua arah yang terkait dengan musim. Hal tersebut yang menyebabkan gelombang di wakatobi memiliki variasi di pengaruhi oleh musim.

Berdasarkan Gambar 9 pada stasiun 1 , stasiun 3 stasiun 5 dan stasiun 9 menunjukan arah gelombangnya dominan ke arah barat laut dengan daya terbesar dari arah timur dengan rentang daya 2-6 kW/m. Pada stasiun 2, stasiun 4 arah gelombang dominan dari arah barat dengan rentang daya 2-4 kW/m stasiun 6 arah datang gelombang dari barat daya dengan daya tertinggi dari arah timur dengan rentang daya sebesar 2-4 kW/m, stasiun 8 arah datang gelombang dari arah selatan dengan daya maksimal 0.062 kW/m, stasiun 7 arah datang gelombang dari timur laut dengan rentang nilai daya 2-6 kW/m dan stasiun 10 arah datang gelombang dari arah barat laut dengan rentang nilai daya sebesar 2-12 kW/m





Gambar 10. Wave Power Rose Selama 5 tahun di 10 titik stasiun

Statistik Pendukung Daya Gelombang

Selanjutnya, stabilitas daya gelombang perlu diperhatikan dengan mempertimbangkan variabilitas gelombang yang rendah. Daerah dengan nilai variabilitas yang kecil lebih menjanjikan untuk implementasi Wave Energy Converter (WEC) dibandingkan daerah dengan variabilitas tinggi. Hal ini disebabkan sebagian besar WEC hanya dapat menangkap daya gelombang dalam rentang tinggi gelombang dan periode tertentu, sehingga dibutuhkan wilayah dengan karakteristik daya gelombang yang stabil.

Untuk memastikan bahwa suatu daerah memiliki karakteristik daya yang sesuai untuk implementasi WEC, analisis terhadap parameter statistik pendukung dapat dipertimbangkan. Parameter statistik tersebut direpresentasikan oleh beberapa koefisien, yaitu Coefficient of Variance (CoV), Monthly Variability Index (MVI), Optimum Hotspot Identifier (OHI), dan Wave Energy Development Index (WEDI). Nilai kriteria statistik yang harus dipenuhi adalah sebagai berikut: CoV rendah (< 0,8), MVI (< 3), WEDI (< 1), dan OHI tinggi (> 6) (Rizal dan Ningsih, 2020).

Perhitungan koefisien-koefisien ini di 10 stasiun pengamatan menghasilkan nilai statistik yang bervariasi. CoV berkisar antara 0,3–1,7; MVI berkisar antara 2,6–32,7; OHI berkisar antara 0–0,07; dan WEDI berkisar antara 0,03–0,3, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.2.

Berdasarkan perhitungan CoV, hanya Stasiun 8 yang memenuhi kriteria dengan nilai 0,02. Stasiun lainnya memiliki nilai CoV di atas ambang batas, seperti Stasiun 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, dan 10, yang menunjukkan nilai >1 dan tidak memenuhi kriteria CoV rendah (< 0,8). Stasiun 8 juga menjadi satu-satunya yang memenuhi kriteria MVI dengan nilai <3, sementara stasiun lainnya memiliki nilai yang lebih tinggi, berkisar antara 7 hingga 31, dengan nilai tertinggi ditemukan di Stasiun 1. Hal ini sejalan dengan penelitian Rizal dan Ningsih (2022), yang menyatakan bahwa nilai CoV di perairan dalam Indonesia lainnya berkisar antara 1–2, sedangkan nilai MVI berkisar antara 1–6, yang juga tidak memenuhi kriteria.

Dua parameter indeks, OHI dan WEDI, digunakan sebagai indikator praktis untuk menentukan lokasi ideal pemasangan WEC di perairan Wakatobi. Nilai OHI yang tinggi sangat diharapkan karena menunjukkan kandungan energi yang besar, frekuensi kejadian yang sering, dan variabilitas yang rendah. Namun, berdasarkan nilai OHI di seluruh stasiun, tidak ada stasiun yang

memenuhi kriteria (> 6). Hal ini disebabkan oleh rendahnya frekuensi kejadian daya gelombang di atas 2 kW/m di perairan Wakatobi. Bahkan, di Stasiun 8, nilai OHI tercatat sebesar 0, menunjukkan tidak adanya daya gelombang sebesar 2 kW/m. Stasiun 10 memiliki nilai OHI tertinggi, yaitu 0,07, tetapi tetap tidak memenuhi kriteria.

Analisis WEDI menunjukkan bahwa semua stasiun memenuhi kriteria WEDI (< 1), dengan rentang nilai antara 0,03–0,3. Hal ini menunjukkan bahwa gelombang di perairan Wakatobi cukup tenang. Temuan ini sesuai dengan penelitian Rizal dan Ningsih (2022), yang menyatakan bahwa analisis WEDI di perairan dalam Indonesia menunjukkan kondisi gelombang yang relatif tenang dengan nilai dominan antara 0–0,1.

Tabel 2. Parameter statistik CoV, MVI, OHI dan WEDI

Stasiun	Lokasi		Depth (m)	Daya (kW/m)	CoV	MVI	OHI	WEDI
	Latitude	Longitude						
1	-5.277	123.641	175	2.164	1.700	32.703	0.0005	0.031
2	-5.361	123.471	199	1.196	1.063	18.280	0.00003	0.054
3	-5.451	123.780	178	2.757	1.213	17.371	0.00107	0.057
4	-5.576	123.763	234	2.145	1.084	7.782	0.00047	0.128
5	-5.721	123.962	216	3.325	1.130	15.883	0.00197	0.063
6	-5.833	123.934	122	2.404	1.235	18.887	0.00076	0.053
7	-5.905	124.048	210	2.723	1.431	20.593	0.00127	0.048
8	-6.042	124.056	13	0.206	0.338	2.654	0	0.345
9	-5.326	124.350	226	2.500	0.883	13.085	0.00031	0.076
10	-6.122	124.588	290	9.702	1.334	8.991	0.07336	0.111

Berdasarkan Pola distribusi diagram *bivariate wave power rose* dan parameter statistik CoV, MVI, OHI dan WEDI stasiun 8 merupakan titik stasiun yang memenuhi yang memenuhi kriteria CoV, MVI dan WEDI dan stasiun 8 merupakan stasiun yang memiliki distribusi Hs dan Te paling tinggi >200 dengan Te 1.50 dan Hs 0.22 dengan arah dominan gelombang dari arah selatan dengan daya 0.062 kW/m sedangkan titik stasiun 10 memiliki daya paling besar dengan arah datang gelombang dari arah barat laut dengan nilai daya sebesar 2-12 kW/m dengan distribusi Hs dan Te 15% dengan Te 1.83 dan Hs 0.29

KESIMPULAN

Rata-rata daya gelombang di Perairan Wakatobi bervariasi secara temporal dengan Potensi daya rata-rata gelombang bulanan sebesar 0,01 kW/m sampai 4,88 kW/m, musiman sebesar 0,05 kW/m sampai 4,63 kW/m, dan tahunan sebesar 0,4 kW/m sampai 2,23 kW/m.

Berdasarkan kriteria implementasi WEC berupa, $CoV < 0.8$, $MVI < 3$, $WEDI < 1$, dan $OHI > 6$, maka Stasiun 8 merupakan lokasi yang memenuhi 3 kriteria CoV, MVI dan WEDI sedangkan stasiun lain hanya memenuhi kriteria WEDI dengan daya tertinggi di semua stasiun pada stasiun 10 dengan daya gelombang terbesar

DAFTAR PUSTAKA

- Azhari, F., Setiyo Pranowo, W., Purwanto, B., Suryo Widodo, K., & Azis Kurniawan, M. (1322). *Jakarta 14240 2 Badan Riset dan Inovasi Nasional JL Pemuda Persil* (Issue 1). Ancol.
- Behrens, S., Hayward, J., Hemer, M., & Osman, P. (2012). Assessing the wave energy converter potential for Australian coastal regions. *Renewable Energy*, *43*, 210–217. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.11.031>
- Dalton, G. J., Alcorn, R., & Lewis, T. (2012). A 10 year installation program for wave energy in Ireland: A case study sensitivity analysis on financial returns. *Renewable Energy*, *40*(1), 80–89. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2011.09.025>
- Day, A. H., Babarit, A., Fontaine, A., He, Y. P., Kraskowski, M., Murai, M., Penesis, I., Salvatore, F., & Shin, H. K. (2015). Hydrodynamic modelling of marine renewable energy devices: A state of the art review. *Ocean Engineering*, *108*, 46–69. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.05.036>
- Dewi, A., & Sugianto, D. N. (2017). *ANALISIS DEFORMASI GELOMBANG DI PULAU SIBERUT KABUPATEN KEPULAUAN MENTAWAI SUMATERA BARAT* (Vol. 6, Issue 2). <http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jose>
- Falcão, A. F. de O. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 14, Issue 3, pp. 899–918). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2009.11.003>
- Henderson, R. (2006). Design, simulation, and testing of a novel hydraulic power take-off system for the Pelamis wave energy converter. *Renewable Energy*, *31*(2), 271–283. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.08.021>
- Irhas, & Suryaningsih, R. (2014). Study on wave energy into electricity in the south coast of yogyakarta, Indonesia. *Energy Procedia*, *47*, 149–155. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.208>
- Mahiru Rizal, A., Sari Ningsih, N., Sofian, I., Hanifah, F., & Hilmi, I. (2019). Preliminary study of wave energy resource assessment and its seasonal variation along the southern coasts of Java, Bali, and Nusa Tenggara waters. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, *11*(1). <https://doi.org/10.1063/1.5034161>
- Maladeni, E. S., & Ishak, A. (n.d.). *Arah Dan Kecepatan Angin Di Kabupaten Wakatobi Sebagai Sumber Pembangkit Listrik Tenaga Angin*.
- Mendoza, E., Silva, R., Zanuttigh, B., Angelelli, E., Lykke Andersen, T., Martinelli, L., Nørgaard, J. Q. H., & Ruol, P. (2014). Beach response to wave energy converter farms acting as coastal defence. *Coastal Engineering*, *87*, 97–111. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2013.10.018>
- Ribal, A., & Zieger, S. (2016). Wave energy resource assessment based on satellite observations around Indonesia. *AIP Conference Proceedings*, *1737*. <https://doi.org/10.1063/1.4949308>
- Rizal, A. M., & Ningsih, N. S. (2022). Description and variation of ocean wave energy in Indonesian seas and adjacent waters. *Ocean Engineering*, *251*. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2022.111086>
- Sandro, R., Amudin, Tussadiah, A., Utamy, R. M., Pridina, N., & Afifah, L. N. (2014). Study of wind, tidal wave and current potential in sunda strait as an alternative energy. *Energy Procedia*, *47*, 242–249. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.01.220>
- Santoso, M. A., Wijayanti, Y., Prasetyo, R. B., Setyandito, O., Nizam, Aprijanto, Subandriya, A., Kurniawan, A. T., Sudaryanto, A., & Sutejo, B. (2023). A Mini Review: Wave Energy Converters Technology, Potential Applications and Current Research in Indonesia. *Evergreen*, *10*(3), 1642–1650. <https://doi.org/10.5109/7151712>
- Sheng, W., & Li, H. (2017). A method for energy and resource assessment of waves in finite water depths. *Energies*, *10*(4). <https://doi.org/10.3390/en10040460>
- Shi, X., Liang, B., Du, S., Shao, Z., & Li, S. (2022). Wave energy assessment in the China East Adjacent Seas based on a 25-year wave-current interaction numerical simulation. *Renewable Energy*, *199*, 1381–1407. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.09.094>

- Sidik, M., & Sinaga, N. (2023). Potensi Pemanfaatan Gelombang Laut Menjadi Tenaga Listrik Dengan Metoda Oscillating Water Column di Pulau Bawean Gresik. *Jurnal Energi Baru Dan Terbarukan*, 4(2), 132–144. <https://doi.org/10.14710/jebt.2023.17306>
- Zunasri, Asmadin, & Takwir, A. (2024). Karakteristik gelombang laut di perairan pulau buton dengan menggunakan model swan. *Sapa Laut*. 9(2). <http://dx.doi.org/10.33772/jsl.v9i2.49102>