

Karakteristik Tinggi Gelombang Laut pada saat Periode Normal, El Niño dan La Niña di Selat Makassar

Sevti Vika Haiyqal^{1,4*}, Aris Ismanto^{2,3}, Elis Indrayanti², Randy Andrianto⁴

¹Departemen Ilmu Kelautan, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro

²Departemen Oseanografi, Fakultas Perikanan dan Ilmu Kelautan, Universitas Diponegoro
Jl. Prof. H. Soedarto, S.H, Tembalang Semarang, Jawa Tengah 50275 Indonesia

³Pusat Kajian Mitigasi dan Rehabilitasi Pesisir, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. H. Soedarto, S.H, Tembalang Semarang, Jawa Tengah 50275 Indonesia

⁴Balai Besar Meteorologi Klimatologi Dan Geofisika Wilayah II Tangerang

Jl. H. Abdulgani No. 5 Ciputat Timur, Tangerang Selatan, Banten Indonesia

Email: viqahaiyqal@gmail.com

Abstract

Characteristics of Sea Wave Height during the Normal, El Niño , and La Niña Periods in the Makassar Strait

Waves are an important factor in marine science that can have positive and negative impacts on the natural conditions that affect them. Under certain conditions waves can change the coastline, damage marine life, cause tidal flooding, affect coastal buildings and so on. With the energy that waves have, they can affect all human activities such as distribution, utilization of energy sources, utilization of marine biota sources, tourism business, and development of coastal areas. Based on the influence generated, information on wave characteristics is needed based on climate variability that affects local conditions. Climate variability that affects the waters of the Makassar Strait which has a high wave pattern that follows a monsoonal pattern is the El Niño and La Niña phenomena. Using wind data and wave periods for 2013-2022 from Hindcasts-OFS BMKG, this study aims to determine the characteristics of high waves in the Makassar Strait during Normal, El Niño and La Niña phenomena. BMKG-OFS is the third generation data model of wavewatch (WW III) and has a relatively low error value with a range of 0.27 - 0.36 against the observed value of the wave recorder data installed in the Makassar Strait. From the processing it is produced during the Asian Monsoon (December, January, February) and during the Australian monsoon (June, July, August). The characteristics of high waves in the northern and central parts of the Makassar Strait are more influenced by the La Niña phenomenon than El Niño . Characteristics of the wave height in the southern part of the Makassar Strait experienced an increase in wave height both during La Niña and El Niño compared to normal.

Keywords: monsoon, Characteristic, Hindcast OS

Abstrak

Gelombang merupakan faktor penting dalam ilmu kelautan yang dapat memberikan dampak positif dan negatif pada kondisi alam yang mempengaruhinya. Pada kondisi tertentu gelombang dapat merubah garis pantai, merusak biota laut, menyebabkan banjir rob, mempengaruhi bangunan pesisir dan lain sebagainya. Dengan energi yang dimilikinya gelombang dapat mempengaruhi segala kegiatan manusia seperti distribusi, pemanfaatan sumber energi, pemanfaatan sumber biota laut, bisnis pariwisata, dan pembangunan wilayah pesisir. Berdasarkan pengaruh yang ditimbulkan maka diperlukan informasi karakteristik gelombang berdasarkan variabilitas iklim yang mempengaruhi kondisi lokalnya. Variabilitas iklim yang mempengaruhi perairan Selat Makassar a yang memiliki pola tinggi gelombang yang mengikuti pola muson adalah fenomena El Niño dan La Niña. Dengan menggunakan data angin dan gelombang periode 2013-2022 dari Hindcasts-OFS BMKG, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik tinggi gelombang di Selat Makassar saat fenomena Normal, El Niño , dan La Niña. BMKG-OFS merupakan data model generasi ketiga dari wavewatch(WW III) dan memiliki nilai error yang relatif rendah dengan rentang sebesar 0,27 - 0,36 terhadap nilai observasi data wave recorder yang terpasang di Selat Makassar. Dari pengolahannya dihasilkan pada saat Monsun Asia (Desember, Januari, Februari) maupun pada saat monsun Australia (Juni, Juli, Agustus). Karakteristik tinggi gelombang di Selat Makassar bagian utara dan tengah lebih dipengaruhi oleh fenomena La Niña daripada El Niño . Karakteristik tinggi gelombang di Selat Makassar bagian selatan mengalami peningkatan tinggi gelombang baik saat La Niña maupun El Niño terhadap normalnya.

Kata kunci : monsun, karakteristik gelombang, BMKG-OFS

PENDAHULUAN

Indonesia yang merupakan negara kepulauan di kawasan tropis dengan penerimaan panas sinar matahari sepanjang tahun mengakibatkan suhu permukaan laut (SPL) perairannya menjadi

hangat. Anomali SPL di Samudra Pasifik tropis menyebabkan adanya variabilitas iklim (Aldrian, 2008; Aldrian dan Susanto, 2003). Variabilitas iklim seperti *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO) berupa fenomena El Niño merupakan pergeseran massa udara hangat ke arah di Samudera Pasifik tropis bagian tengah ke kanan atau timur dan fenomena La Niña merupakan pergeseran massa udara panas di Samudera Pasifik tropis bagian tengah ke kiri atau barat (Hidayat *et al.*, 2018; Santoso *et al.*, 2017; Dewi *et al.*, 2020). Hal ini menyebabkan perubahan dinamika atmosfer dan oseanografi (Aldrian dan Susanto, 2003; Labania *et al.*, 2019). Perubahan dinamika tersebut terjadi tidak hanya di dalam Samudra Pasifik tropis namun terjadi juga di luar Samudra Pasifik tropis, yang berdampak pada habitat darat dan laut, ketersediaan air, ketahanan pangan, ekonomi, dan stabilitas sosial (McPhaden *et al.*, 2006; Santoso *et al.*, 2017). Parameter fisis oseanografi yang dipengaruhi variabilitas iklim ENSO adalah parameter angin dan gelombang (Joseph dan Kumar, 2021; Labania *et al.*, 2019; Shuzong *et al.*, 2017). Selain informasi tentang angin, informasi tentang gelombang merupakan bagian penting yang terdapat dalam setiap jenis informasi kelautan (Kurniawan, 2012; WMO, 2018), sebagai prakiraan maupun peringatan dini cuaca buruk berupa gelombang tinggi.

Posisi Indonesia juga di antara dua Benua Asia dan Australasia menjadikannya tidak lepas dari pengaruh monsun. Angin monsun memiliki persistensi dalam arah dan kecepatannya sekitar periodik 3 bulan mengikuti peredaran matahari (Habibie dan Fitria, 2019). Ketika bulan Desember, Januari, Februari (DJF), posisi matahari berada di 23° lintang selatan, benua Asia mengalami musim dingin dan benua Australia mengalami musim panas sehingga angin bergerak dari utara (Asia) ke selatan (Australia) yang disebut Monsun Asia. Begitu juga sebaliknya ketika Bulan Juni, Juli, Agustus (JJA), posisi matahari berada di 23° lintang utara sehingga benua Australia mengalami musim dingin dan benua Asia mengalami musim panas, maka angin bergerak dari selatan (Australia) ke utara (Asia) disebut Monsun Australia. Klimatologis gelombang di wilayah perairan Indonesia dipengaruhi oleh pola monsun (Habibie dan Fitria, 2019) karena pola distribusi gelombang mengikuti pola distribusi angin dengan arah utama gelombang mengikuti arah angin utamanya.

Variabilitas iklim ENSO berpengaruh besar terhadap pembentukan variabilitas angin monsun di wilayah Indonesia (Ramadhan *et al.*, 2021). Pola sirkulasi angin ENSO dan monsun, keduanya memiliki pengaruh yang sama terhadap tinggi gelombang di Indonesia. Karena gelombang laut timbul dari adanya gaya pembangkit yang bekerja pada laut (Kumar *et al.*, 2019). Gaya itu timbul dari angin yang berfungsi sebagai faktor utama pembangkit gelombang. Tinggi, periode dan arah gelombang dapat dihitung dari data arah, kecepatan, dan durasi angin (Afriady *et al.*, 2019). Area pembangkit gelombang laut oleh angin disebut *fetch* (Umpel *et al.*, 2015) dan area *fetch* ini dibatasi oleh daratan atau pulau (Kurniawan, 2012). Parameter gelombang ini merepresentasikan tinggi rata-rata dari sepertiga tertinggi gelombang permukaan laut yang ditimbulkan oleh angin setempat, mewakili jarak vertikal antara puncak dan lembah gelombang. Bidang gelombang di permukaan laut terdiri dari kombinasi gelombang dengan ketinggian, panjang, dan arah pada lokasi dan waktu yang disebut dengan spektrum gelombang. Spektrum gelombang dapat diuraikan menjadi gelombang laut yang dipengaruhi langsung angin lokal dan gelombang yang ditimbulkan oleh angin dari lokasi dan waktu yang berbeda. Ketinggian gelombang yang signifikan dapat digunakan untuk menghitung beban pada struktur di laut terbuka seperti anjungan minyak atau mengaplikasikannya di pantai (Kurniawan *et al.*, 2013). Gelombang yang dibangkitkan oleh angin di permukaan laut memberikan pengaruh pada berbagai aktivitas manusia untuk melangsungkan hidupnya seperti transportasi laut, proyek pembangunan lepas pantai, pariwisata (Kunarso *et al.*, 2018; Suroso dan Firman, 2018), penangkapan ikan, infrastruktur pesisir pantai (Sebayang dan Kurniadi, 2015). Efisiensi dan keselamatan di laut tergantung pada variasi tinggi gelombangnya sehingga diperlukan informasi karakteristik tinggi gelombang di perairan Indonesia (Kurniawan, 2012).

Perairan Selat Makassar merupakan bagian dari Alur Laut Kepulauan Indonesia (ALKI) II yang disepakati dalam *International Maritime Organization*, Selat Makassar merupakan perairan yang sangat penting bagi pelayaran internasional dalam melaksanakan hak lintasnya. Meskipun tingkat labilitasnya paling rendah di antara seluruh perairan yang ada di wilayah Indonesia (Purwanto *et*

al., 2021). Perairan ini juga berpotensi terjadi gelombang tinggi hingga mencapai ketinggian 2-3 meter sesuai prakiraan dan peringatan yang pernah dipublikasikan oleh BMKG, baik pada angin timuran bulan JJA maupun musim angin baratan bulan DJF (WMO, 2018). Prosentase kecelakaan kapal yang tertinggi di perairan Indonesia adalah dari faktor alam (Kurniawan et al., 2013). Sehingga tidak menutup kemungkinan akibat cuaca buruk dari adanya gelombang tinggi tidak dalam jumlah yang sedikit terjadi. Sehingga informasi tentang gelombang di wilayah pelayaran Indonesia khususnya Selat Makassar mengenai variabilitasnya. Informasi ini merupakan bagian terpenting bagi pelayanan meteorologi kelautan, baik dalam bentuk prakiraan cuaca maupun peringatan dini gelombang sebagai dasar pengambilan keputusan dalam kelayakan berlayar bagi pengguna media perairan dalam aktivitasnya sehari-hari.

Penelitian mengenai variabilitas musiman gelombang laut spasial di perairan Selat Makassar telah dikaji oleh Labania et al. (2019). Penelitian ini menggunakan model gelombang generasi ketiga yaitu model MIKE 21 *Spectral Wave (SW)* dengan data angin prediksi *European Centre Medium-Range Weather Forecasts (ECMWS)* resolusi $5^{\circ} \times 5^{\circ}$ periode 2006-2015. Karena data dan resolusinya yang digunakan oleh peneliti sebelumnya ini maka perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan data yang resolusinya lebih tinggi dan menggunakan data yang sudah di validasi. Dengan periode yang lebih baru yaitu 2013-2022 dan resolusi data yang lebih tinggi maka penelitian yang akan dilakukan bertujuan menganalisa karakteristik tinggi gelombang berdasarkan musionalnya pada fase Normal, El Niño, dan La Niña di Selat Makassar.

MATERI DAN METODE

Penelitian pada domain area Selat Makassar adalah perairan yang terletak di antara Pulau Kalimantan dan Pulau Sulawesi serta menghubungkan Laut Sulawesi di bagian utara dan perairan Laut Jawa di bagian selatan; (Labania et al., 2021). Selat Makassar membentang arah Utara – Selatan sepanjang 600 km dengan lebar antara 100–200 km dan kedalaman air laut mencapai lebih dari 2000 m (Wijaya et al., 2009). Dengan demikian *fetch* gelombang di Selat Makassar adalah pada domain tersebut (Gambar 1). Wilayah analisisnya, Selat Makassar dibagi menjadi 3 bagian wilayah analisa, yaitu bagian utara, bagian tengah dan bagian selatan.

Periode penelitian menggunakan data tahun 2013 sampai dengan 2022. Data yang digunakan adalah indeks anomali suhu muka laut yang disebut *Oceanic Nino Index (ONI)* musional (rata-rata 3 bulan berjalan) yang diperoleh secara bebas dari laman <https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/> yang dikelola oleh *Climate Prediction Centre (CPC)*, *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*. Indeks ENSO diukur dari anomali suhu permukaan laut (SPL) bulanan pada wilayah Nino 3.4 yang mencakup sebagian daerah Nino 3 dan sebagian daerah Nino 4, yang terletak pada $120^{\circ}\text{BB} - 170^{\circ}\text{BB}$ dan $5^{\circ}\text{LS} - 5^{\circ}\text{LU}$. Identifikasi fenomena ENSO yaitu dengan mengklasifikasikan nilai ONI sesuai batasannya yaitu, $-0.5^{\circ}\text{C} < \text{ONI} < +0.5^{\circ}\text{C}$ untuk Normal, $\text{ONI} > +0.5^{\circ}\text{C}$ untuk El Niño, dan $\text{ONI} < -0.5^{\circ}\text{C}$ untuk La Niña (https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php; Ramadhan et al., 2021).

Data angin dan gelombang produk *Hindcast* sistem *Ocean Forecast System (OFS)* yang diperoleh dari Pusat Meteorologi Maritim, Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). Sistem ini disebut dengan BMKG-OFS, merupakan sistem pemodelan cuaca maritim yang merujuk pada *WaveWatch III (WW3)* model gelombang generasi ketiga oleh *National Centre Environmental Prediction (NCEP)* bagian dari *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)* (Bmkg dan Altimetry, 2019). Data system OFS ini memiliki resolusinya spasial 0.0625° (7km) dan resolusi temporal 3 jam waktu utama yaitu 00, 03, 06, 09, 15, 18, dan 21 UTC, yang selanjutnya dengan menggunakan bahasa pemrograman, dilakukan komposit bulanan klimatologi (Ramadhan et al., 2021) dengan persamaan sebagai berikut :

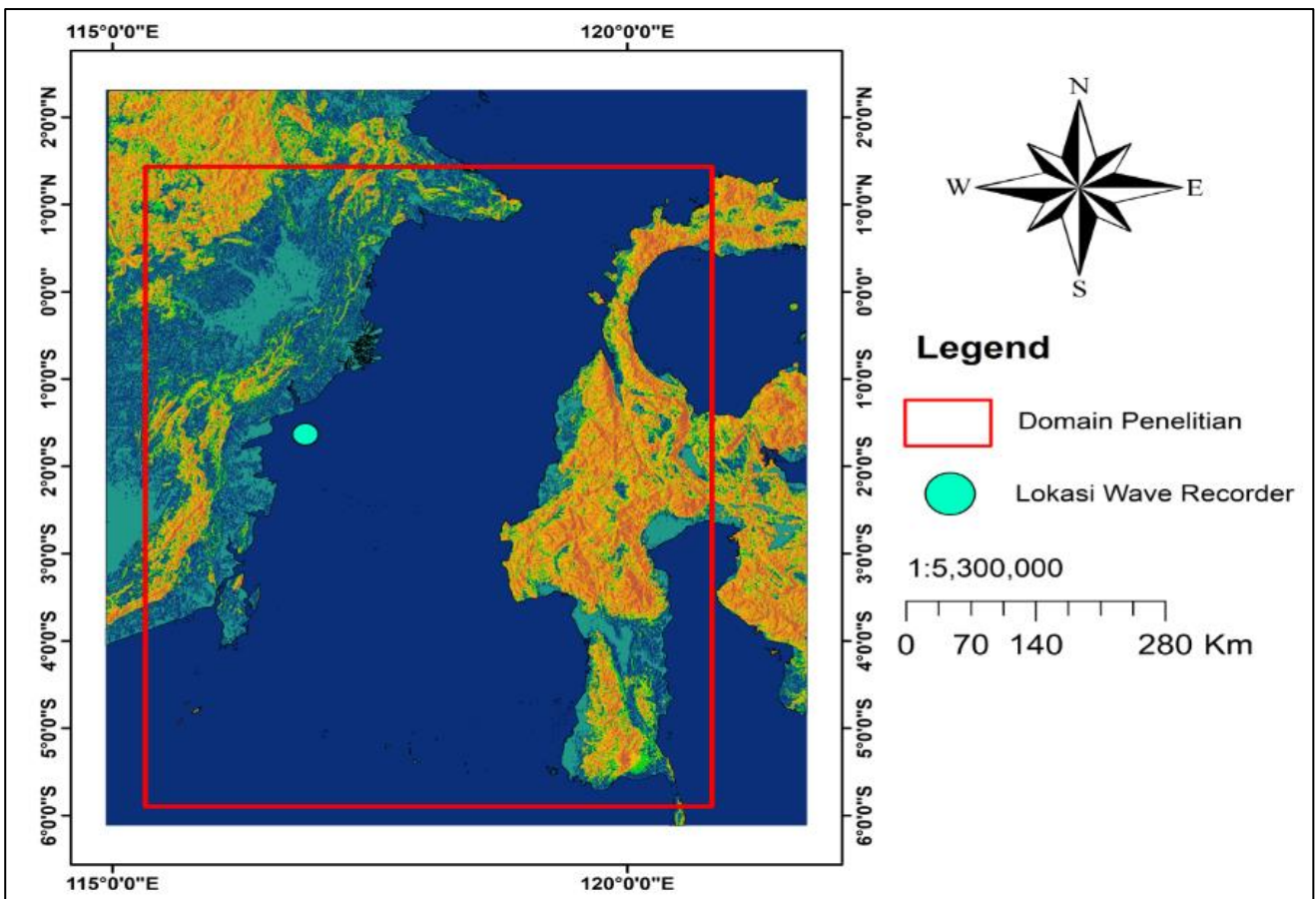
$$\bar{X}_m(x, y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i(x, y, t)$$

Keterangan: $\bar{X}_m(x, y)$ = rata-rata bulanan; $X_i(x, y, t)$ = data 3 jam-an ke -i komposit pada posisi bujur (x), lintang (y) dan waktu (t); n = jumlah banyaknya data komposit jam (1 bulan) serta i=1 merupakan periode pengamatan ke-i pada bulan komposit. Data tersebut divalidasi dengan menggunakan data insitu dari alat yang terpasang di titik-titik 1° 28' 48,2" S/1,4801° S - 116° 58' 32,8" E/116,9758° E.

Data angin dan gelombang dirata-ratakan per 3 bulan untuk mendapatkan data rata-rata 3 bulan berjalan yang terdiri dari periode Desember-Januari-Februari (DJF) dan Juni-Juli-Agustus (JJA) sebagai data muson. Misalnya, para insinyur menggunakan Kemudian data reanalisis divalidasi dengan menggunakan data angin dan gelombang pengamatan oleh BMKG. Validasi tersebut didasarkan pada kriteria statistik standard deviasi *root mean square error* (RMSE) untuk mengukur kesalahan suatu model.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{x}_i - x_i)^2}{n}}$$

Keterangan : n = jumlah data, \hat{x}_i = data model reanalisis ke-i dan x_i = data observasi ke i.



Gambar 1. Lokasi Penelitian

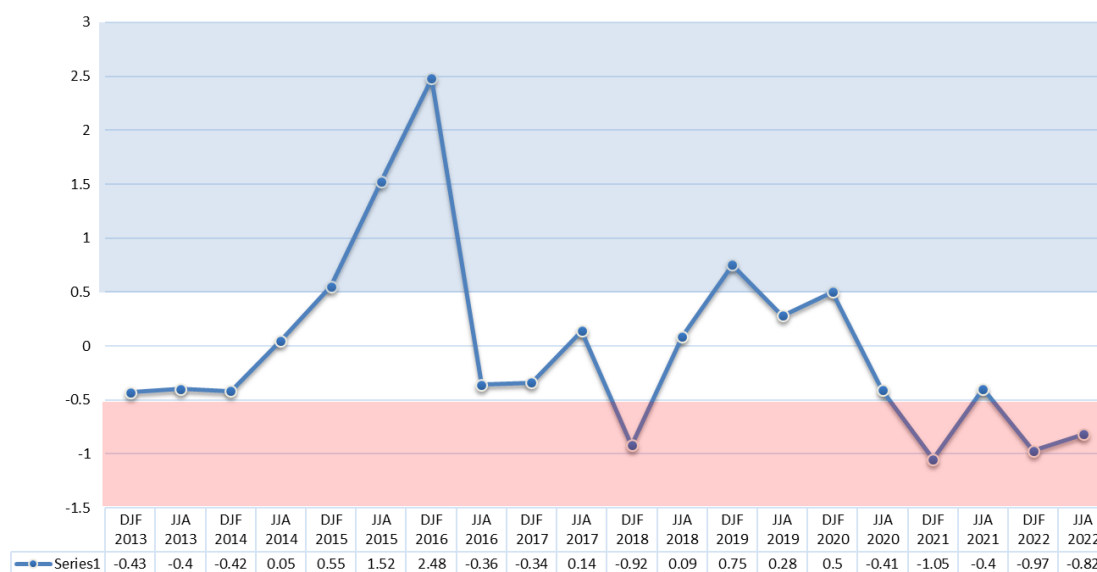
Root mean Square Errors (RMSE) antara data model dan observasi digunakan untuk mewakili kemampuan model ketika nilainya 0 menunjukkan kesesuaian yang sempurna dengan data RMSE antara keluaran model dan pengamatan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan indeks ONI bulanan selama periode 2013 dan 2022 teridentifikasi El Niño terjadi pada 2014, 2015, dan 2018, sedangkan La Niña terjadi pada tahun 2016, 2017, 2020, 2021 (Tu et al., 2022; Zheng et al., 2022), dan tahun 2022. Berdasarkan muson 3 bulanan dan batas indeks ENSO, maka grafik ONI di atas (Gambar 2.) menunjukkan bulan dan tahun fase Normal, El Niño dan La Niña. Pada tahun 2013, 2014, 2017, 2018, 2019, dan 2020 terjadi fase Normal dan ada bulan-bulan tertentu yang mengalami fase ENSO namun dalam kategori El Niño ataupun La Niña lemah. Sedangkan pada tahun 2015, 2016, 2021 dan 2022 merupakan fase ENSO yang di dalamnya terjadi fase La Niña dan El Niño kuat.

Grafik menunjukkan data bulan muson sesuai dengan rentang klasifikasi nilai ONI dalam fase fenomenanya. Periode bulan Juni-Juli-Agustus (JJA) pada tahun 2014 mengalami kondisi fase Normal dan pada tahun 2015 kondisi fase El Niño (Hutabarat et al., 2018; Santoso et al., 2017), dan tahun 2022 dalam fase La Niña. Kemudian periode bulan Desember-Januari-Februari (DJF) pada tahun 2017 terjadi fase Normal, tahun 2016 terjadi fase El Niño (Hutabarat et al., 2018; Kurniawan et al., 2013), dan tahun 2021 fase La Niña. Bulan, tahun, dan fenomena terjadinya fase ENSO termasuk kondisi normal dari hasil pengamatan di atas menjadi catatan untuk analisa berikutnya.

Adanya respon terhadap perubahan suhu permukaan laut di Samudera Pasifik pada peristiwa ENSO, maka angin muncul sebagai peran utama dalam pertumbuhan dan luruhnya ENSO itu sendiri. Pengaruh ENSO dapat mencapai ribuan km di luar Samudera Pasifik. Pembentukan



Gambar 2. Grafik ONI periode 2013 s/d 2022

Tabel 1. Fase Monsun dan ENSO

| Fase | JJA | DJF |
|---------|------|------|
| Normal | 2014 | 2017 |
| El Niño | 2015 | 2016 |
| La Niña | 2022 | 2021 |

pusat tekanan udara rendah dan tinggi di Samudera Hindia sangat di pengaruhi oleh variabilitas iklim ENSO (El Niño/La Niña) dan berpengaruh besar terhadap pembentukan variabilitas angin monsun di wilayah Indonesia (Fang *et al.*, 2006, Shuzong *et al.*, 2017, Ramadhan *et al.*, 2021). Kekuatan monsun di Indonesia akan melemah dari normalnya saat terjadi ENSO (Lim dan Kim, 2007; Shuzong *et al.*, 2017).

Komparasi angin spasial bulan Juni, Juli, dan Agustus (JJA) ditunjukkan dalam pemetaan Gambar 3. Teramati angin bertiup dari arah tenggara ke barat daya menunjukkan bahwa pola monsun di perairan Selat Makassar sangat konsisten pada semua fase. Lalu angin dibelokkan ke arah timur laut mengikuti bentuk selatnya di bagian tengah perairan Selat Makassar dengan kecepatan yang berkurang kemudian angin tetap bergerak mengikuti bentuk selat ke Timur Laut menuju keluar Selat Makasar yaitu Laut Sulawesi dengan kecepatan yang lebih rendah lagi. Dari hasil pemetaan di atas menunjukkan pola angin monsun Australia yang sedang aktif. Terlihat dari arah gerak angin bergerak berasal dari arah tenggara yang sesuai dengan penelitian Habibie dan Fitria (2019), bahwa monsun Australia terjadi pada bulan JJA.

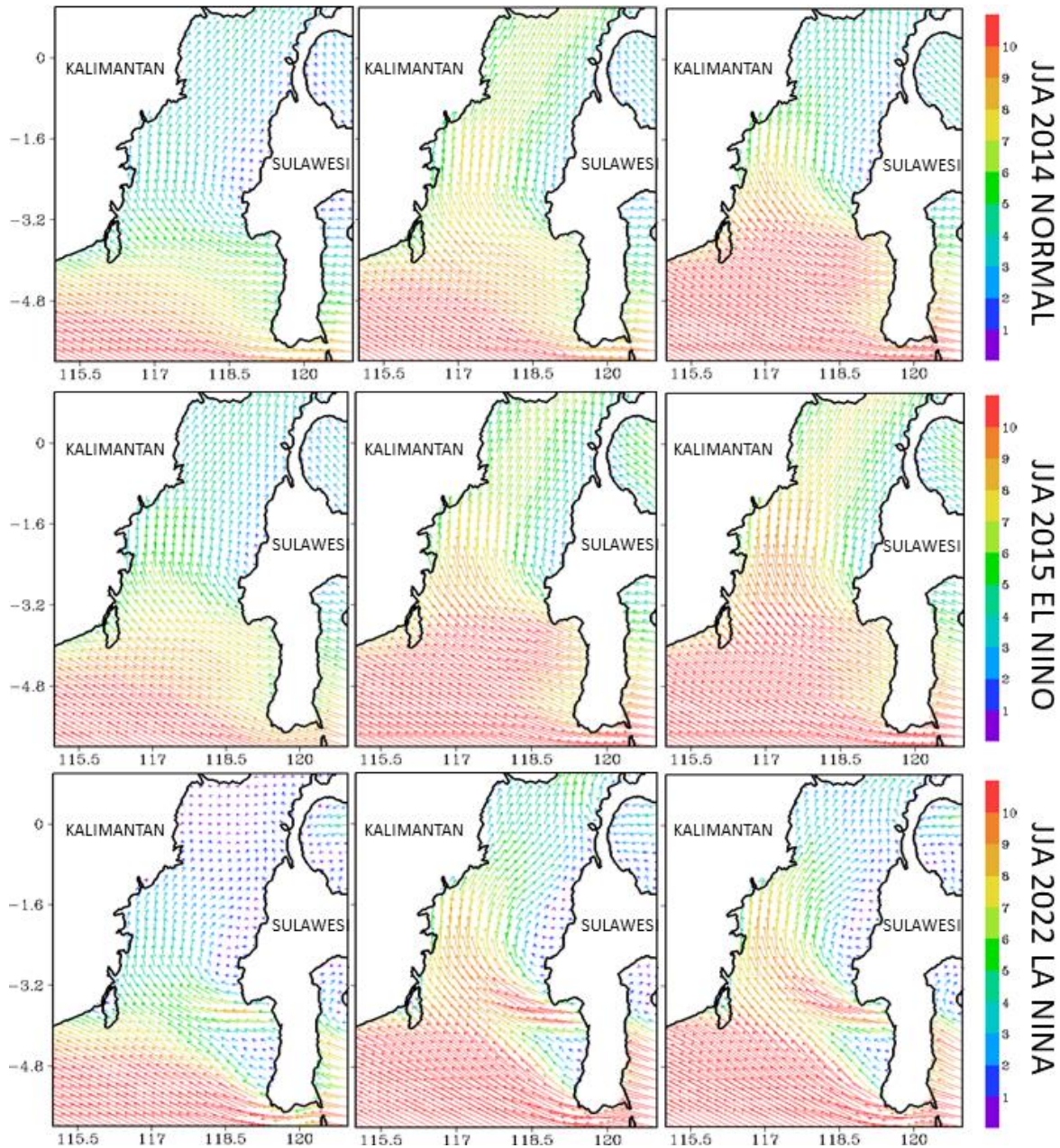
Dari ketiga pola angin pada monsun Australia di atas menunjukkan di wilayah Selat Makassar bagian utara kecepatan rata-rata bulanannya tertinggi pada bulan Juni pada fase La Niña, pada bulan Juli terjadi pada fase Normal, dan bulan Agustus pada saat fase El Niño. Kecepatan rata-rata bulanan di wilayah Selat Makassar bagian tengah pada bulan Juni terjadi pada fase El Niño, pada bulan Juli terjadi saat fase El Niño, dan pada bulan Agustus terjadi pada saat fase El Niño. Sedangkan kecepatan rata-rata bulanan tertinggi untuk wilayah bagian selatan pada bulan Juni terjadi saat fase El Niño, pada bulan Juli terjadi saat fase El Niño, dan bulan Agustus terjadi pada fase Normal.

Secara umum dari seluruh bagian wilayah Selat Makassar kecepatan angin meningkat teratur pada fase El Niño, sedangkan pada fase La Niña cenderung lebih rendah dari fase Normal dan El Niño. Sehingga dapat disimpulkan bahwa untuk seluruh wilayah Selat Makasar rata-rata 3 bulanan periode monsun Autraslia (JJA) kecepatan angin tertinggi terjadi pada fase El Niño dan terendah pada fase La Niña.

Hasil komparasi angin spasial bulan Desember, Januari, dan Februari (DJF) ditunjukkan pada Gambar 4. Secara umum angin bertiup dari arah Barat hingga Utara. Wilayah bagian Utara angin bertiup dari utara ke arah selatan hingga menuju wilayah Selat Makassar bagian tengah kemudian dibelokkan ke arah tenggara menuju wilayah bagian selatan sehingga di bagian wilayah ini merupakan wilayah pertemuan angin dari barat dan utara. Dilihat dari arah datangnya angin yang terjadi pada bulan DJF ini menunjukkan pola angin monsun yang sedang aktif adalah monsun Asia (Habibie dan Fitria, 2019).

Dari ketiga pola angin di atas menunjukkan di wilayah Selat Makassar bagian utara pada bulan Juni nilai kecepatan angin rata-rata bulanan tertinggi pada fase La Niña, pada bulan Juli terjadi pada fase El Niño, dan bulan Agustus saat fase El Niño. Kecepatan angin rata-rata bulanan tertinggi di wilayah Selat Makassar bagian tengah pada bulan Juni terjadi pada fase La Niña, pada bulan Juli terjadi saat fase El Niño, dan pada bulan Agustus terjadi pada saat fase El Niño. Sedangkan kecepatan angin rata-rata bulanan tertinggi untuk wilayah bagian selatan pada bulan Juni terjadi saat fase Normal, pada bulan Juli terjadi saat fase La Niña, dan bulan Agustus terjadi pada fase La Niña. Secara umum dari seluruh bagian wilayah Selat Makassar kecepatan angin rata-rata 3 bulanan DJF tertinggi pada fase La Niña, kecuali wilayah bagian selatan Selat Makassar yaitu terjadi pada fase El Niño.

Berdasarkan gambar di atas terlihat pada wilayah Selat Makassar bagian utara pada bulan Juni, Juli dan Agustus (JJA) gelombang tertinggi terjadi pada fase La Niña. Untuk bagian tengah gelombang tertinggi pada bulan Juni, Juli, dan Agustus terjadi saat fase La Niña. Namun Selat Makassar bagian selatan gelombang tertinggi pada bulan Juni, Juli, dan Agustus juga terjadi pada fase La Niña. Sehingga dapat disebutkan bahwa kefinggian gelombang maksimum di Selat Makassar periode bulan JJA terjadi saat fase La Niña.

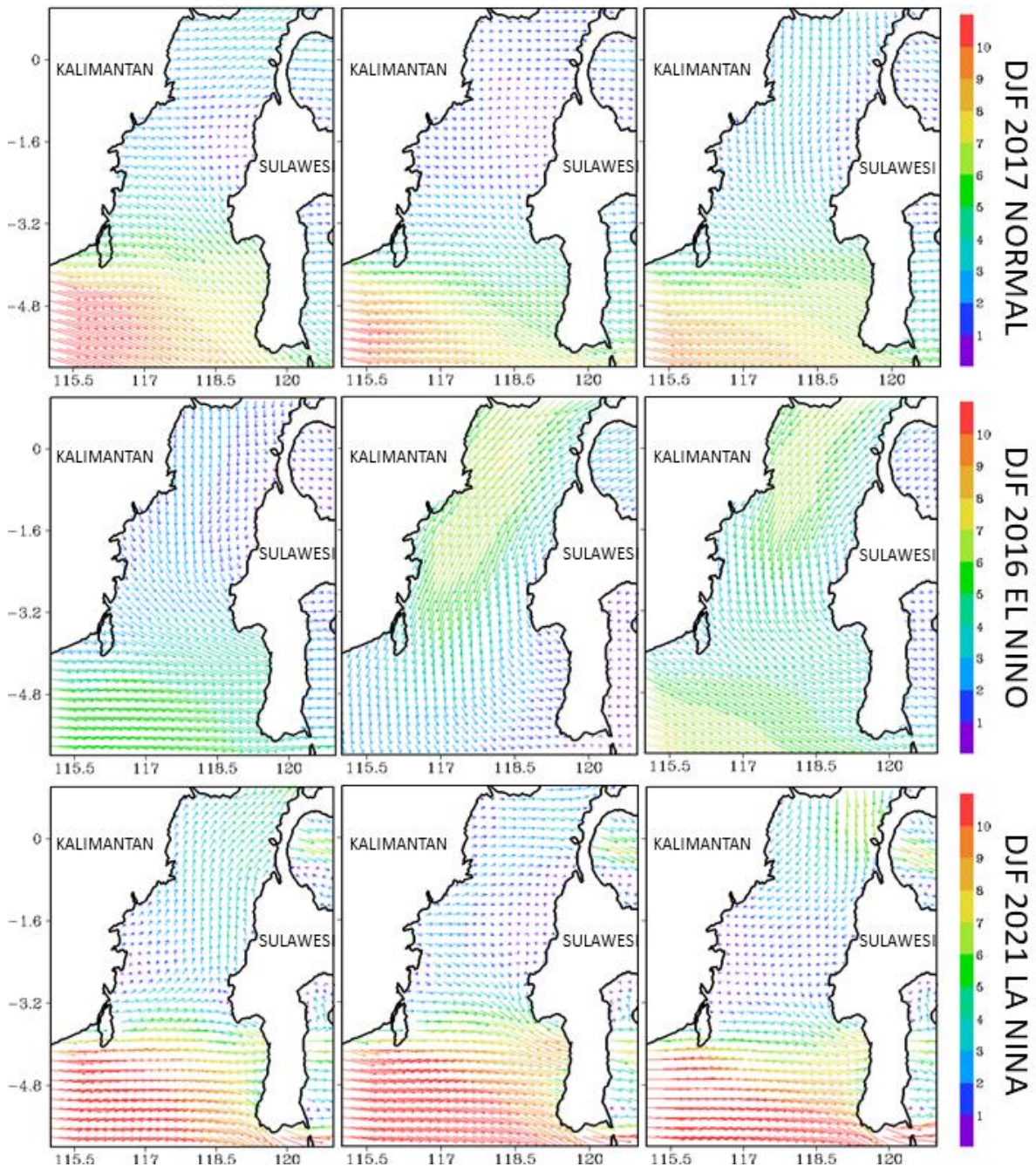


Gambar 3. Komposit spasial angin periode bulan JJA (a). Normal (b). El Niño (c). La Niña

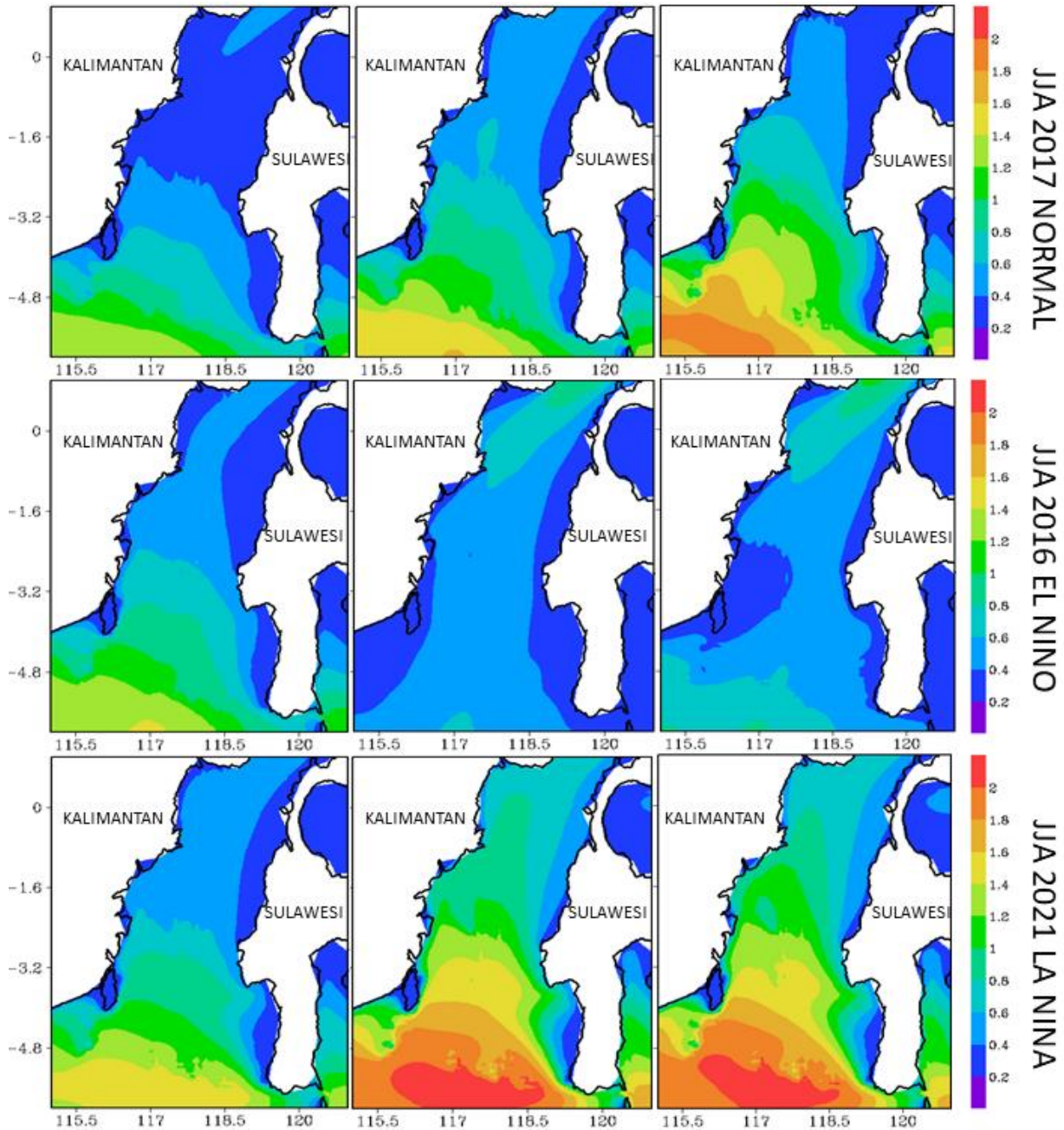
Komposit data gelombang *hindcast*-OFS Selat Makassar di petakan memeperlihatkan ketinggian gelombang spasial periode bulan Juni, Juli, Agustus (JJA) yang ditunjukkan pada Gambar 5. dan periode bulan Desember, Januari, Agustus (DJF) ditunjukkan pada Gambar 6.

Pada saat monsun Australia aktif (JJA) fase La Niña angin bertiup dari Australia ke Asia maka wilayah selatan ekuator ditambah pengaruh dari meningkatnya angin pasat tenggara sehingga mendukung ketinggian gelombangnya mencapai tinggi yang maksimum akibat *fetch* yang terbentuk panjang (Habibie dan Fitria, 2019). Sesuai dengan penelitian Kurniawan et. al., (2013) yang membuktikan bahwa Selat Makassar rentang dengan tinggi gelombang yang maksimum pada periode JJA. Pada periode JJA saat fase La Niña wilayah Selat Makassar mendapatkan pengaruh kuatnya angin pasat tenggara.

Berdasarkan gambar di atas terlihat pada wilayah Selat Makassar bagian utara gelombang tertinggi pada bulan Desember terjadi pada fase El Niño, bulan Januari terjadi pada fase La Niña, dan bulan Februari pada fase La Niña. Untuk bagian tengah gelombang tertinggi pada bulan Desember terjadi saat fase La Niña, pada bulan Januari saat fase La Niña, dan bulan Februari terjadi saat fase El Niño. Namun Selat Makassar bagian selatan gelombang tertinggi pada bulan Desember terjadi saat fase La Niña, bulan Januari saat fase La Niña, dan bulan Februari juga terjadi pada fase La Niña. Sehingga dapat disebutkan bahwa periode bulan DJF gelombang tertinggi di sebagian besar wilayah Selat Makassar terjadi saat fase La Niña. Pada saat periode DJF fase La Niña terjadi angin pasat tenggara yang meningkat dan di Selat Makassar bertiup angin



Gambar 4. Komposit spasial angin periode bulan DJF (a). Normal (b). El Niño (c). La Niña

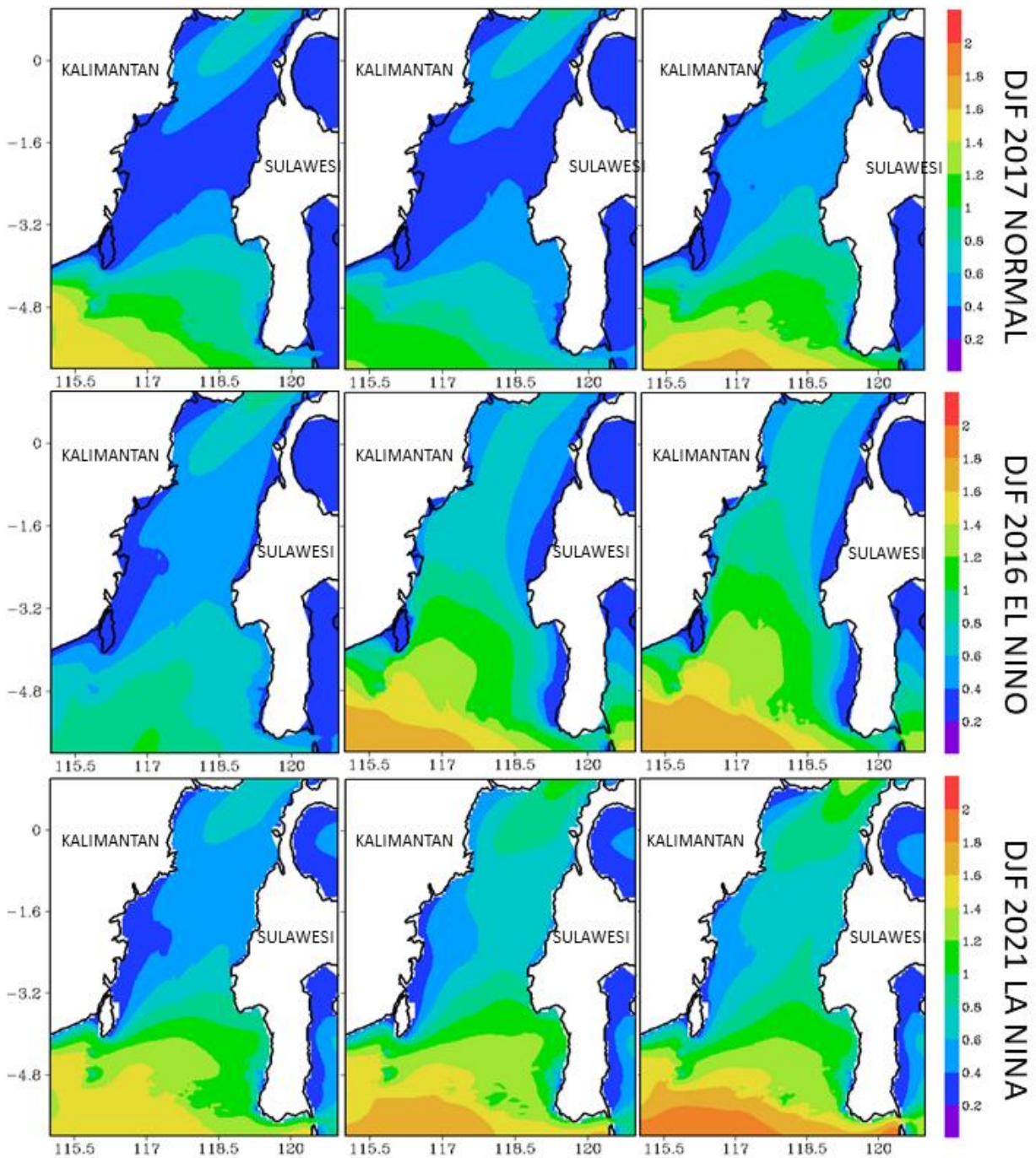


Gambar 5. Komposit spasial gelombang maksimum bulanan periode bulan JJA (a). Normal (b). El Niño (c). La Niña

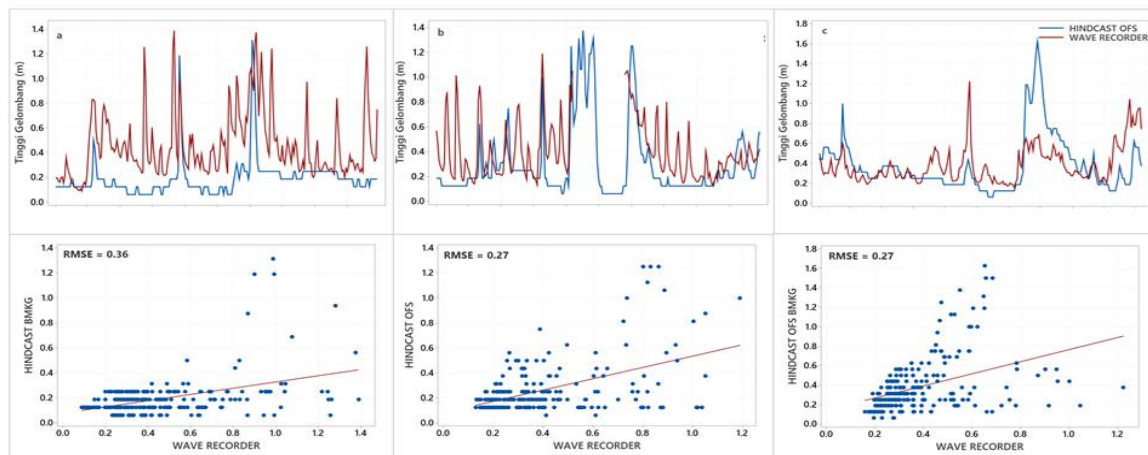
monsunnya berasal dari barat hanya di wilayah bagian selatannya saja yang membetuk *fetch* panjang karena luasan areanya, sehingga gelombang tinggi yang terjadi pada wilayah Selat Makassar bagian selatan. Untuk bagian tengah dan utara Selat Makassar terjadi peningkatan angin pasat dan angin monsun Australia.

Dari setiap periode JJA maupun DJF pada Gambar 5. dan Gambar 6. ketinggian gelombang berdasarkan wilayahnya, dapat dijabarkan sebagai berikut; Selat Makassar bagian utara memiliki ketinggian yang relatif paling rendah dibandingkan dengan wilayah lainnya, sedangkan tinggi gelombang tertinggi terjadi di wilayah bagian Selatan. Persistensi kecepatan tertinggi dan arah angin yang homogen serta luasnya wilayah Selat Makassar bagian selatan

menyebabkan tingginya gelombang di wilayah tersebut mencapai maksimum (Mirzaei *et al.*, 2013). Labania (2021) menyebutkan bahwa tinggi gelombang maksimum terjadi di Selat Makassar bagian barat, tengah dan selatan karena faktor angin yang bergerak secara konsisten dengan kecepatan tinggi dan arah yang sama pada musim timur (JJA) dan musim barat (DJF). Ini membuktikan bahwa ketinggian gelombang sangat dipengaruhi oleh angin. Di mana gelombang laut yang dihasilkan oleh angin bergantung pada kecepatan, waktu dan luas areanya, semakin cepat, semakin lama dan semakin luas area angin berhembus maka semakin besar gelombang yang dihasilkan (Pond dan Pickard, 1983; Von Arx dan Dwight, 1962).



Gambar 6. Komposit spasial Gelombang periode bulan DJF (a). Normal (b). El Niño (c). La Niña



Gambar 7. Validasi data reanalisis *Hindcast OFS* terhadap data Wave Recorder

Meskipun Selat Makassar memiliki variasi tinggi gelombang yang cukup rendah (Habibie dan Fitria, 2019; Purwanto *et al.*, 2021) namun dapat terlihat polanya. Seperti hasil pemetaan oleh Labania pada tahun 2021 pola gelombang laut Selat Makassar membentuk pola tren yang mengikuti pola musunnya yaitu mengalami 2 puncak ketinggian gelombang (Habibie dan Fitria, 2019; Mirzaei *et al.*, 2013). Kedua puncak tersebut terjadi pada periode JJA dan periode DJF dengan ketinggian maksimumnya terjadi pada periode JJA. Hasil pemetaan komposit *Hindcast-OFS* ini menunjukkan ketinggian pada periode bulan JJA lebih tinggi dari periode bulan DJF.

Pada saat monsun Australia aktif (JJA) angin bertiup dari Australia ke Asia maka wilayah selatan ekuator ketinggian gelombangnya mencapai tinggi yang maksimum akibat *fetch* yang terbentuk panjang (Habibie dan Fitria, 2019). ini juga sesuai dengan penelitian Kurniawan *et al.* (2013) yang membuktikan bahwa Selat Makassar rentang dengan tinggi gelombang yang maksimum pada periode JJA. Di selatan ekuator pada saat monsun Asia aktif (DJF) angin bertiup lebih lemah dikarenakan adanya pembelokan gaya koriolis dari rotasi bumi saat melalui wilayah ekuator dan adanya daratan sehingga mempengaruhi panjangnya *fetch* yang lebih pendek (Habibie dan Fitria, 2019a). hal ini sesuai dengan pengamatan Kurniawan *et al.* (2013) yang menghitung korelasi koefisien tinggi gelombang bernilai rendah untuk daerah Selat Makassar pada periode DJF.

Berdasarkan validasi data gelombang dari *hindcast OFS* terhadap data observasi insitu menggunakan *wave recorder* (Gambar 7.), secara umum menunjukkan hasil yang cukup baik. Pola kenaikan dan penurunan gelombang terhadap waktu. Pada kedua data memiliki kemiripan meskipun terdapat perbedaan besaran nilai fluktuasi. Berdasarkan nilai sebaran kedua data tersebut nilai *root mean square error* (RMSE) berada pada rentang 0.27 hingga 0.36. Hal ini menandakan data *Hindcast OFS* memiliki tingkat kepercayaan yang tinggi sebagai data pengamatan dari numerik yang memperlihatkan dengan jelas konsisten pola angin timuran dan baratan dan tinggi gelombang saat monsun JJA dan DJF (Patra *et al.*, 2020; Shuzong *et al.*, 2017). *Hindcast OFS* juga menunjukkan kuatnya variabilitas antar tahunan, saat El Niño dan La Niña terjadi perubahan tinggi gelombang dari normalnya.

KESIMPULAN

Data *Hindcast-OFS* dapat mengimplementasikan dengan baik peta arah dan kecepatan angin serta tinggi gelombang dengan tingkat kesalahan yang cukup rendah 0.27 – 0.36. Selat Makassar memiliki karakteristik gelombang dengan ketinggian yang maksimum mencapai 2 – 3

meter pada bagian selatan baik pada fase Normal, El Niño maupun La Niña periode JJA maupun DJF. Ketinggian gelombang Selat Makassar bagian tengah dan Utara mengalami peningkatan yang relatif kecil bahkan cenderung stabil. Ketinggian gelombang secara musonal meningkat jika terjadi fase La Niña. Maka fase La Niña sangat berpengaruh pada ketinggian gelombang di Selat Makassar. Variabilitas iklim ENSO sangat mempengaruhi variabilitas monsun sehingga berpengaruh pada tinggi gelombang.

DAFTAR PUSTAKA

- Afriady, A., Alam, T.M., & Ismail, M.F.A. (2019). Pemanfaatan Data Angin Untuk Karakteristik Gelombang Laut Di Perairan Natuna Berdasarkan Data Angin tahun 2009-2018. *Buletin Oseanografi Marina*, 8(2), 55-60. doi: 10.14710/buloma.v8i1.25304
- Aldrian, E., & Susanto, R.D. (2003) Identification of Three Dominant Rainfall Regions Within Indonesia and Their Relationship to Sea Surface Temperature. *International Journal of Climatology*, 23(12), 1435–1452. doi: 10.1002/joc.950
- Aldrian, E. (2008). Meteorologi Laut Indonesia. Badan Meteorologi dan Geofisika. Jakarta. pp.242-243.
- Dewi, Y. W., Wirasatriya, A., Sugianto, D. N., Helmi, M., Marwoto, J., & Maslukah, L. (2020). Effect of ENSO on the Variability of Sea Surface Temperature (SST) in Java Sea. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 530(1), p.012007. doi: 10.1088/1755-1315/530/1/012007
- Fang, G., Chen, H., Wei, Z., Wang, Y., Wang, X., & Li, C. (2006) Trends and Interannual Variability of The South China Sea Surface Winds, Surface Height, and Surface Temperature in The Recent Decade. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 111(11), 1–16. doi: 10.1029/2005JC003276
- Habibie, M.N., & Fitria, W. (2019). Kajian Indeks Variabilitas Tinggi Gelombang Signifikan Di Indonesia. *Jurnal Segara*, 14(3), 159–168. doi: 10.15578/segara.v14i3.6650
- Hidayat, A.M., Efendi, U., Agustina, L., & Winarso, P.A. (2018). Korelasi Indeks Nino 3.4 Dan Southern Oscillation Index (Soi) Dengan Variasi Curah Hujan Di Semarang, *Jurnal Sains dan Teknologi Modifikasi Cuaca*, 19(2), 75-81. doi: 10.29122/jstmc.v19i2.3143
- Hutabarat, M.F., Purba, N.P., Astuty, S., Syamsuddin, M.L., & Kuswardani, A.R.T.D. (2018). Variabilitas Lapisan Lapisan Termoklin Terhadap Kenaikan Mixed Layer Depth (MLD) Di Selat Makassar. *Jurnal Perikanan Kelautan*, 9(1), 9–21.
- Joseph, D., & Kumar, V.S. (2021). Response of Ocean Surface Waves to the Co-Occurrence of Boreal Summer Intra-Seasonal Oscillation and El Niño Southern Oscillation. *Climate Dynamics*, 57(3–4), 1155–1171. doi: 10.1007/s00382-021-05763-3
- Kumar, P., Kaur, S., Weller, E., & 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*, 124(8), 6176–6199. doi: 10.1029/2019JC015391
- Kunarso, Ismanto, A., Putra Situmorang, R., & Yulina Wulandari, S. (2018). Variability of Upwelling in Bone Bay and Flores Sea. *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 9(10), 742–751.
- Kurniawan, R. (2012). Karakteristik Gelombang Laut di Indonesia, Program Studi Ilmu Matematika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Indonesia, Jakarta.
- Kurniawan, R., Permana, D.S., & Habibie, N. (2013). Verifikasi Luaran Model Gelombang Windwaves-05 dengan Satelit Altimeter. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 14(3), 149-158. doi: 10.31172/jmg.v14i3.166
- Labania, H., Mudin, Y., Rahman, A., Sabhan, & Pranowo, W.S. (2021). Analysis of Seasonal Variability of Wave Height in Makassar Strait, *Journal of Physics Conference Series*, 1763(1), p.012031. doi: 10.1088/1742-6596/1763/1/012031
- Labania, H., Sunarto, S., & Khakhim, N. (2019). Kajian Spasial Variabilitas Karakteristik Gelombang Laut di Perairan Selat Makassar. Repository. Universitas Gadjah Mada. p.224.
- Lim, Y.K., & Kim, K.Y. (2007). ENSO Impact on the Space–Time Evolution of the Regional Asian Summer Monsoons. *Journal of Climate*, 20(11), 2397–2415. doi: 10.1175/JCLI4120.1
- McPhaden, M.J., Zebiak, S.E., & Glantz, M.H. (2006) ENSO as an Integrating Concept in Earth Science. *Science*, 314(5806), 1740–1745. doi: 10.1126/science.1132588
- Mirzaei, A., Tangang, F., Juneng, L., Mustapha, M.A., Husain, M.L., & Akhir, M.F. (2013). Wave climate simulation for southern region of the South China Sea. *Ocean Dynamics*, 63(8), 961–977. doi:

10.1007/s10236-013-0640-2

- ONI, https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- 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), 1–20. doi: 10.1029/2020JC016754
- Pond, S., & Pickard, G.L. (1983). *Introductory dynamical oceanography*. Gulf Professional Publishing. doi: 10.1016/B978-0-08-057054-9.50018-3
- Purwanto, P., Sugianto, D.N., Zainuri, M., Permatasari, G., Atmodjo, W., Rochaddi, B., Ismanto, A., Wetchayont, P. & Wirasatriya, A. (2021). Seasonal Variability of Waves Within the Indonesian Seas and Its Relation With the Monsoon Wind. *Ilmu Kelautan: Indonesian Journal of Marine Sciences*, 26(3), 189–196. doi: 10.14710/ik.ijms.26.3.189-196.
- Ramadhan, F., Kunarso, K., Wirasatriya, A., Maslukah, L., & Handoyo, G. (2021) Perbedaan Kedalaman dan Ketebalan Lapisan Termoklin pada Variabilitas ENSO, IOD dan Monsun di Perairan Selatan Jawa. *Indonesian Journal of Oceanography*, 3(2), 214–223. doi: 10.14710/ ijoce.v3i2.11392
- Santoso, A., Mcphaden, M.J., & Cai, W. (2017). The Defining Characteristics of ENSO Extremes and the Strong 2015/2016 El Niño. *Reviews of Geophysics*, 55(4), 1079–1129. doi: 10.1002/2017RG000560
- Sebayang, I.S.D., & Kurniadi, A., (2015) Identifikasi Dan Analisis Kerusakan Garis Pantai Tanjung Pasir di Kabupaten Tangerang, Banten. *Rekayasa Sipil*, 4(1), 11–20.
- Shuzong, Ha., Yongbin, F., Yangyang, D., & Shuangquan, W. (2017). A study on The Relationships Between The Wave Height and The El Niño in The North Area of The South China Sea. *Acta Oceanologica Sinica*, 36(5), 44–50. doi: 10.1007/s13131-017-1059-2.
- Suroso, D.S.A., & Firman, T. (2018). The role of spatial planning in reducing exposure towards impacts of global sea level rise case study: Northern coast of Java, Indonesia. *Ocean and Coastal Management*, 153, 84–97. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2017.12.007
- Tu, S., Chan, J.C.L., Xu, J., & Zhou, W. (2022). Opposite Changes in Tropical Cyclone Rain Rate During the Recent El Niño and La Niña Years. *Geophysical Research Letters*, 49(6), p.e2021GL097412. doi: 10.1029/2021GL097412
- Umpel, I.F., Mamoto, J.D., & Jasin, M.I., (2015) Studi Karakteristik Gelombang Pada Daerah Pantai Matani Satu. *Jurnal Sipil Statik*, 3(9), 651–661.
- Von Arx, W.S., & Dwight, C.H. (1962). An Introduction to Physical Oceanography. *American Journal of Physics*, 30(10), 775–776. doi: 10.1119/1.1941791
- Wijaya, P.H., & Kusnida, D.D. (2009) Tinjauan Geotektonik Selat Makassar Utara, Implikasinya Terhadap Potensi Hidrokarbon Laut Dalam Cekungan Kutai Kalimantan Timur. *Jurnal Geologi Kelautan*, 7(3), p.230469. doi: 10.32693/jgk.7.3.2009.176
- WMO. (2018). WMO Statement on the Status of the Global Climate in 2017. World Meteorological Organization.
- Zheng, F., Yuan, Y., Ding, Y., Li, K., Fang, X., Zhao, Y., Sun, Y., Zhu, J., Ke, Z., Wang, J., & Jia, X. (2022). The 2020/21 Extremely Cold Winter in China Influenced by the Synergistic Effect of La Niña and Warm Arctic. *Advances in Atmospheric Sciences*, 39(4), 546–552. doi: 10.1007/s00376-021-1033-y