

## Tren Tinggi Gelombang Laut di Wilayah Pengelolaan Perikanan (WPP) Indonesia Periode 1977–2021 (45 Tahun)

Ainun Azhari\*

Program Magister Sains Kebumihan, FITB, Institut Teknologi Bandung  
E-mail: ainunazhari10@gmail.com

Nining Sari Ningsih

Kelompok Keahlian Oseanografi, FITB, Institut Teknologi Bandung  
E-mail: nsningsih@itb.ac.id

### Abstrak

Pemahaman gelombang laut sangat penting bagi aktivitas maritim, khususnya di negara kepulauan seperti Indonesia. Pada studi ini, tren jangka panjang kecepatan angin dan tinggi gelombang signifikan (*Significant Wave Height/SWH*) di Wilayah Pengelolaan Perikanan (WPP) Indonesia dianalisis selama 1977–2021 (45 tahun) dengan menggunakan data dari *European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) Reanalysis* generasi kelima (*ERA5*). Secara keseluruhan, kecepatan angin dan *SWH* di perairan Indonesia mengalami kenaikan. Rata-rata tren kecepatan angin dan *SWH* di seluruh WPP Indonesia sebesar 0,29 cm/s/tahun dan 0,19 cm/tahun. Tren jangka panjang tinggi gelombang akibat *swell* dan *wind sea* di WPP Indonesia juga mengalami kenaikan, dengan nilai rata-ratanya sebesar 0,18 dan 0,05 cm/tahun. Perairan Indonesia yang mengalami kenaikan tren kecepatan angin dan tinggi gelombang terbesar berada di WPP yang berbatasan langsung dengan laut lepas, seperti di WPP 717 (perairan utara Papua), 572 (perairan barat Sumatra), dan 573 (perairan selatan Jawa). Fenomena *El Niño-Southern Oscillation (ENSO)*, yakni *El Niño (La Niña)* berpengaruh terhadap penurunan (peningkatan) nilai kecepatan angin dan *SWH* rata-rata tahunan di WPP Indonesia, khususnya di WPP yang terletak di perairan Indonesia bagian dalam. Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai langkah awal dalam mitigasi dan adaptasi terhadap perubahan iklim.

**Kata-kata Kunci:** *Significant Wave Height (SWH)*, Wilayah Pengelolaan Perikanan (WPP), Tren Jangka Panjang, *El Niño-Southern Oscillation (ENSO)*

### Abstract

Understanding ocean waves is essential for maritime activities, especially for archipelagic countries such as Indonesia. In this study, the long-term trend of wind speed and *Significant Wave Height (SWH)* in the Indonesia's Fisheries Management Areas (IFMAs) were analyzed during 1977–2021 (45 years) using data from the *European Center for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) fifth generation reanalysis (ERA5)*. The results show an overall wind speed and *SWH* in the Indonesian seas have increased. The average trend of wind speed and *SWH* in all IFMAs were 0.29 cm/s/year and 0.19 cm/year. The long-term trend of wave height due to *swell* and *wind sea* in the IFMAs has also increased, with an average value of 0.18 and 0.05 cm/year. The highest increasing trend of wind speed and wave height were found in IFMAs facing the open ocean, such as IFMAs 717 (Northern Papua waters), 572 (Western Sumatran waters), and 573 (South Java waters). The *El Niño-Southern Oscillation (ENSO)* phenomenon, *El Niño (La Niña)* events affected the decrease (increase) in the annual average of the wind speed and *SWH* values in IFMAs, especially in IFMAs located in the inner seas. The results of this study could be used as an early assessment for mitigation and adaptation to climate change.

**Keywords:** *Significant Wave Height (SWH)*, Indonesia's Fisheries Management Areas (IFMAs), Long-term Trend, *El Niño-Southern Oscillation (ENSO)*.

## 1. Pendahuluan

Berdasarkan laporan Intergovernmental Panel Climate Change (IPCC) tahun 2018, suhu bumi pada akhir tahun 2022 mencapai 1,21 °C dan akan mencapai 1,50 °C pada awal tahun 2035 (IPCC, 2018). Peningkatan suhu bumi berdampak terhadap peningkatan kejadian ekstrem (siklon tropis) (Bhardwaj dan Singh, 2020;

Chand dkk., 2022; Klotzbach, 2006; Pielke dkk., 2005), kecepatan angin, dan tinggi gelombang (Cao dkk., 2021; Semedo dkk., 2011). Pada tahun 1979–2018 (40 tahun), tren kecepatan angin dan tinggi gelombang secara global telah mengalami peningkatan sebesar 0,47 cm/s/tahun dan 0,32 cm/tahun (Zheng dkk., 2022). Pengaruh *swell* terhadap kenaikan tren tinggi gelombang secara global lebih besar daripada

\* Penulis korespondensi: ainunazhari10@gmail.com

pengaruh wind sea, yakni dengan nilai sekitar 0,28 dan 0,13 cm/tahun (Zheng dkk., 2022). Semedo dkk. (2011) telah menganalisis pengaruh tren swell dan wind sea di Samudra Pasifik dan Atlantik bagian utara pada periode Desember–Februari selama 45 tahun (1957–2002). Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui kontribusi perubahan tren swell dan wind sea terhadap perubahan tren tinggi gelombang. Tren swell terhadap kenaikan tren tinggi gelombang di perairan Samudra Pasifik bagian utara merupakan yang tertinggi dengan nilai sekitar 12–14 cm/dekade, sedangkan tren swell di perairan utara Samudra Atlantik sekitar 8–10 cm/dekade (Semedo dkk., 2011). Tren wind sea di Samudra Pasifik bagian utara dan perairan utara Samudra Atlantik sekitar 3–10 cm/dekade (Semedo dkk., 2011).

Beberapa penelitian terkait tren kecepatan angin dan tinggi gelombang dalam skala regional juga telah dilakukan, seperti di Laut Arab, Teluk Benggala, dan Laut China Selatan. Tren kecepatan angin dan tinggi gelombang di Laut Arab telah naik sebesar 4,30 cm/s/tahun dan 0,63 cm/tahun selama 16 tahun (1996–2012) (Hithin dkk., 2015). Hithin dkk. (2015) telah menganalisis pengaruh tren swell dan wind sea terhadap kenaikan tren tinggi gelombang di Laut Arab, yakni sebesar 0,20 dan 2,10 cm/tahun. Tren kecepatan angin dan tinggi gelombang di Teluk Benggala selama periode 1979–2012 (34 tahun) telah mengalami penurunan yakni sekitar -1,01 cm/s/tahun dan -0,01 cm/tahun (Shanas dan Kumar, 2015), sedangkan tren kecepatan angin dan tinggi gelombang di Laut China Selatan mengalami peningkatan sebesar 3,38 cm/s/tahun dan 1,30 cm/tahun selama 24 tahun (1988–2011) (Zheng dkk., 2017).

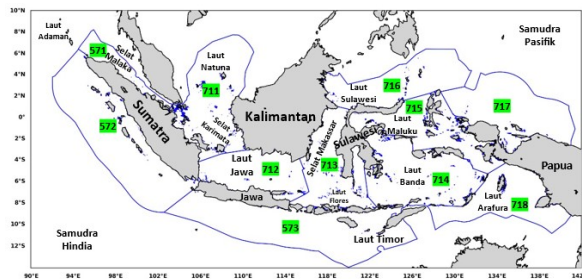
Berdasarkan studi terdahulu yang telah disebutkan, terdapat perubahan tren kecepatan angin dan tinggi gelombang baik secara global maupun regional. Namun, penelitian regional terkait tren kecepatan angin dan tinggi gelombang di wilayah perairan Indonesia belum dikaji lebih lanjut. Indonesia merupakan negara kepulauan yang memiliki potensi sumber daya kelautan yang beragam, seperti transportasi laut, pariwisata hutan bakau dan terumbu karang, minyak dan gas, sumber Energi Baru Terbarukan (EBT), dan perikanan (Brotosusilo dkk., 2016; Kumar dkk., 2019; Kurniawan dan Khotimah, 2015; Ningsih dkk., 2020; Rizal dan Ningsih, 2022; Smith, 2007; Sterl dan Caires, 2005). Pada tahun 2022, potensi perikanan laut Indonesia mencapai 12,01 juta ton yang mencakup kelompok ikan pelagis, ikan karang, ikan demersal, cumi, kepiting, dan lobster (Suman dkk., 2017; <https://kkp.go.id/>). Dalam rangka optimalisasi pengelolaan perikanan, pemerintah Indonesia menetapkan 11 Wilayah Pengelolaan Perikanan (WPP) Negara Republik Indonesia yang bertujuan untuk pengelolaan kegiatan penangkapan ikan, pembudidayaan, konservasi, dan kegiatan pengembangan perikanan lainnya (Peraturan Menteri Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia No.18 Tahun 2014). Pada penelitian ini akan dilakukan analisis tren kecepatan angin dan tinggi gelombang di 11 WPP Indonesia selama periode 45 tahun (1977–2021). Hasil penelitian ini dapat digunakan sebagai salah satu langkah mitigasi serta adaptasi terhadap

cuaca ekstrem dan gelombang tinggi, khususnya di WPP Indonesia dan para pelaku kegiatan kelautan.

## 2. Metodologi

### 2.1 Daerah kajian dan data

Daerah kajian pada penelitian ini berada di perairan Indonesia yang mencakup 11 WPP (**Gambar 1**). Data yang digunakan pada penelitian ini adalah data angin (10m komponen angin dalam arah u dan v), tinggi gelombang signifikan (Significant Wave Height/SWH), swell, dan wind sea selama 45 tahun (1977–2021). Data angin dan gelombang berasal dari European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) Reanalysis generasi kelima (ERA5). Resolusi temporal data angin dan gelombang yang digunakan adalah setiap 1 jam, sedangkan resolusi spasialnya masing-masing adalah 0,25° x 0,25° dan 0,50° x 0,50°. Data angin dan gelombang dapat diakses pada laman Copernicus Climate Change Service (C3S; <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>).



Gambar 1. Daerah kajian yang mencakup 11 WPP Indonesia.

### 2.2 Metodologi

Pada penelitian ini digunakan perhitungan regresi linier untuk menghitung tren jangka panjang kecepatan angin, SWH, swell, dan wind sea 11 WPP Indonesia selama 45 tahun (1977–2021). Data swell dan wind sea digunakan untuk memahami lebih lanjut terkait tren jangka panjang tinggi gelombang akibat pengaruh angin lokal (wind sea) dan penalaran gelombang yang telah keluar dari daerah pembangkitannya (swell). Persamaan regresi linier secara matematis dapat dinyatakan seperti Persamaan 1 (Newbold dkk., 2013).

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \tag{1}$$

$$\beta_0 = \frac{(\sum Y)(\sum X^2) - (\sum X)(\sum XY)}{n(\sum X^2) - (\sum X)^2} \tag{2}$$

$$\beta_1 = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(Y)}{n(\sum X^2) - (\sum X)^2} \tag{3}$$

## 3. Hasil dan Pembahasan

### 3.1 Tren jangka panjang kecepatan angin, SWH, swell, dan wind sea

Secara keseluruhan, tren kecepatan angin, SWH, swell, dan wind sea di seluruh WPP Indonesia mengalami

peningkatan (**Tabel 1**). Rata-rata tren kecepatan angin di WPP Indonesia adalah 0,29 cm/s/tahun dan berkisar dari -0,21 hingga 1,17 cm/s/tahun dengan nilai standar deviasinya adalah 0,35 cm/s/tahun (**Tabel 1**). Tren SWH di seluruh WPP Indonesia berkisar 0,06–0,41 cm/tahun dengan nilai rata-rata dan standar deviasinya masing-masing bernilai 0,19 dan 0,11 cm/tahun (**Tabel 1**).

Untuk pemahaman yang lebih baik terkait tren SWH di perairan Indonesia, maka pada studi ini dilakukan analisis tren swell dan wind sea di 11 WPP Indonesia. Secara global, pengaruh peningkatan swell berkontribusi lebih besar daripada peningkatan wind sea terhadap kenaikan SWH (Cao dkk., 2021; Zheng dkk., 2022). Tren swell di seluruh WPP Indonesia mengalami kenaikan dengan nilai rata-rata 0,18 cm/tahun dan bervariasi dari 0,07–0,37 cm/tahun. Umumnya, tren wind sea di 11 WPP Indonesia mengalami kenaikan dengan nilai rata-rata sebesar 0,05 cm/tahun. Pada penelitian ini diketahui bahwa perubahan tren wind sea di perairan Indonesia jauh lebih kecil daripada tren swell (**Tabel 1**). Hal ini menunjukkan bahwa swell umumnya berkontribusi lebih dominan terhadap kenaikan tren SWH di perairan Indonesia, terutama di perairan yang berbatasan langsung dengan laut lepas (a.l.: WPP 572, 573, dan 717).

Peningkatan kecepatan angin di perairan Indonesia bagian dalam (a.l.: WPP 571 (Selat Malaka), 711 (Laut Natuna), 712 (Laut Jawa), 713 (Selat Makassar), 714 (Laut Banda), 715 (Laut Maluku), 716 (Laut Sulawesi), dan 718 (Laut Arafura)) umumnya bernilai lebih rendah daripada WPP yang berbatasan langsung dengan laut lepas (a.l.: WPP 572, 573 (perairan selatan Jawa), dan 717 (perairan utara Papua)). Tren kecepatan angin di WPP 572, 573, dan 717 juga merupakan nilai tertinggi diantara 11 WPP lainnya, yakni dengan nilai masing-masing sebesar 0,52; 0,53; dan 1,17 cm/s/tahun (**Tabel 1**). Tren wind sea WPP 716 mengalami penurunan sebesar -0,02 cm/tahun (**Tabel 1**), serta tren wind sea WPP 571 dan 711 hampir tidak mengalami perubahan (**Tabel 1**). Perairan Indonesia bagian dalam dan cukup luas memiliki nilai kenaikan tren wind sea yang cukup besar, seperti di WPP 712 (0,06 cm/tahun), 714 (0,10 cm/tahun), dan 718 (0,11 cm/tahun).

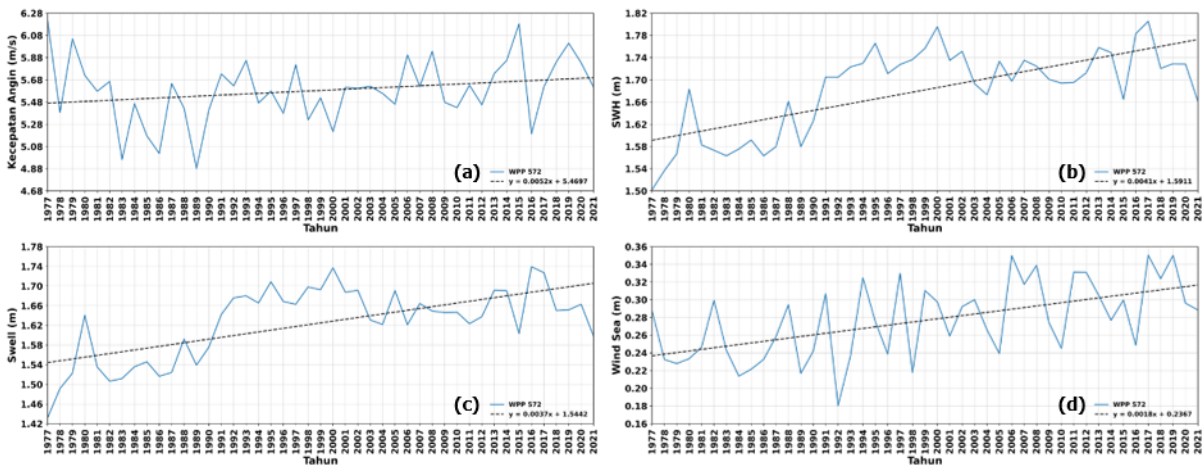
Kenaikan swell tertinggi terjadi di WPP yang berbatasan langsung dengan laut lepas, yakni di WPP 572 (0,37 cm/tahun), 573 (0,27 cm/tahun), dan 717 (0,32 cm/tahun). Sedangkan, WPP 713 (Selat Makassar) memiliki tren kenaikan swell terendah dengan nilai 0,05 cm/tahun (**Tabel 1**). Penjalaran swell dari Samudra Hindia menuju perairan barat Sumatra dan selatan Jawa, dan swell yang menjalar dari Samudra Pasifik menuju perairan utara Papua mengakibatkan tinggi gelombang di perairan tersebut lebih besar daripada tinggi gelombang di perairan Indonesia bagian dalam (Rizal dan Ningsih, 2020). WPP 572 dan 573 berbatasan langsung dengan Samudra Hindia, sedangkan WPP 717 berbatasan langsung dengan Samudra Pasifik. Nilai kenaikan SWH di WPP yang berbatasan dengan laut lepas masing-masing adalah 0,41; 0,29; dan 0,31 cm/tahun (**Tabel 1**). SWH di perairan Indonesia bagian dipengaruhi kuat oleh angin lokalnya (wind sea) dengan nilai koefisien korelasi antara SWH dan angin lokal sebesar > 0,80 (Ramdhani, 2015).

WPP 572 (perairan barat Sumatra) memiliki peningkatan SWH, swell, dan wind sea tertinggi selama 45 tahun (1977–2021) diantara WPP lainnya, yakni dengan nilai masing-masing sebesar 0,41; 0,37; dan 0,18 cm/tahun (**Gambar 2b-d**). Tren kecepatan angin di WPP 572 selama 45 tahun (1977–2021) sebesar 0,52 cm/s/tahun (**Gambar 2a**). Peningkatan swell di WPP 572 (0,37 cm/tahun; **Gambar 2c**) lebih besar daripada kenaikan nilai wind sea (0,18 cm/tahun; **Gambar 2d**). Tinggi gelombang di WPP 572 didominasi oleh penjalaran swell dari Samudra Hindia. Swell dari Samudra Hindia berasal dari daerah lintang tinggi di bagian selatan dan selanjutnya menjalar menuju Samudra Hindia bagian utara (Zheng dan Li, 2017). Swell tersebut menjalar masuk ke perairan Indonesia, khususnya di perairan barat Sumatra (WPP 572), serta perairan selatan Jawa dan Laut Timor (WPP 572).

Selama 45 tahun (1977–2021), WPP 717 (perairan utara Papua) mengalami peningkatan kecepatan angin terbesar diantara 11 WPP lainnya dengan nilai 1,17 cm/s/tahun (**Gambar 3a**) serta peningkatan SWH di WPP

**Tabel 1.** Tren jangka panjang kecepatan angin, SWH, swell, dan wind sea selama 45 tahun (1977–2021). Warna merah menunjukkan tren yang bernilai positif, sedangkan warna biru menandakan tren yang bernilai negatif.

WPP	Tren Jangka Panjang (45 Tahun; 1977–2021)			
	Kecepatan Angin	SWH (cm/tahun)	Swell (cm/tahun)	Wind Sea (cm/tahun)
571	0,06	0,06	0,07	0,00
572	0,52	0,41	0,37	0,18
573	0,53	0,29	0,27	0,07
711	0,03	0,12	0,13	0,00
712	0,38	0,10	0,11	0,06
713	0,19	0,06	0,05	0,02
714	0,10	0,18	0,14	0,10
715	-0,21	0,12	0,11	0,03
716	0,26	0,19	0,21	-0,02
717	1,17	0,31	0,32	0,02
718	0,13	0,20	0,16	0,11
<b>Rata-rata</b>	<b>0,29</b>	<b>0,19</b>	<b>0,18</b>	<b>0,05</b>
<b>Standar Deviasi</b>	<b>0,35</b>	<b>0,11</b>	<b>0,10</b>	<b>0,06</b>



Gambar 2. Tren jangka panjang (a) kecepatan angin, (b) SWH, (c) swell, dan (d) wind sea di WPP 572 (perairan barat Sumatra) selama 45 tahun (1977–2021).

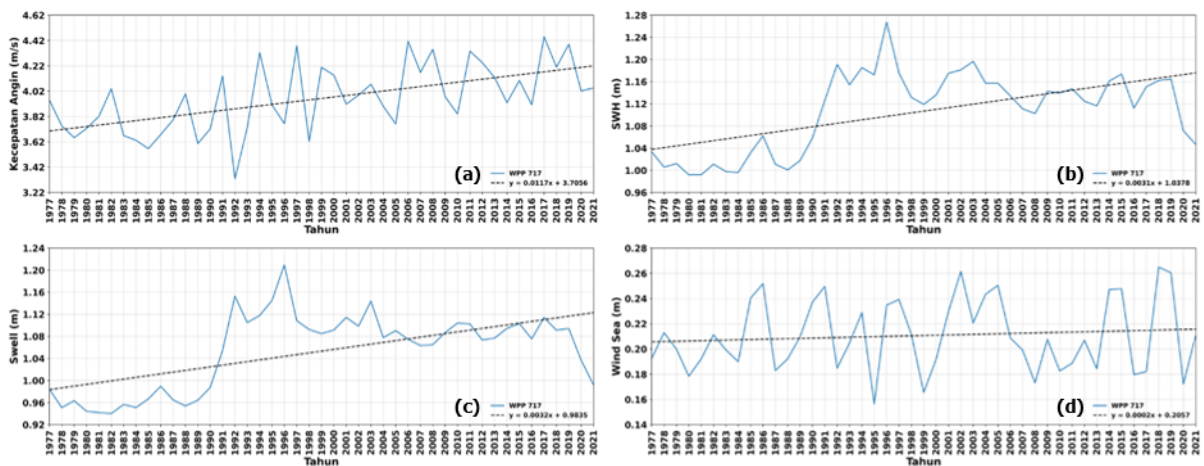
717 sebesar 0,31 cm/tahun (**Gambar 3b**). Peningkatan SWH di WPP 717 (perairan utara Papua) dipengaruhi oleh peningkatan swell yang menjalar dari Samudra Pasifik bagian barat. Tren swell di WPP 717 selama 45 tahun (1977–2021) bernilai 0,32 cm/tahun (**Gambar 3d**), sedangkan tren wind sea di WPP 717 sebesar 0,02 cm/tahun (**Gambar 3c**). Kecepatan angin terendah di WPP 717 terjadi pada tahun 1992 dengan nilai sekitar 3,32 m/s; **Gambar 3a**) dan mengalami penurunan dari tahun sebelumnya. Namun, rata-rata nilai SWH di WPP 717 pada tahun 1992 tidak mengalami penurunan dari tahun sebelumnya, yakni dengan nilai sekitar 1,19 m (**Gambar 3b**). Nilai wind sea di WPP 717 pada tahun 1992 (sekitar 0,18 m; **Gambar 3d**) mengalami penurunan dari tahun sebelumnya. Namun, nilai swell pada tahun 1992 tidak mengalami penurunan dari tahun sebelumnya, yakni sekitar 1,15 m (**Gambar 3c**). Penurunan kecepatan angin dan wind sea di WPP 717 pada tahun 1992 bertepatan dengan kejadian El Niño kuat pada tahun yang sama (**Gambar 5**). Namun, fenomena El Niño 1992 tidak berkontribusi terhadap penurunan SWH dan swell di WPP 717 pada tahun 1992.

WPP 715 (Laut Maluku) merupakan satu-satunya WPP yang menunjukkan adanya penurunan tren kecepatan

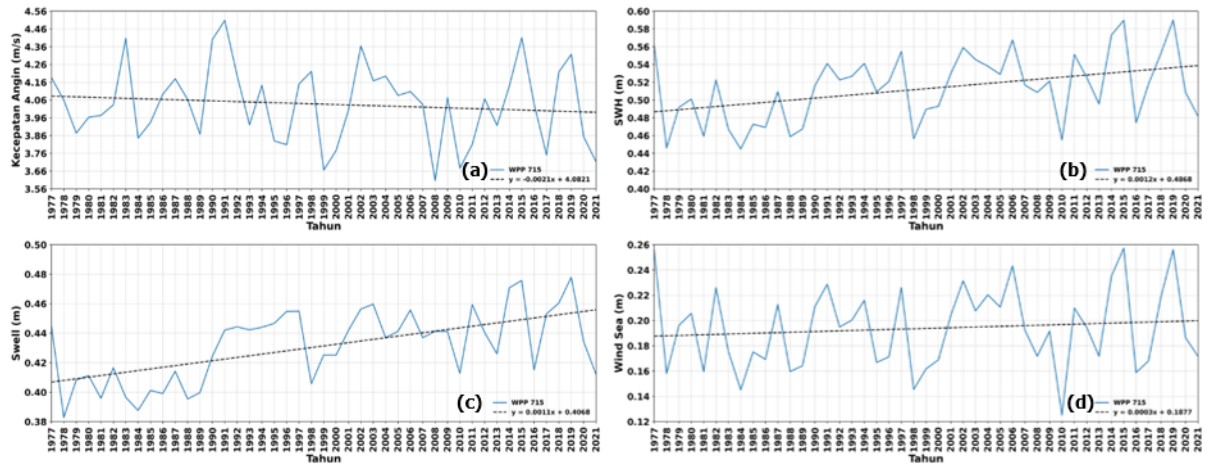
angin dengan nilai sebesar -0,21 cm/s/tahun (**Gambar 4a**). Namun, walaupun nilai kecepatan angin di WPP 715 setiap tahunnya mengalami penurunan, SWH di WPP 715 mengalami peningkatan sebesar 0,12 cm/tahun (**Gambar 4b**). Peningkatan SWH di WPP 715 dapat diakibatkan oleh kontribusi swell di WPP 715 yang mengalami peningkatan setiap tahunnya dengan nilai sebesar 0,11 cm/tahun (**Gambar 4c**), serta terjadi kenaikan nilai wind sea setiap tahunnya dengan nilai sekitar 0,03 cm/tahun di WPP 715 (**Gambar 4d**).

### 3.2 Pengaruh fenomena El Niño-Southern Oscillation (ENSO) terhadap variabilitas tahunan SWH

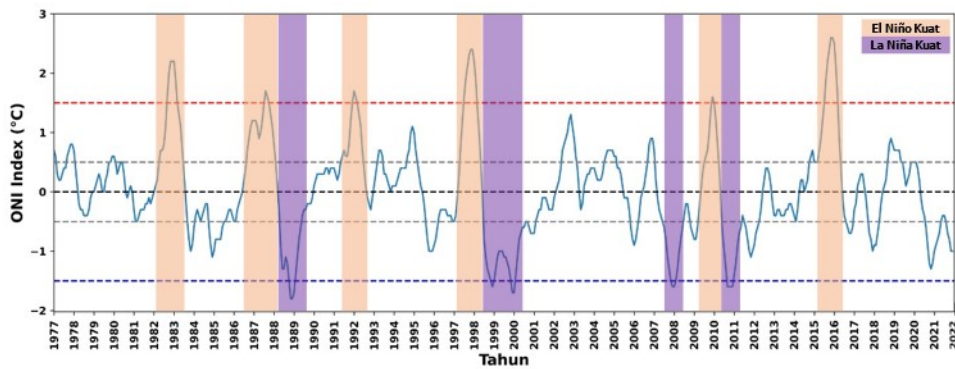
Variabilitas kecepatan angin dan SWH tahunan di perairan Indonesia dapat dipengaruhi oleh fenomena laut-atmosfer, salah satunya adalah El Niño-Southern Oscillation (ENSO) yang merupakan fenomena interannual (2–7 tahun) (Harijono, 2008; Haiyqal dkk., 2023; Ilahude dan Nontji, 1999; Kurniawan dkk., 2012). Fenomena ENSO dapat terdeteksi berdasarkan anomali suhu permukaan laut di daerah Niño 3.4 (Samudra Pasifik bagian tengah; 5° LU–5° LS dan 120° –170° BT) dengan threshold sebesar +0.5 °C (El Niño) dan -0.5 °C (La Niña) berdasarkan Ocean Niño Index



Gambar 3. Sama seperti Gambar 2, tetapi di WPP 717 (perairan utara Papua).



Gambar 4. Sama seperti Gambar 2, tetapi di WPP 715 (Laut Maluku).



Gambar 5. Indeks ONI tahun 1977–2021 (45 tahun). Garis hitam, abu-abu, merah, dan biru putus-putus secara berurutan masing-masing menunjukkan fenomena ENSO pada kondisi normal (0 °C), El Niño (+0,5 °C) dan La Niña (-0,5 °C), dan El Niño kuat (+1,5 °C) dan La Niña kuat (-1,5 °C). Warna krem (ungu) menunjukkan fenomena El Niño (La Niña) kuat.

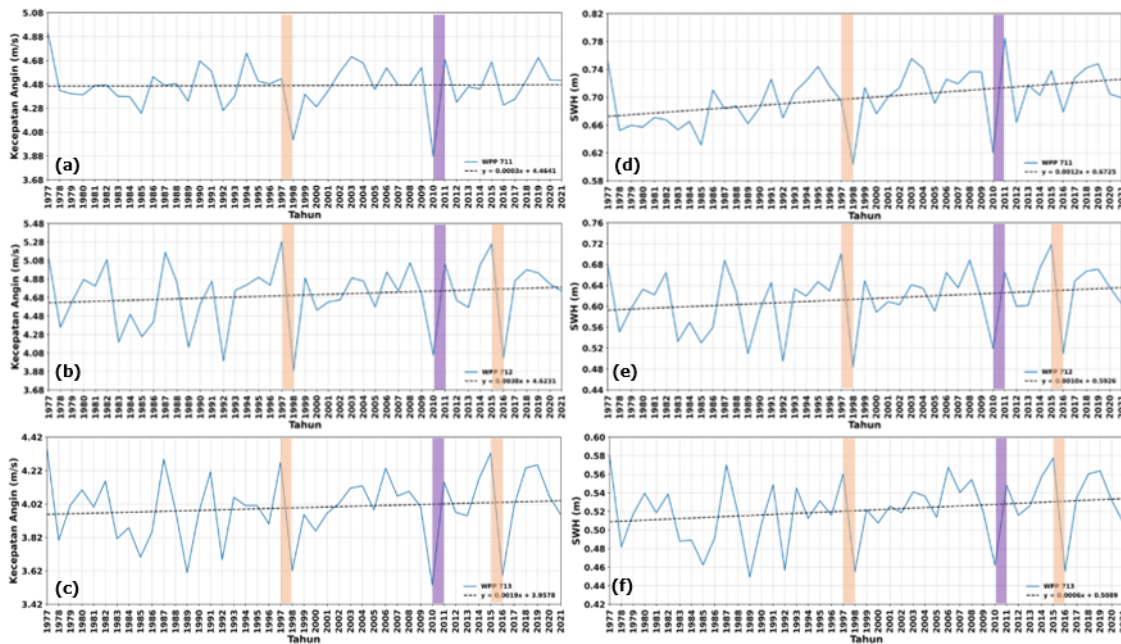
(ONI) ([https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php)). Gambar 5 menunjukkan grafik time series ONI pada tahun 1977–2021 (45 tahun). Kejadian El Niño dan La Niña kuat ditandai dengan threshold indeks ONI  $\geq \pm 1,5$  °C (<https://asmc.asean.org/asmc-el-nino/>). Fenomena terjadinya El Niño dan La Niña kuat periode 1977–2021 (45 tahun) dapat dilihat pada Tabel 2.

Gambar 6 menunjukkan pengaruh fenomena ENSO terhadap variabilitas kecepatan angin dan SWH rata-rata tahunan di WPP 711 (Gambar 6a dan 6d), 712 (Gambar 6b dan 6e), dan 713 (Gambar 6c dan 6f). Secara umum, nilai kecepatan angin dan SWH di tiga WPP tersebut mengalami penurunan saat kejadian El Niño kuat (1997–1998 dan 2015–2016). Pada kondisi La Niña kuat (2010–2011), ketiga WPP tersebut mengalami kenaikan kecepatan angin dan SWH yang signifikan pada tahun yang sama.

Pada tahun 1997–1998, nilai SWH rata-rata tahunan di WPP 711 (Gambar 6d), 712 (Gambar 6e), dan 713 (Gambar 6f) mengalami penurunan yang signifikan, yakni sekitar 0,08–0,22 m. Penurunan nilai SWH pada periode El Niño kuat 1997–1998 mengikuti pola kecepatan angin yang menurun pada periode tersebut. Nilai kecepatan angin dan SWH di WPP 712 dan 713 tahun 2015–2016 juga mengalami penurunan secara signifikan akibat pengaruh fenomena El Niño kuat pada periode tersebut. Nilai kecepatan angin dan SWH periode 45 tahun (1977–2021) mencapai nilai minimum umumnya ketika terjadi fenomena El Niño kuat, khususnya di perairan Indonesia bagian dalam (a.l.: WPP 711, 712, dan 713). Besar kecepatan angin di Kejadian La Niña kuat pada tahun 2010–2011 menyebabkan kenaikan SWH di WPP 711 (+0,16 m; Gambar 6d), 712 (+0,15 m; Gambar 6e), dan 713 (+0,09 m; Gambar 6f) selama periode tersebut. Kenaikan SWH di ketiga WPP tersebut berasosiasi dengan kenaikan kecepatan angin sebagai efek dari fenomena La Niña.

Tabel 2. Tahun kejadian El Niño dan La Niña kuat dengan ONI indeks  $\geq \pm 1,5$  °C.

Kejadian	Tahun
El Niño	1982–1983; 1987–1988; 1991–1992; 1997–1998; 2009–2010; 2015–2016
La Niña	1988–1989; 1999–2000; 2007–2008; 2010–2011



Gambar 6. Variabilitas kecepatan angin dan SWH rata-rata tahunan di WPP 711 (a dan d), 712 (b dan e), dan 713 (c dan f) selama 45 tahun (1977–2021). Warna krem menunjukkan periode El Niño kuat, sedangkan warna ungu untuk periode La Niña kuat.

#### 4. Kesimpulan

1. Tren kecepatan angin dan SWH di 11 WPP Indonesia periode 1977–2021 (45 tahun) secara umum telah mengalami kenaikan dengan nilai rata-rata sebesar 0,29 cm/s/tahun dan 0,19 cm/tahun. Tren kecepatan angin terbesar terjadi di WPP 717 (Laut Arafura) dengan nilai sebesar 1,17 cm/s/tahun, sedangkan tren kenaikan SWH tertinggi terjadi di WPP 572 (perairan barat Sumatra) dengan nilai 0,41 cm/tahun. Studi ini dapat menjadi langkah awal dalam adaptasi bencana kelautan dan kerentanan pesisir.
2. Pengaruh swell memberikan kontribusi yang signifikan terhadap kenaikan SWH di WPP Indonesia, yakni dengan tren kenaikan swell sebesar 0,18 cm/tahun, sedangkan tren wind sea sebesar 0,05 cm/tahun. WPP yang berbatasan langsung dengan laut lepas (a.l.: WPP 572, 573, dan 717) memiliki potensi kerentanan gelombang tinggi yang lebih besar daripada WPP yang berada di perairan Indonesia bagian dalam.
3. Fenomena ENSO memberikan dampak signifikan terhadap variabilitas SWH di perairan Indonesia. Kondisi La Niña dapat memicu kejadian gelombang tinggi yang dapat membahayakan aktivitas kelautan. Pada studi ini belum dikaji lebih lanjut terkait fenomena Indian Ocean Dipole (IOD) yang terjadi di Samudra Hindia. Untuk pemahaman yang lebih komprehensif, pada studi selanjutnya sebaiknya dilakukan analisis pengaruh fenomena IOD terhadap variabilitas kecepatan angin dan SWH di perairan Indonesia.

#### Pernyataan Penulis

Penulis menyatakan dengan sesungguhnya bahwa artikel ini belum pernah dipublikasikan pada terbitan ilmiah.

#### Ucapan Terima Kasih

Penelitian ini didanai oleh Institut Teknologi Bandung (ITB) (No. Kontrak 223/IT1.B07.1/TA.00/2022) dan Marine Technology Cooperation Research Center (MTCRC). Kami berterima kasih kepada ITB dan MTCRC atas dukungannya.

#### Daftar Pustaka

- Bhardwaj, P., dan Singh, O., 2020, *Climatological Characteristics of Bay of Bengal Tropical Cyclones: 1972–2017*, Theoretical and Applied Climatology, Vol. 139, 615-629.
- Brotosusilo, A., Apriana, I. W. A., Satria, A. A., dan Jokopitoyo, T., 2016, *Littoral and Coastal Management in Supporting Maritime Security for Realizing Indonesia as World Maritime Axis*, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Vol. 30, paper No.1.
- Cao, Y., Dong, C., Young, I. R., dan Yang, J., 2021, *Global Wave Height Slowdown Trend during a Recent Global Warming Slowdown*, Remote Sensing, Vol. 13, No. 20, 4096.
- Chand, S. S., Walsh, K. J., Camargo, S. J., Kossin, J. P., Tory, K. J., Wehner, M. F., Chan, J. C., Klotzbach, P. J., Dowdy, A. J., Bell, S. S., dan Ramsay, H. A., 2022, *Declining Tropical*

- Cyclone Frequency Under Global Warming*, Nature Climate Change, Vol. 12, No. 7, 655-661.
- Haiyqal, S. V., Ismanto, A., Indrayanti, E., dan Andrianto, R., 2023, *Karakteristik Tinggi Gelombang Laut pada saat Periode Normal, El Niño dan La Niña di Selat Makassar*, Jurnal Kelautan Tropis, Vol. 26, No. 1, 190-202.
- Harijono, S. W. B., 2008, *Analisis Dinamika Atmosfer di Bagian Utara Ekuator Sumatera pada saat Peristiwa El Niño dan Dipole Mode Positif Terjadi Bersamaan*, Jurnal Sains Dirgantara, Vol. 5, No. 2, 130-148.
- Hithin, N. K., Kumar, V. S., dan Shanas, P. R., 2015, *Trends of Wave Height and Period in the Central Arabian Sea from 1996 to 2012: A Study Based on Satellite Altimeter Data*, Ocean Engineering, Vol. 108, 416-425.
- Ilahude, A. G., dan Nontji, A., 1999, *Oseanografi Indonesia dan Perubahan Iklim Global (El Niño dan La Niña)*, Puslitbang Oseanologi-LIPI, Jakarta, 1-13.
- Indeks ONI, diperoleh melalui situs internet: [https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis\\_monitoring/ensostuff/ONI\\_v5.php](https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php). Diakses pada 31 Maret 2023.
- Informasi jumlah potensi perikanan di WPP Indonesia, diperoleh melalui situs internet: <https://kkp.go.id/artikel/39588-kkp-perbarui-data-estimasi-potensi-ikan-totalnya-12-01-juta-ton-per-tahun>. Diakses pada 31 Maret 2023.
- Informasi nilai threshold kejadian El Niño dan La Niña kuat <https://asmc.asean.org/asmc-el-nino/#:~:text=ENSO%20events%20with%20a%20peak,La%20Ni%C3%B1a%20are%20considered%20strong>. Diakses pada 31 Maret 2023.
- Klotzbach, P. J., 2006, *Trends in Global Tropical Cyclone Activity Over the Past Twenty Years (1986-2005)*, Geophysical Research Letters, Vol. 33, No. 10.
- Kumar, P., Kaur, S., Weller, E., dan Min, S. K., 2019, *Influence of Natural Climate Variability on the Extreme Ocean Surface Wave Heights Over the Indian Ocean*, Journal of Geophysical Research: Oceans, Vol. 124, No. 8, 6176-6199.
- Kurniawan, R., dan Khotimah, M. K., 2015, *Ocean Wave Characteristics in Indonesian Waters for Sea Transportation Safety and Planning*, IPTEK The Journal for Technology and Science, Vol. 26, No. 1, 19-27.
- Kurniawan, R., Habibie, M. N., dan Permana, D. S., 2012, *Kajian Daerah Rawan Gelombang Tinggi di Perairan Indonesia*, Jurnal Meteorologi dan Geofisika, Vol. 13, No.3.
- Laporan Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)., 2018, *Global Warming of 1.5 °C: Summary for Policymaker*.
- Newbold, P., Carlson, W. L. Thorne, B. T., 2013, *Statistics for business and economics*, Pearson.
- Ningsih, N. S., Hanifah, F., Tanjung, T. S., Yani, L. F., dan Azhar, M. A., 2020, *The Effect of Tropical Cyclone Nicholas (11–20 February 2008) on Sea Level Anomalies in Indonesian Waters*, Journal of Marine Science and Engineering, Vol. 8, No. 11, 948.
- Peraturan Menteri Kelautan dan Perikanan Republik Indonesia No.18 Tahun 2014.
- Pielke Jr, R. A., Landsea, C., Mayfield, M., Layer, J., dan Pasch, R., 2005, *Hurricanes and Global Warming*, Bulletin of the American Meteorological Society, Vol. 86, No. 11, 1571–1576.
- Ramdhani, A., 2015, *Pengaruh Siklon Tropis dan Madden-Julian Oscillation (MJO) Terhadap Kejadian Gelombang Tinggi di Perairan Indonesia Bagian Dalam*, Disertasi Program Doktor, Indonesia: Institut Teknologi Bandung.
- Rizal, A. M., dan Ningsih, N. S., 2022, *Description and Variation of Ocean Wave Energy in Indonesian Seas and Adjacent Waters*, Ocean Engineering, Vol. 251.
- Semedo, A., Sušelj, K., Rutgersson, A., dan Sterl, A., 2011, *A Global View on The Wind Sea and Swell Climate and Variability From ERA-40*, Journal of Climate, Vol. 24, No. 5, 1461–1479.
- Shanas, P. R., dan Kumar, V. S., 2015, *Trends in Surface Wind Speed and Significant Wave Height as Revealed by ERA-Interim Wind Wave Hindcast in The Central Bay of Bengal*, International Journal of Climatology, Vol. 35, No. 9, 2654-2663.
- Smith, C. B., 2007, *Extreme Waves and Ship Design, 10<sup>th</sup> International Symposium on Practical Design of Ships and Other Floating Structures*, Houston, USA.
- Sterl, A., dan Caires, S., 2005, *Climatology, Variability and Extrema of Ocean Waves: The Web-Based KNMI/ERA-40 Wave Atlas*, International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, Vol. 25, No. 7, 963–977.
- Suman, A., Irianto, H. E., Satria, F., dan Amri, K., 2017, *Potensi dan Tingkat Pemanfaatan Sumber Daya Ikan di Wilayah Pengelolaan Perikanan Negara Republik Indonesia (WPP NRI) Tahun 2015 Serta Opsi Pengelolaannya*, Jurnal Kebijakan Perikanan Indonesia, Vol. 8, No. 2, 97–100.

Zheng, C. W., dan Li, C. Y., 2017, *Analysis of temporal and spatial characteristics of waves in the Indian Ocean based on ERA-40 wave reanalysis*, Applied Ocean Research, Vol. 63, 217–228.

Zheng, C. W., Zhang, R., Shi, W., Li, X., dan Chen, X., 2017, *Trends in Significant Wave Height and Surface Wind Speed in the China Seas Between 1988 and 2011*, Journal of Ocean University of China, Vol. 16, No.5, 717-726.

Zheng, C. W., Li, X., Molina, C. A., Li, C., Wang, Q., Xiao, Z., Yang, S., Chen, X., dan Zhan, C., 2022, *Global Trends in Oceanic Wind Speed, Wind-Sea, Swell, and Mixed Wave Heights*, Applied Energy, 321.