

Analisis Kecenderungan Musiman Tinggi Gelombang Signifikan di Laut Indonesia Tahun 1980-2020 untuk Mendukung Pembangunan Pesisir Berkelanjutan

Muhammad Baharudin Fahmi¹, Harish Wirayuhanto^{2*}, Haryo Dwito Armono², Muhammad Zikra²,
Suratno Lorentius²

¹Program Profesi Insinyur Universitas Katolik Widya Mandala Surabaya
Jl Dinoyo 42-44 Wonorejo Kota Surabaya 60265

²Departemen Teknik Kelautan Fakultas Teknologi Kelautan Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Jl Raya ITS Sukolilo Surabaya 60111

*E-mail Korespondensi : hwirayuhanto@gmail.com

DOI: <https://doi.org/10.21107/rekayasa.v18i2.29978>

Submitted May 9th 2025, Accepted July 29th 2025, Published August 10th 2025

Abstrak

Kenaikan muka air laut sebagai salah satu konsekuensi dari perubahan iklim global telah berdampak signifikan terhadap perubahan dinamika oseanografi, khususnya karakteristik gelombang laut. Salah satu parameter penting yang terdampak adalah tinggi gelombang signifikan yang dapat memengaruhi keselamatan pelayaran, keberlanjutan kegiatan perikanan, stabilitas bangunan pesisir, serta risiko abrasi dan banjir rob. Indonesia sebagai negara kepulauan dengan garis pantai terpanjang kedua di dunia sangat rentan terhadap perubahan ini. Oleh karena itu, pemahaman terhadap tren perubahan tinggi gelombang secara spasial dan temporal sangat penting untuk mendukung kebijakan adaptasi dan mitigasi di wilayah pesisir. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis tren kenaikan tinggi gelombang signifikan di wilayah perairan Indonesia menggunakan data reanalisis ERA-5 dari ECMWF selama periode 1980 hingga 2020. Analisis tren dilakukan menggunakan metode statistik non-parametrik yaitu Mann-Kendall Test untuk mendeteksi adanya tren yang signifikan secara statistik, dan Sen's Slope Estimator untuk mengukur besarnya tren tersebut. Tingkat signifikansi yang digunakan adalah 0,05. Perairan Barat Sumatera, Selatan Sumatera, dan Utara Papua mengalami tren kenaikan di semua musim dengan laju maksimum sebesar 1,39 cm/tahun. Sebaliknya, wilayah Utara Jawa Tengah dan Utara Pulau Masalembu tidak menunjukkan tren yang signifikan sepanjang musim. Di wilayah Laut Banda dan Selatan Papua, tren kenaikan tinggi gelombang signifikan terjadi pada musim Timur (JJA) dan musim peralihan kedua (SON) dengan nilai maksimum 1,70 cm/tahun. Sementara di perairan Selatan Pulau Lombok, tren positif terjadi pada musim Barat (DJF) dan musim peralihan pertama (MAM) dengan laju hingga 1,46 cm/tahun. Wilayah dengan tren tertinggi terdeteksi di Selatan Pulau Jawa pada musim Barat dengan tren 1,72 cm/tahun. Temuan ini menunjukkan bahwa sebagian besar wilayah perairan Indonesia mengalami perubahan karakteristik gelombang yang signifikan akibat perubahan iklim.

Kata Kunci: perubahan iklim, kenaikan muka laut, tinggi gelombang signifikan, ECMWF

Abstract

Sea level rise, as one of the consequences of global climate change, has significantly impacted oceanographic dynamics, particularly wave characteristics. One of the most critical affected parameters is significant wave height, which directly influences maritime safety, the sustainability of fisheries, the stability of coastal infrastructure, and the risk of coastal erosion and tidal flooding. As an archipelagic nation with the second-longest coastline in the world, Indonesia is highly vulnerable to such changes. Therefore, understanding the spatial and temporal trends in significant wave height is essential to support effective adaptation and mitigation policies in coastal regions. This study aims to analyze the trend of increasing significant wave height in Indonesian waters using ERA5 reanalysis data from the European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) over the period from 1980 to 2020. The trend analysis was conducted using non-parametric statistical methods, namely the Mann-Kendall test to detect statistically significant trends and Sen's Slope Estimator to quantify the rate of change. A significance level of 0.05 was applied in the analysis. The results indicate a significant upward trend in significant wave height across several Indonesian maritime regions. Conversely, the northern waters of Central Java and the northern region of Masalembu Island exhibited no statistically significant trend across seasons. The Banda Sea and southern Papua experienced significant increases during the dry season (JJA) and the second transitional season (SON), with a peak rate of 1.70 cm/year. In the southern waters of Lombok Island, positive trends were observed in the wet season (DJF) and the first transitional season (MAM), with rates reaching 1.46 cm/year. The highest trend was recorded in the southern waters of Java during the wet season (DJF), at 1.72 cm/year. These findings suggest that most Indonesian waters are experiencing significant changes in wave characteristics as a result of climate change, highlighting the urgency for long-term oceanographic monitoring and the integration of wave data into coastal development and climate adaptation strategies.

Key words: : climate change, sea level rise, significant wave height, ECMWF

PENDAHULUAN

Kenaikan permukaan laut merupakan salah satu akibat paling signifikan dari perubahan iklim yang mulai katif diteliti sejak tahun 1900-an. Masalah tersebut kemudian menjadi isu lingkungan secara global, karena akibat dari perubahan iklim adalah nyata terlihat di daerah pesisir. Beberapa dampak dari kenaikan muka air laut bagi daerah pesisir yang teridentifikasi adalah semakin tingginya intensitas genangan dan banjir di dataran rendah pesisir, peningkatan skala erosi pantai menjadi lebih besar, efek pada ekosistem pesisir seperti perubahan daerah mangrove dan pemutihan karang, peningkatan intrusi air asin ke muara dan akuifer, merubah pola sedimentasi di sepanjang alur sungai (Imura, 2013; Abdillah, 2025, Hemer, 2018).

Penelitian kenaikan permukaan laut rata-rata global berdasarkan data satelit altimeter yang dilakukan pada tahun 1993–2009 dan hasil data pengukuran permukaan laut pesisir dan pulau mulai dari tahun 1880 hingga 2009. Untuk 1993–2009 dan setelah koreksi untuk penyesuaian isostatik glasial, perkiraan laju kenaikan adalah $3,2 \pm 0,4$ mm /tahun dari data satelit dan $2,8 \pm 0,8$ mm/ tahun dari data in situ. Rata-rata kenaikan permukaan laut global dari tahun 1880 hingga 2009 adalah sekitar 210 mm. Tren linier dari tahun 1900 hingga 2009 adalah $1,7 \pm 0,2$ mm tahun⁻¹ dan sejak tahun 1961 adalah $1,9 \pm 0,4$ mm/tahun (Church & White, 2011). Kenaikan permukaan laut yang diproyeksikan sebesar 18–59cm pada tahun 2100, yang diberikan oleh laporan Penilaian Keempat IPCC, dapat dipahami sebagai batas bawah dari kemungkinan kenaikan. Meskipun beberapa studi berdasarkan model semi-empiris menunjukkan bahwa permukaan laut akan naik lebih dari 1m pada tahun 2100 (Imura, 2013; Abdillah, 2025; Hemer, 2018).

Penelitian kenaikan permukaan laut rata-rata global berdasarkan data satelit altimeter yang dilakukan pada tahun 1993–2009, dimana untuk data tahun 1993–2009 setelah dikoreksi untuk penyesuaian isostatik glasial, perkiraan laju kenaikan adalah $3,2 \pm 0,4$ mm /tahun dari data satelit. Sedangkan hasil data pengukuran permukaan laut pesisir dan pulau mulai dari tahun 1880 hingga 2009 menunjukkan, bahwa kenaikan muka air laut adalah $2,8 \pm 0,8$ mm/tahun dari data in situ. Sehingga rata-rata kenaikan permukaan laut global dari tahun 1880 hingga 2009 adalah sekitar 210 mm. kecenderungan kenaikan secara linier dari tahun 1900 hingga 2009 adalah $1,7 \pm 0,2$ mm/tahun dan sejak tahun 1961 adalah $1,9 \pm 0,4$ mm/tahun (Church & White, 2011). Disisi lain, proyeksi Kenaikan permukaan laut yang diberikan oleh laporan Penilaian Keempat IPCC sebesar 18–59cm pada tahun 2100 dapat dipahami sebagai batas bawah dari kemungkinan kenaikan. Meskipun beberapa studi berdasarkan model semi-empiris menunjukkan bahwa permukaan laut akan naik lebih dari 1m pada tahun 2100 (Imura, 2013).

Di Indonesia, berdasarkan analisis dan pengolahan data satelit altimetri menggunakan Topex/Poseidon dan Jason Series dengan menghapus sinyal periodik menggunakan dekomposisi tren musiman berdasarkan loess, dapat dikatakan bahwa laju/kecepatan kenaikan muka air laut di Indonesia adalah +4,6 mm/tahun dengan nilai minimum SLA terjadi pada bulan November tahun 1997 yaitu -126,1 mm dan nilai SLA (Sea-Level Anomaly) maksimum terjadi pada bulan November tahun 2010 yaitu 174,5 mm. sedangkan setiap bulan Maret terjadi nilai sea level anomaly musiman dengan nilai 9,1mm, sedangkan pada setiap bulan Oktober terjadi nilai sea level anomaly musiman dengan nilai -1,3 mm (Handoko et al., 2019). Disisi lain, dengan menggunakan data satelit altimetri dari Jason 2, pemantauan kenaikan muka air laut yang telah dilakukan selama periode 2009-2012 di 4 lokasi yaitu Medan, Pemangkat, Ambon, dan Manokwari menunjukkan bahwa kenaikan muka air laut tertinggi di Manokwari 14,1 mm/tahun, dan terendah di Ambon sebesar 1.175 mm/tahun.

Implikasi dari perubahan kenaikan muka air laut juga diiringi perubahan kondisi gelombang ekstrim yang terjadi, proyeksi global perubahan iklim gelombang ekstrim akibat pemanasan global berdasarkan data GCM resolusi tinggi 20 km yang dikembangkan oleh MRI-JMA adalah tinggi gelombang signifikan (H_s) di Samudra Pasifik di khatulistiwa akan berkurang sekitar 7% yang sesuai dengan penurunan rata-rata ketinggian gelombang 0,1 m. Proyeksi H_s di kisaran garis lintang 30°LU–45°LU di Pasifik Utara dan Samudra Atlantik Utara akan berkurang 7% atau 0,15 m tinggi gelombang rata-rata. Wilayah lepas pantai Timur Jepang di Samudra Pasifik termasuk dalam wilayah yang menurun dan diperkirakan akan berkurang 5-10% di masa depan. Di sisi lain, proyeksi tinggi gelombang di Samudra Antartika akan meningkat 6-9% yang sesuai dengan peningkatan lebih dari 0,2 m dari tinggi gelombang rata-rata (Mori et al., 2010; Young, 2023; Sierra, 2023).

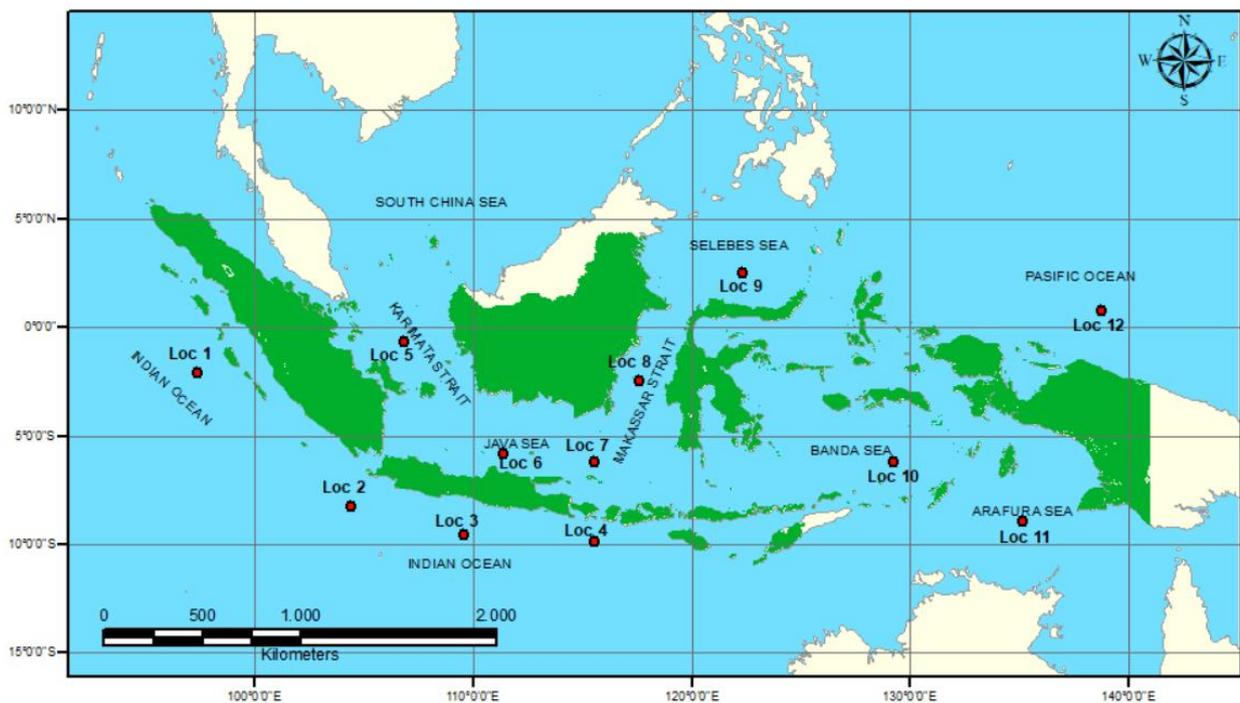
Sedangkan penelitian untuk wilayah perairan Indonesia bagian utara berdasarkan simulasi tinggi gelombang signifikan global periode 20 tahun dari tahun 1984 sampai 2003 berdasarkan data dari Japan Meteorology Agency/Meteorology Research Institute (JMA/MRI)-AGCM3.2 didapatkan hasil bahwa data iklim angin di Indonesia tren peningkatan tinggi gelombang signifikan berada di North Natuna, Banda Aceh, Papua Utara dan Jogjakarta Selatan berkisar 0,38 – 0,75 cm/tahun (Zikra et al., 2015).

Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis Tren Musiman Tinggi Gelombang Signifikan di Laut Indonesia selama 41 tahun (1980 – 2020) berdasarkan data *ERA-5 Reanalysis ECMWF*, karena kondisi Perairan Indonesia dipengaruhi angin musim (musim Barat dan Musim Tenggara) yang berinteraksi dengan *El Niño-Southern Oscillation (ENSO)* dan *Indian Ocean Dipole Mode (IODM)*, sehingga perlu dilakukan analisis terhadap kondisi Perairan pada setiap musimnya. Musim – musim yang dimaksud adalah: Musim Timur (June-July-August), Musim Barat (December-January-February), Musim Peralihan I (Maret-April-Mei) dan Musim Peralihan II (September-Oktober-November). Analisis kecenderungan ketinggian gelombang signifikan musiman menggunakan *Mann-Kendall Test* dan *estimasi Sen's Slope* yang telah secara luas digunakan untuk melakukan analisis tren dari data meteorologi seperti gelombang, curah hujan dan kondisi cuaca (Lang et al., 2019, De Leo et al., 2020, Alemu & Dioha, 2020, Gocic & Trajkovic, 2013; Cabral, 2020; Patra, 2020; Webb, 2018; Christian, 2023). Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai gambaran kondisi gelombang di perairan Indonesia sehingga nantinya dapat digunakan untuk memprediksi gelombang musiman untuk memitigasi keselamatan pelayaran dan berguna dalam mengurangi dampak buruk perubahan iklim di pesisir.

METODE PENELITIAN

Area Studi dan Pengumpulan Data

Lokasi penelitian ini adalah perairan laut Indonesia, dimana peneliti memilih beberapa titik pengamatan yang mewakili perairan di Indonesia dan alur pelayaran Indonesia (ALKI) dan kemudian diuji tren gelombang signifikannya. Adapun lokasi titik pengambilan data secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 1 dan Gambar 1.



Gambar 1. Peta Titik Observasi Data Pada Area Studi

Tabel 1. Koordinat Titik Observasi

Kode	Nama	Long	Lat
Loc 1	Barat Sumatera (Samudera Hindia)	97.25E	-2.125S
Loc 2	Selatan Sumatera (Samudera Hindia)	105.125E	-8.25S
Loc 3	Selatan Pulau Jawa (Samudera Hindia)	109.625E	-9.5S
Loc 4	Selatan Lombok (Samudera Hindia)	115.5E	10.0S
Loc 5	Selat Karimata	106.625E	0.625S
Loc 6	Utara Pulau Jawa (Selat Jawa)	111.25E	-5.875
Loc 7	Utara Pulau Masalembu (Selat Jawa)	115.625E	-6.25S
Loc 8	Selat Makassar	117.5E	-2.5S
Loc 9	Utara Sulawesi (Samudera Pasifik)	122.375E	2.5N
Loc 10	Laut Banda	129.5E	-6.0S
Loc 11	Selatan Papua	135.25E	-9.0S
Loc 12	Utara Papua (Samudera Pasifik)	138.75E	0.75N

Data pengamatan gelombang laut *insitu* di Indonesia masih terbatas titik pengamatannya, sehingga pada studi ini data gelombang signifikan yang digunakan adalah data analisis ulang ERA-5 dari ECMWF (*European Center for Medium-Range Weather Forecasts*) selama 41 tahun dari periode 1980-2020. Data ERA-5 ECMWF merupakan hasil analisis ulang atmosfer ECMWF generasi kelima dari data iklim secara global yang mencakup periode analisis ulang mulai Januari 1950 hingga sekarang yang di produksi oleh *Copernicus Climate Change Service (C3S)* di ECMWF yang digunakan secara luas dikalangan para ilmuwan lingkungan dan meteorologi. Data ERA5 menyediakan data perkiraan per jam dari variabel iklim atmosfer, darat dan laut. Data analisis ulang tersebut mencakup Bumi pada grid 30km dan pada data atmosfer menggunakan 137 level dari permukaan bumi hingga ketinggian 80km. Data ERA5 ini juga meliputi informasi tentang data ketidakpastian pada semua variabel di resolusi spasial dan temporal yang dikurangi.

Metode Statistika

Mann-Kendal Test

Uji tren menggunakan *Mann-Kendall* merupakan alat yang digunakan untuk mengidentifikasi kecenderungan suatu nilai deret waktu dalam satu rangkaian menggunakan uji non-parametrik untuk menentukan sebuah deret waktu memiliki kecenderungan naik atau turun yang monoton. Uji Mann-Kendall non-parametrik sudah umum digunakan untuk penelitian hidrologi, meteorologi, lingkungan dan bidang kelautan untuk menentukan sebuah data hasil pengamatan yang dilakukan secara berkelanjutan memiliki kecenderungan naik atau turun yang monoton. Pengujian untuk mendeteksi tren signifikan dalam deret waktu klimatologi dapat diklasifikasikan sebagai metode parametrik dan non-parametrik. Tes tren parametrik membutuhkan data yang independen dan terdistribusi normal, sedangkan tes tren non-parametrik hanya membutuhkan data yang independen. Dalam studi ini, dua metode non-parametrik (Mann-Kendall dan estimator kemiringan Sen) digunakan untuk mendeteksi tren variabel data tinggi gelombang signifikan di laut Indonesia. Pada langkah penentuan kecenderungan menggunakan uji hipotesis, dimana Hipotesis nol (H_0) menunjukkan tidak ada kecenderungan dalam data deret waktu tersebut sehingga data yang berasal dari populasi independen terdistribusi secara identik. Sedangkan Hipotesis alternatif (H_a), memperlihatkan bahwa data deret waktu yang diuji mengikuti tren monoton (yaitu tren negatif, tidak nol, atau positif) berdasarkan variabel Pvalue, yang didefinisikan sebagai tingkat signifikansi kecenderungan yang diamati untuk hipotesis uji. Langkah selanjutnya, Nilai P dibandingkan dengan tingkat signifikansi, dimana digunakan sebagai nilai ambang batas, untuk menolak hipotesis (jika nilai $P < \alpha$) atau menerima hipotesis (jika nilai $P > \alpha$) hipotesis nol. *Time series* $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ menunjukkan n jumlah data poin. Uji Mann-Kendall (S) dapat dituliskan sebagai berikut :

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \operatorname{sgn}(X_j - X_i) \quad (1)$$

dimana

$$\operatorname{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & \text{if } x > 0 \\ 0 & \text{if } x = 0 \\ -1 & \text{if } x < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Dapat dilihat bahwa jika nilai $S > 0$, maka pengamatan selanjutnya dalam deret waktu cenderung lebih besar daripada yang muncul sebelumnya pada deret waktu maka merupakan indikator bahwa sebuah tren yang meningkat, sedangkan sebaliknya berlaku jika $S < 0$ maka ini memperlihatkan sebuah tren menurun. Vaian (S) dapat dihitung melalui persamaan (3) berikut.

$$\operatorname{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^m t_i(t_i-1)(2t_i+5)}{18} \quad (3)$$

di mana n adalah jumlah titik data, m adalah jumlah grup terikat dan t_i menunjukkan jumlah ikatan sejauh i . Grup terikat adalah sekumpulan data sampel yang memiliki nilai yang sama. Dalam kasus di mana ukuran sampel $n > 10$, statistik uji normal standar Z_S dihitung menggunakan Persamaan. (4):

$$Z_S = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}}, & \text{if } S > 0 \\ 0, & \text{if } S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\operatorname{Var}(S)}}, & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

Apabila sebuah nilai dari Z_S bernilai positif maka itu menunjukkan tren yang meningkat sedangkan jika nilai Z_S menunjukkan nilai negatif menunjukkan bahwa tren menurun. Pada pengujian sebuah tren, pengujian dilakukan hingga pada tingkat signifikansi tertentu, dimana jika nilai $|Z_S| > Z_{1-\alpha/2}$, maka hipotesis nol ditolak dan tren dinyatakan data deret waktu memiliki tren yang signifikan dan nilai $Z_{1-\alpha/2}$ diambil dari tabel distribusi normal standar. Pada penelitian ini, nilai taraf signifikansi yang digunakan adalah 0.05, sehingga pada tingkat signifikansi 5%, sehingga jika nilai $|Z_S| > 1.96$ maka hipotesis nol atau tidak ada tren ditolak.

Sen's slope estimator

Sen's slope estimator merupakan tes non-parametrik lain yang dapat digunakan untuk mengidentifikasi tren dalam sebuah rangkaian data deret waktu serta menunjukkan seberapa besarnya tren dari data deret waktu tersebut. Pada Perkiraan slop Sen setidaknya membutuhkan 10 data dalam sebuah data deret waktu. Tes dapat menghitung sebuah kemiringan atau laju perubahan linier dan intersep menggunakan metode Sen (Sen 1968).

$$Q_i = \frac{X_j - X_k}{j - k} \quad (5)$$

Dimana X_j dan X_k adalah nilai data pada j and k ($j > k$). Kemiringan diperkirakan pada setiap pengamatan dan intersep yang sesuai, juga merupakan data median dari semua intersep. Nilai Median dihitung dari N pengamatan kemiringan untuk Sen's Slope estimator (Persamaan 6):

$$Q = \begin{cases} Q \frac{N + 1}{2} ; \text{jika } N \text{ bilangan ganjil} \\ \frac{1}{2} \left(Q \frac{N}{2} + Q \frac{N + 1}{2} \right) ; \text{jika } N \text{ bilangan genap} \end{cases} \quad (6)$$

di mana N adalah pengamatan Kemiringan dan n adalah nilai Xk dalam data deret waktu. Sen’s slope estimator dihitung sebagai Qmed = (N+1)/2 ketika pengamatan N Kemiringan ditampilkan sebagai Ganjil, dan apabila pengamatan pada Kemiringan genap, taksiran Kemiringan sebagai Qmed = [(N/2) + ((N + 1) /2)]/2. Pada Uji dua sisi dilakukan pada 100(1-x) % dari nilai selang kepercayaan untuk mendapatkan nilai kemiringan sebenarnya untuk uji non-parametrik pada deret tersebut. Apabila hasil nilai Kemiringan positif Qi maka itu menunjukkan tren meningkat/naik sedangkan nilai kemiringan negatif Qi maka sebaliknya, yaitu menunjukkan tren menurun/turun.

HASIL PEMBAHASAN

Indonesia yang terletak di antara dua samudera, Samudera Pasific dan Samudera Hindia menyebabkan fenomena iklim sangat dipengaruhi adanya fenomena *Indian Ocean Dipole* (IOD) dan ENSO (*El Niño-Southern Oscillation*). Fenomena ENSO di Indonesia biasa terjadi antara 2–7 tahun sekali, disebabkan kondisi perairan Samudera Pasifik mengalami peningkatan suhu dan kelembaban pada atmosfer yang berada di atas perairannya menjadikan pembentukan awan sehingga curah hujan meningkat pada kawasan tersebut. Hal ini membuat Bagian Barat Samudera Pasifik mengalami peningkatan tekanan udara dan terhambatnya pertumbuhan awan. Fenomena tersebut berakibat beberapa wilayah di Indonesia terjadi musim kering berkepanjangan akibat dari penurunan curah hujan jauh dari normalnya yang dikenal dengan El Nino. Kondisi sebaliknya terjadi lapisan termoklin pada bagian tengah dan Timur Samudera Pasifik, menjadikan suhu wilayah perairan Indonesia lebih hangat dari keadaan normal yang berakibat pertumbuhan awan dan peningkatan curah hujan di sebagian besar wilayah Indonesia, yang biasa disebut La Nina. Sedangkan fenomena IOD merupakan fenomena menghangatnya suhu air permukaan laut yang tak teratur di Wilayah Barat Samudera Hindia (di fase positifnya) sehingga mengakibatkan kondisi perairan Wilayah Timur Samudera Hindia lebih dingin pada fase negatifnya (Bramawanto & Abida, 2017). Kedua fenomena perubahan iklim laut yang terjadi secara musiman tersebut, secara tidak langsung mempengaruhi kondisi tinggi gelombang signifikan di wilayah Perairan Indonesia, baik pada Musim Barat, Musim Timur atau Peralihan dari keduanya.

Berdasarkan data ERA-5 ECMWF, hasil uji tren tinggi gelombang signifikan musiman di laut Indonesia pada dari tahun 1980 sampai 2020 dengan tingkat kepercayaan 95% (α=0.05) secara keseluruhan tersaji pada Tabel 2 sampai Tabel 5. Pada Tabel 2, ketika Musim Barat diperiode Desember, Januari dan Februari, pada lokasi Selat Karimata (E), Laut Utara Jawa (F), Laut Utara Pulau Masalembu (G), Selat Makassar (H), Laut Banda (J) dan Selatan Papua (K) tidak mengalami kenaikan tren gelombang tinggi signifikan. Tren tinggi gelombang signifikan pada musim ini tertinggi pada Selatan Pulau Jawa (Samudera India) dengan tren kenaikan tinggi gelombang signifikan 1.72 cm/tahun.

Tabel 2. Hasil Uji Trend Pada Titik Lokasi Observasi Pada Musim Barat (Desember-Januari-Februari)

Code	Name	S	Var(S)	Zs	α (0.05)	Tau	Slope	Trend (cm/yr)	Trend	Significance
A	West Sumatera	298	7344.67	3.47	1.96	0.382	0.0057	1.07	Increasing	Significant
B	South of Sumatera	252	7351.33	2.93	1.96	0.323	0.0047	1.30	Increasing	Significant
C	South of Java	180	7350.67	2.09	1.96	0.231	0.0047	1.72	Increasing	Significant
D	South of Lombok	184	7353.33	2.13	1.96	0.236	0.0049	1.46	Increasing	Significant
E	Karimata Strait	154	7330.00	1.79	1.96	0.197	0.0024	0.96	No trend	Not Significant
F	Nothr of Central of Java	-17	7357.00	-0.19	1.96	-0.022	-0.0004	1.64	No trend	Not Significant
G	North of Masalembu Island	29	7355.67	0.33	1.96	0.037	0.0006	1.53	No trend	Not Significant
H	Makassar Strait	88	7194.00	1.03	1.96	0.113	0.0004	0.31	No Trend	Not Significant
I	North of Sulawesi	177	7326.33	2.06	1.96	0.227	0.0023	0.78	Increasing	Significant
J	Banda Sea	-4	7338.67	-0.04	1.96	-0.005	0.0000	2.32	No trend	Not Significant
K	South of Papua	145	357.00	1.68	1.96	0.186	0.0040	2.32	No trend	Not Significant
L	North of Papua	354	7342.67	4.12	1.96	0.454	0.0063	1.15	Increasing	Significant

Pada periode musim transisi (

Tabel 3), Maret, April, Mei, wilayah Indonesia yang tidak mengalami trend kenaikan gelombang signifikan adalah Laut Utara Jawa Tengah (F), Laut Utara Pulau Masalembu (G), Selat Makassar (H), Utara Pulau Sulawesi (I), Laut Banda (J) dan Selatan Papua (K). Pada laut Selatan pulau Jawa (samudera hindia) (C) mengalami kenaikan tren gelombang signifikan dengan tren sebesar 1.17cm/tahun.

Tabel 3. Hasil Uji Trend Pada Titik Lokasi Observasi Pada Musim Peralihan (Maret-April-Mei)

Code	Name	S	Var(S)	Zs	α (0.05)	Tau	Slope	Trend (cm/yr)	Trend	Significance
A	West Sumatera	252	7896.67	2.82	1.96	0.3073	0.0045	0.90	Increasing	Significant
B	South of Sumatera	295	7903.67	3.31	1.96	0.3598	0.0056	1.05	Increasing	Significant
C	South of Java	295	7909.67	3.31	1.96	0.3598	0.0050	1.37	Increasing	Significant
D	South of Lombok	221	7894.33	2.48	1.96	0.2695	0.0035	1.17	Increasing	Significant
E	Karimata Strait	240	7830.67	2.70	1.96	0.2927	0.0013	0.43	Increasing	Significant
F	Nothr of Central of Java	79	7885.67	0.88	1.96	0.0963	0.0011	0.70	No trend	Not significant
G	North of Masalembu Island	44	895.33	0.48	1.96	0.0537	0.0007	0.70	No trend	Not significant
H	Makassar Strait	46	7796.00	0.51	1.96	0.0561	0.0000	0.36	No trend	Not significant
I	North of Sulawesi	-67	7853.00	-0.74	1.96	-0.0817	-0.0006	1.06	No trend	Not significant
J	Banda Sea	175	7907.67	1.96	1.96	0.2314	0.0025	1.61	No trend	Not significant
K	South of Papua	169	7889.67	1.89	1.96	0.2061	0.0029	1.37	No trend	Not significant
L	North of Papua	224	7827.67	2.51	1.96	0.2732	0.0033	0.88	Increasing	Significant

Tabel 4 memperlihatkan hasil uji *Mann-Kendal dan Sen's Slope* pada Musim Timur (Jun1, Juli, Agustus). Pada Musim Timur dibagian tengah wilayah Indonesia, Laut Selatan Jawa (C), Laut Selatan Lombok (D), Selat Karimata (E), Lau Utara Jawa Tengah (F), Laut Utara Pulau Masalembu (G) dan Selat Makassar (H) tidak mengalami trend kenaikan gelombang signifikan, selain itu mengalami kenaikan tren tinggi gelombang secara signifikan. Tren kenaikan secara signifikan pada tinggi gelombang signifikan terjadi di daerah Barat Sumatera (1.39 cm/tahun).

Tabel 4. Hasil Uji Trend Pada Titik Lokasi Observasi Pada Musim Timur (Juni-Juli-Agustus)

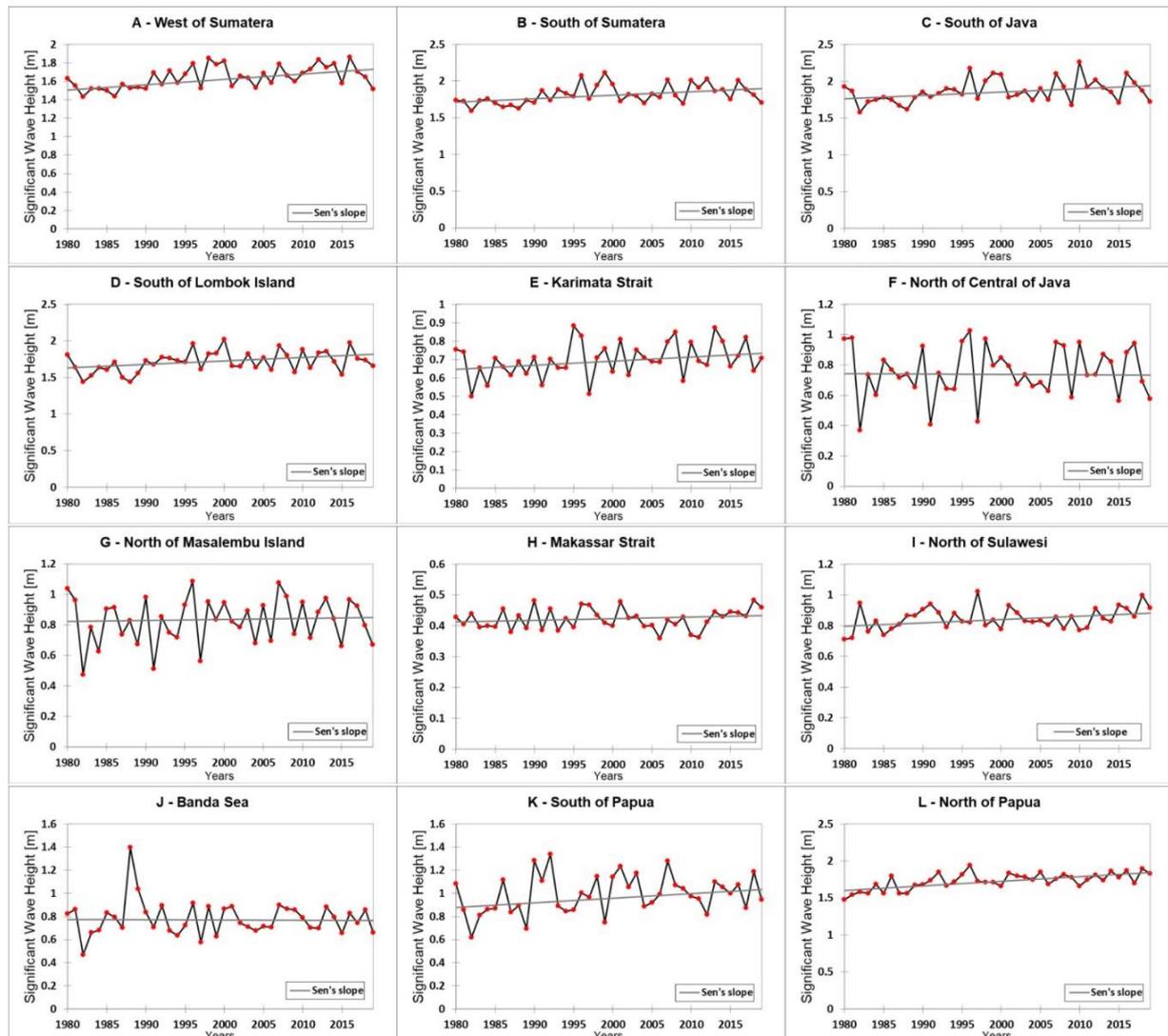
Code	Name	S	Var(S)	Zs	α (0.05)	Tau	Slope	Trend (cm/yr)	Trend	Significance
A	West Sumatera	196	7906.00	2.19	1.96	0.239	0.0038	1.19	Increasing	Significant
B	South of Sumatera	197	7907.67	2.20	1.96	0.240	0.0033	1.39	Increasing	Significant
C	South of Java	54	7887.33	0.60	1.96	0.066	0.0010	1.38	No trend	Not Significant
D	South of Lombok	11	7907.67	0.11	1.96	0.013	0.0000	1.40	No trend	Not Significant
E	Karimata Strait	163	7906.33	1.82	1.96	0.199	0.0031	1.33	No trend	Not Significant
F	Nothr of Central of Java	130	7903.33	1.45	1.96	0.159	0.0025	1.22	No trend	Not Significant
G	North of Masalembu Island	103	7885.67	1.15	1.96	0.126	0.0014	0.94	No trend	Not Significant
H	Makassar Strait	159	7907.67	1.78	1.96	0.194	0.0025	1.03	No trend	Not Significant
I	North of Sulawesi	246	7800.00	2.77	1.96	0.300	0.0020	0.60	Increasing	Significant
J	Banda Sea	296	7902.00	3.32	1.96	0.361	0.0054	1.38	Increasing	Significant
K	South of Papua	264	7902.00	2.96	1.96	0.322	0.0047	1.31	Increasing	Significant
L	North of Papua	192	7909.33	2.15	1.96	0.234	0.0036	1.16	Increasing	Significant

Pada Musim Peralihan (September-Oktober-November), pada daerah laut Selatan Lombok (D), Laut Utara Pulau Jawa (F) and Laut Utara Ulu Masalembu (G) tidak mengalami trend kenaikan tinggi gelombang signifikan dan selain itu menunjukkan adanya trend kenaikan tinggi gelombang signifikan. Tren kenaikan gelombang signifikan tertinggi di lokasi laut banda dengan nilai tren sebesar 1.7 cm/tahun (Tabel 5).

Tabel 5. Hasil Uji Trend Pada Titik Lokasi Observasi Pada Musim Peralihan (September-Oktober-November)

Code	Name	S	Var(S)	Zs	α (0.05)	Tau	Slope	Trend (cm/yr)	Trend	Significance
A	West Sumatera	329	7901.00	3.69	1.96	0.4012	0.0050	0.96	Increasing	Significant
B	South of Sumatera	263	7893.00	2.95	1.96	0.3207	0.0040	1.12	Increasing	Significant
C	South of Java	229	7908.33	2.56	1.96	0.2793	0.0033	1.02	Increasing	Significant
D	South of Lombok	138	7871.33	1.54	1.96	0.1683	0.0018	0.83	No trend	Not Significant
E	Karimata Strait	218	7871.33	2.45	1.96	0.2659	0.0018	0.50	Increasing	Significant
F	Nothr of Central of Java	147	7889.67	1.64	1.96	0.1793	0.0018	1.01	No trend	Not Significant
G	North of Masalembu Island	171	7896.33	1.91	1.96	0.2085	0.0022	0.89	No trend	Not Significant
H	Makassar Strait	188	7835.33	2.11	1.96	0.2293	0.0016	0.62	Increasing	Significant
I	North of Sulawesi	179	7863.67	2.01	1.96	0.2183	0.0014	0.47	Increasing	Significant
J	Banda Sea	216	7887.33	2.42	1.96	0.2634	0.0020	1.70	Increasing	Significant
K	South of Papua	303	7898.33	3.40	1.96	0.3695	0.0042	0.96	Increasing	Significant
L	North of Papua	178	7893.33	1.99	1.96	0.2171	0.0041	1.26	Increasing	Significant

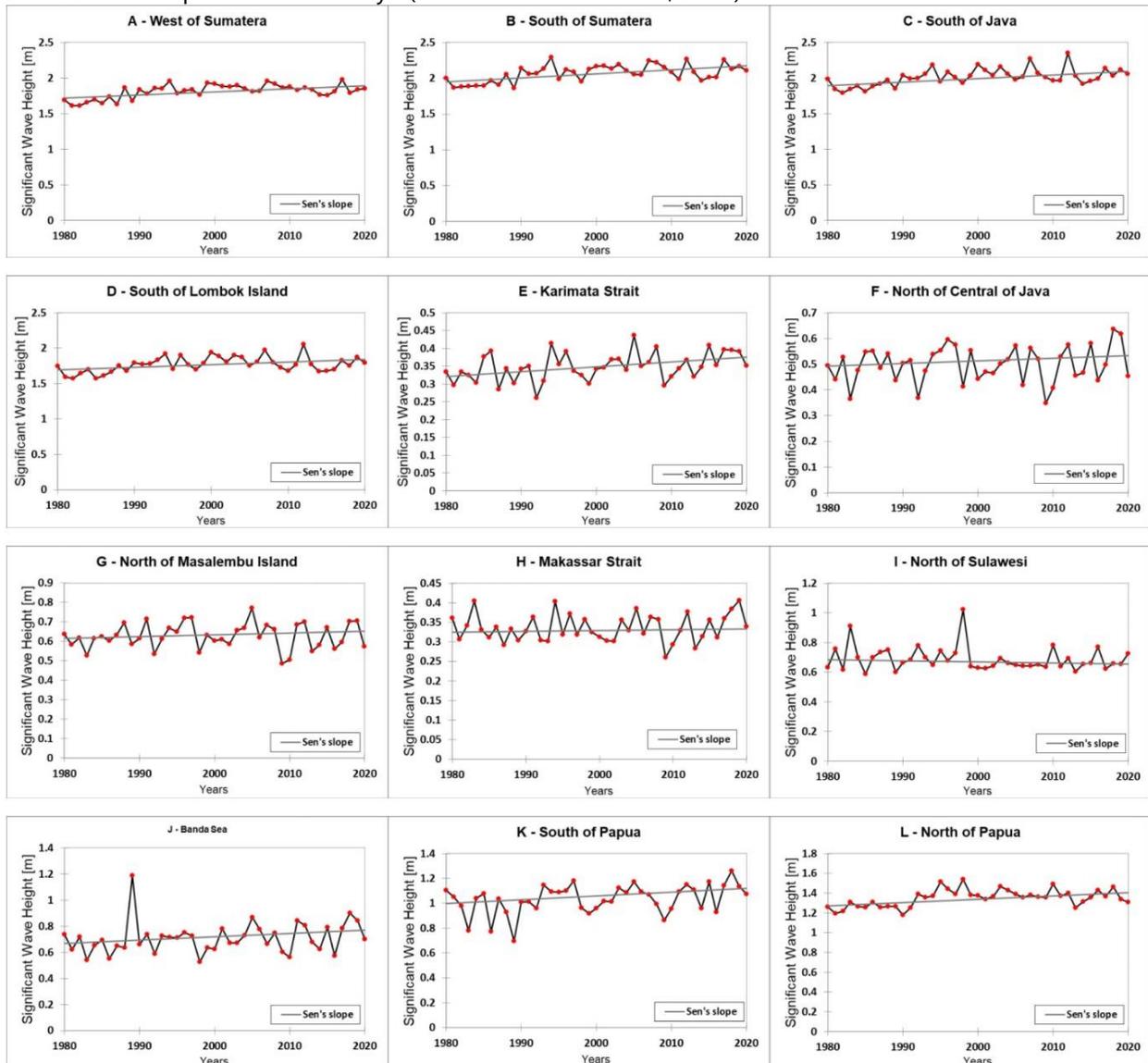
Komponen durasi dan persistensi arah angin juga mempengaruhi kondisi gelombang laut. Semakin panjang dan seragam angin yang terjadi di suatu daerah perairan, maka gelombang yang akan terjadi juga semakin besar. Hal ini dapat terjadi karena ketika angin searah, energi yang dihasilkan oleh angin akan terkumpul dan menimbulkan gelombang yang saling menguatkan yang terjadi pada DJF dan JJA. Kondisi berbeda terjadi pada musim pancaroba (MAM dan SON). Angin tidak memiliki arah yang konsisten dan saling melemahkan. Kondisi ini membuat rata-rata tinggi gelombang di perairan Indonesia umumnya lebih rendah dibandingkan dengan kondisi tinggi gelombang pada monsun Australia dan monsun Asia. Penelitian lain juga menunjukkan rata-rata tinggi gelombang di Laut Jawa pada bulan Februari dan Agustus memiliki gelombang yang lebih tinggi dibandingkan bulan Mei (Kurniawan et al., 2011, Kurniawan & Khotimah, 2015, Fahrudin Rais & Yunita, 2016, Fadlan et al., 2017).



Gambar 2. Analisis tren Tinggi Gelombang Signifikan (SWH) pada Bulan Desember – Januari – Februari untuk periode 1980-2020

Selat Karimata yang terhubung dengan Laut Cina Selatan (Selatan Laut Cina Selatan) pada periode Desember-Januari-Februari tidak mengalami kenaikan tren tinggi gelombang signifikan, dimana tinggi gelombang pada tahun 2000 – 2010 mencapai 0.85 meter. Hal ini secara tidak langsung disebabkan pada Monsun Asia (Desember-Januari-Februari), Tinggi gelombang signifikan di Laut Cina Selatan sebesar 1-2,5 m dan semakin ke Selatan nilainya menurun menjadi 1,5-2 m di sebelah Utara Kepulauan Natuna.

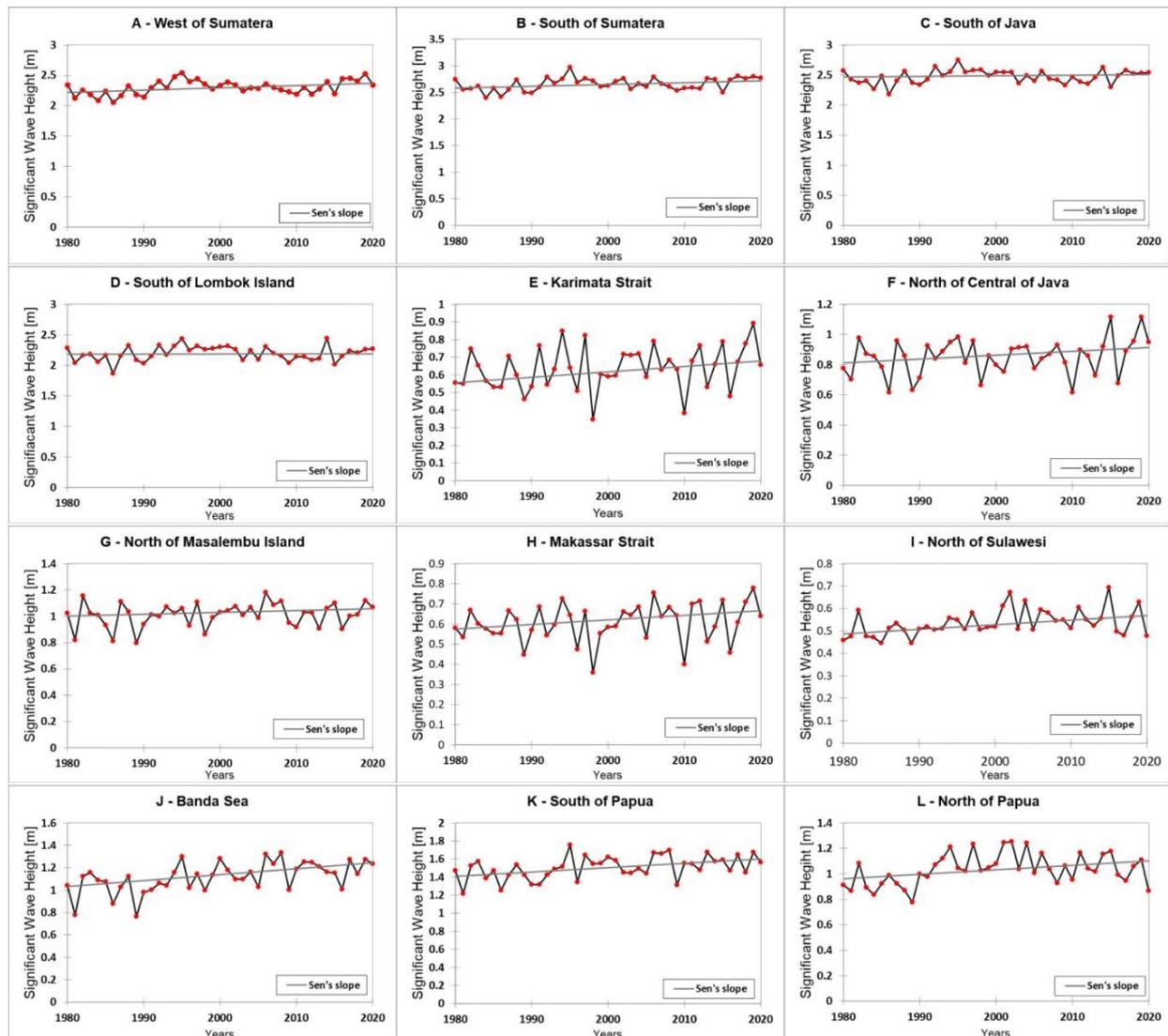
Memasuki perairan Natuna bagian Selatan, tinggi gelombang signifikan cenderung menurun menjadi 1-1,5 m dan berkurang ketika memasuki perairan Selat Karimata berdasarkan dari data NCEP-NOAA tahun 2000-2010 oleh peneliti sebelumnya (Kurniawan & Khotimah, 2015).



Gambar 3. Analisis tren Tinggi Gelombang Signifikan (SWH) pada Bulan Maret – April - Mei untuk periode 1980-2020

Sedangkan pada Periode Musim Peralihan, Maret-April-Mei (MAM), berdasarkan data ERA-5 tahun 1991-2015 gelombang di Perairan Selat Karimata maksimal mencapai 0.45 meter (Gambar 3). Hal tersebut sejalan dengan kondisi tinggi gelombang signifikan di Laut Cina Selatan menunjukkan penurunan tinggi gelombang hanya sebesar 0,5-1 meter yang menuru dibandingkan Periode Desember-Januari-Februari. Sedangkan di Samudra Pasifik bagian Barat tingginya 0,5-2 meter, yang sebelumnya mencapai 3 meter berdasarkan model WAVEWATCH-III pada jangka waktu 1991-2015 dengan time step tiga jam (Habibi et al., 2018). Sedangkan Monsun Australia, Periode Musim Peralihan Bulan Juni-Juli-Agustus (JJA), Data Era 5 Tahun 1991-2015 menunjukkan tinggi gelombang bagian Selatan wilayah Indonesia mengalami kondisi gelombang signifikan berkisar 2-2.5 meter, disebabkan kondisi pergerakan angin monsun dari Benua Australia menuju Benua Asia yang konsisten sehingga berpengaruh terhadap meningkatnya tinggi gelombang signifikan di Samudra Hindia, Selatan Jawa, Bali, dan NTB. Hal tersebut sejalan dengan luaran model WAVEWATCH-III dimana daerah tersebut memiliki tinggi gelombang sebesar 2-3,5 m. Pada Tinggi

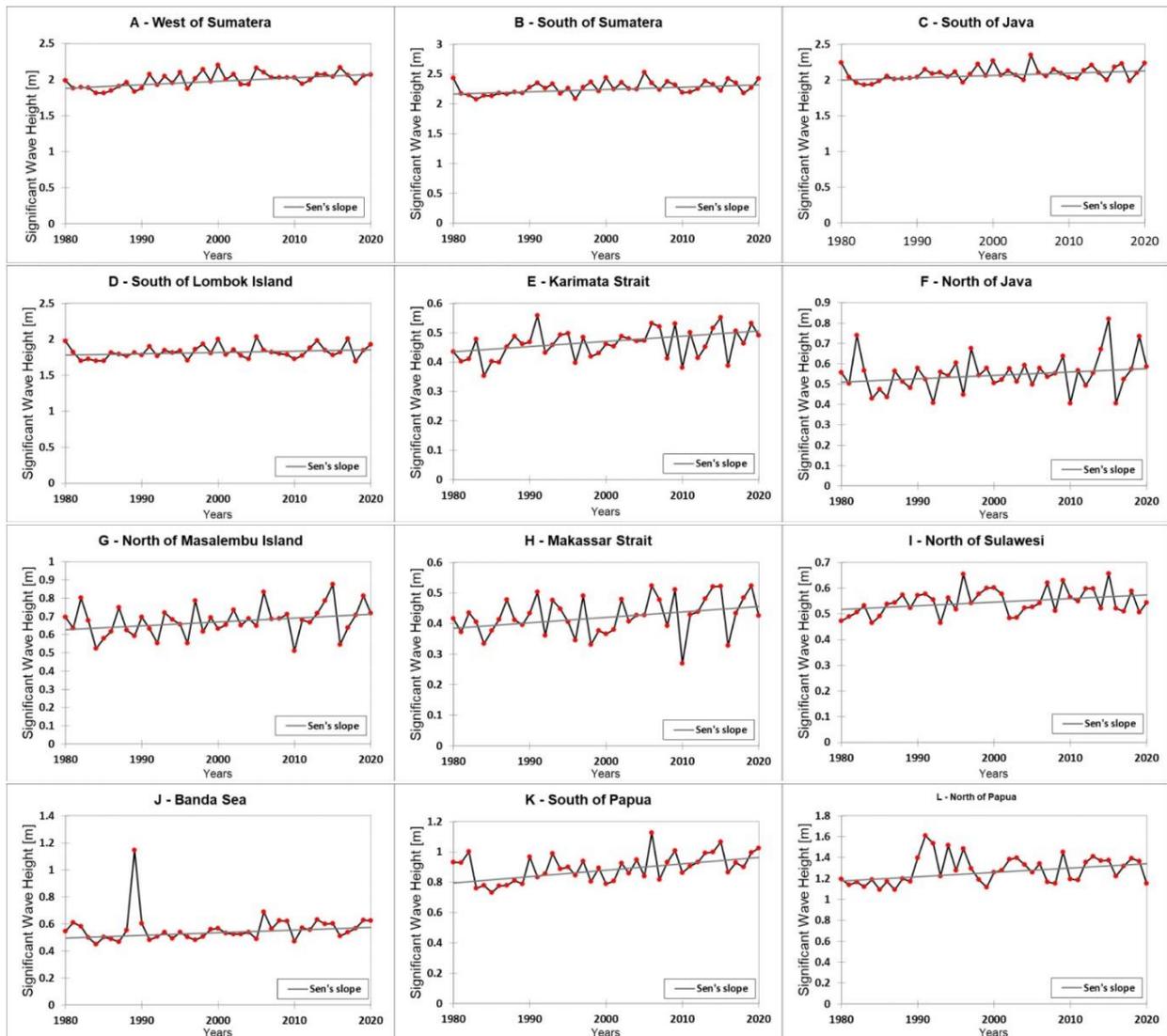
signifikan di Laut Jawa mencapai 0,5-1 meter yang membentang dari Masalembo sampai Selat Karimata baik luaran dari model WAVEWATCH-III maupun Data ERA-5 (Gambar (Habibi et al., 2018).



Gambar 4. Analisis tren Tinggi Gelombang Signifikan (SWH) pada Bulan Juni – Juli – Agustus untuk periode 1980-2020

Pada Wilayah Perairan Utara dari Sulawesi musim peralihan Periode MAM dan SON, Data Era-5 menunjukkan data tinggi gelombang signifikan lebih kecil dari pada Musim Barat (DJF) dan Musim Timur (JJA), dimana tinggi gelombang maksimal pada titik pengambilan data pada penelitian ini maksimal tinggi gelombang pada periode Peralihan berkisar 0,4-1,02 meter. Pada penelitian dengan menggunakan data *model Windwave-05*, menunjukkan tinggi gelombang signifikan pada daerah laut Sekitar Sulawesi Utara (Perairan Manado-Bitung, Teluk Tomini) berkisar 0.75 m (Fadlan et al., 2017).

Fenomena El Nino di Indonesia terjadi sebanyak 9 kali kejadian, sedangkan LaNina sebanyak 8 kali kejadian dari tahun 1991-2017, dimana dua fenomena El Nino super terjadi pada bulan Oktober 1997 sampai Februari 1998 dan Oktober 2015 sampai Maret 2016 berpengaruh pada tinggi gelombang signifikan, seperti yang terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Analisis tren Tinggi Gelombang Signifikan (SWH) pada Bulan September – Oktober – November untuk periode 1980-2020

Berdasarkan hasil luaran model gelombang Wavewatch III (WW3) dengan resolusi $0,125^\circ \times 0,125^\circ$ pada periode tahun 1991-2016 menggambarkan penurunan tinggi gelombang signifikan terbesar terjadi di perairan Selatan Kalimantan dan Laut Jawa bagian Timur dengan rasio perbandingan mencapai 40%-50% pada periode DJF. Pada Laut Jawa bagian Barat dan tengah, tinggi gelombang signifikan mengalami penurunan sebesar 30%-40%. Sedangkan pada Selat Sunda, pengaruh El Niño super mampu menurunkan tinggi gelombang signifikan sampai 40%. Adapun arah gelombang signifikan tidak banyak mengalami perubahan saat El Niño super (Rais, 2019). Kondisi iklim gelombang laut akibat dari adanya perubahan iklim sangat mempengaruhi infrastruktur fasilitas pelabuhan dan pantai. Pada kasus pelabuhan, peningkatan tinggi gelombang signifikan menyebabkan pengelola (Otoritas Pelabuhan) harus berinvestasi besar untuk memperkuat fasilitas pemecah gelombang, sebab peningkatan muka air berhubungan dengan ketidakstabilan struktur dan juga debit limpasan, sehingga Otoritas Pelabuhan perlu meningkatkan freeboard untuk tetap menjaga debit limpasan pada pemecah gelombang. Kemungkinan konsekuensi lain dari perubahan kondisi iklim gelombang (khususnya, arah gelombang dan tinggi gelombang) adalah perlu untuk merancang kembali struktur baru atau struktur yang Tangguh dalam menghadapi ketidakstabilan, limpasan dan gerusan dari perubahan kondisi iklim gelombang laut yang baru. Semua upaya dalam menjaga keamanan fasilitas pelabuhan tersebut tentu saja akan memerlukan biaya yang cukup besar.

Sehingga kedepannya, perlu adanya penilaian secara terpadu dalam menilai dampak-dampak dan risiko akibat perubahan iklim dalam upaya penanganan wilayah pesisir (Sierra & Casas-Prat, 2014; Abdillah, 2025; Hemer, 2018).

KESIMPULAN

Penelitian ini melakukan identifikasi tren tinggi gelombang signifikan musiman di wilayah laut Indonesia menggunakan Data ERA-5 dari ECMWF. Hasil penelitian menunjukkan wilayah perairan Barat Sumatera, Sumatera bagian Selatan dan Papua bagian Utara mengalami tren kenaikan tinggi gelombang secara signifikan disemua musim dengan kenaikan maksimal sebesar 1,39 cm/tahun. Pada perairan Utara Jawa Tengah dan Utara Pulau Masalembu tidak mengalami tren kenaikan tinggi gelombang signifikan untuk semua musim. Pada musim Timur (JJA) dan musim peralihan (SON), wilayah laut Banda dan Papua bagian Selatan mengalami tren kenaikan tinggi gelombang signifikan maksimal sebesar 1,70 cm/tahun. Sedangkan pada wilayah perairan Selatan pulau Lombok, tren kenaikan tinggi gelombang signifikan terjadi pada Musim Barat (DJF) dan Musim Peralihan (MAM) dengan kenaikan maksimal sebesar 1,46 cm/tahun. Kenaikan tinggi gelombang signifikan di wilayah perairan Selatan Pulau Jawa pada musim Barat (DJF) sebesar 1,72 cm/tahun.

DAFTAR PUSTAKA

- Alemu, Z. A., & Dioha, M. O. (2020). Climate change and trend analysis of temperature: the case of Addis Ababa , Ethiopia. *Environmental Systems Research*, 9(27), 1–15. <https://doi.org/10.1186/s40068-020-00190-5>
- Abdillah, A., Widianingsih, I., & Buchari, R. A. (2025). Adapting to climate change and multi-risk governance: Toward sustainable adaptation and enhancing urban resilience—Indonesia. *Discover Applied Sciences*, 7, 81. <https://doi.org/10.1007/s42452-025-06491-7>
- Bramawanto, R., & Abida, R. F. (2017). The Climatology Aspect Review (Enso And Iod) Against The Production Of Salt In Indonesia. *Jurnal Kelautan Nasional*, 12(2), 91–99.
- Cabral, I. S., Young, I. R., & Toffoli, A. (2020). Long-term and seasonal variability of wind and wave extremes in the Arctic Ocean. *ArXiv Preprint*.
- Christian, J. R., & Mori, N. (2023). Climate-induced decadal ocean wave height variability. *Journal of Geophysical Research: Oceans*.
- De Leo, F., De Leo, A., Besio, G., & Briganti, R. (2020). Detection and quantification of trends in time series of significant wave heights: An application in the Mediterranean Sea. *Ocean Engineering*, 202(February), 107155. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2020.107155>
- Fadlan, A., Aror, R. D., Sugianto, D. N., & Zainuri, M. (2017). Monthly Variation Characteristics of Wave Height In North Sulawesi. *Waste Technology*, 5(April), 21–26.
- Fahruddin Rais, A., & Yunita, R. (2016). Profil Musiman Gelombang Laut di Laut Sulawesi. *Jurnal Riset Dan Kajian Pendidikan Fisika*, 3(1), 1. <https://doi.org/10.12928/jrkpf.v3i1.4537>
- Gocic, M., & Trajkovic, S. (2013). Analysis of changes in meteorological variables using Mann-Kendall and Sen ' s slope estimator statistical tests in Serbia. *Global and Planetary Change*, 100, 172–182. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.10.014>
- Habibi, M. N., Fitria, W., & Sofian, I. (2018). Kajian Indeks Variabilitas Tinggi Gelombang Signifikan Di Indonesia. *Jurnal Segara*, 14(3), 159–168.
- Handoko, E. Y., Yuwono, & Ariani, R. (2019). Analisis Kenaikan Muka Air Laut Indonesia Tahun 1993–2018 Menggunakan Data. *Journal of Geodesy and Geomatics*, 15(1), 58–64.
- Hemer, M. A., Fan, Y., Mori, N., Semedo, A., & Trenham, C. E. (2018). A recent increase in global wave power

- as a consequence of ocean warming. *Nature Communications*, 9, 205-216. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08066-0>
- Imura, N. M. (2013). Review Sea-level rise caused by climate change and its implications for society. *Proc. Jpn. Acad.*, 89(7), 281–301.
- Kudryavtseva, N., & Soomere, T. (2017). Satellite altimetry reveals spatial patterns of variations in the Baltic Sea wave climate. *ArXiv Preprint*.
- K. H. Hamed and A. R. Rao, "A modified Mann-Kendall trend test for auto correlated data", *Journal of Hydrology*, no. 204, pp. 182-196, 1998.
- Kurniawan, R., Habibie, M. N., & Suratno, S. (2011). Variasi Bulanan Gelombang Laut Di Indonesia. *Jurnal Meteorologi Dan Geofisika*, 12(3), 221–232. <https://doi.org/10.31172/jmg.v12i3.104>
- Kurniawan, R., & Khotimah, M. K. (2015). Ocean Wave Characteristics in Indonesian Waters for Sea Transportation Safety and Planning. *IPTEK, The Journal for Technology and Science*, 26(1), 19–27.
- Lang, P. E., Carslaw, D. C., & Moller, S. J. (2019). A trend analysis approach for air quality network data. *Atmospheric Environment: X*, 2(March), 100030. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2019.100030>
- M. G. Kendall, "Rank Correlation Methods" in, London, U.K.:Charles Griffin, 1975.
- Mori, N., Yasuda, T., Mase, H., Tom, T., & Oku, Y. (2010). Projection of Extreme Wave Climate Change under Global Warming. *Hydrological Research Letters*, 4(0), 15–19. <https://doi.org/10.3178/hrl.4.15>
- Patra, A., Min, S.-K., & Seong, M.-G. (2020). Climate variability impacts on global extreme wave heights: Seasonal assessment using satellite data and ERA5 reanalysis. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(12), e2020JC016754.
- P. K. Sen, "Estimates of the regression coefficient based on Kendall's tau", *Journal of American Statistical Association*, vol. 39, pp. 1379-1389, 1968.
- Rais, A. F. (2019). Pengaruh ElNino pada Gelombang Signifikan di Perairan Indonesia. *JURNAL FISIKA DAN APLIKASINYA*, 15, 45–49.
- Sierra, J. P., & Casas-Prat, M. (2014). Analysis of potential impacts on coastal areas due to changes in wave conditions. *Climatic Change*, 124(4), 861–876. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1120-5>
- Sierra, J. P., & Casas-Prat, M. (2023). Trends in ocean wave climate within the Mediterranean Sea: A review. *Climate Dynamics*. <https://doi.org/10.1007/s00382-023-06984-4>
- Webb, A., Shimura, T., & Mori, N. (2018). A high-resolution future wave climate projection for the coastal northwestern Atlantic. *ArXiv Preprint*. weadapt.org+15
- Young, I. R., Zieger, S., & Babanin, A. V. (2023). Observed changes in significant wave heights derived from long-term satellite data. *Ocean Science*, 19, 123-138.
- Zikra, M., Suntoyo, & Lukijanto. (2015). Climate Change Impacts on Indonesian Coastal Areas. *Procedia Earth and Planetary Science*, 14, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2015.07.085>

