

KAJIAN DAERAH RAWAN GELOMBANG TINGGI DI PERAIRAN INDONESIA

STUDY ON HIGH WAVE PRONE AREAS OVER INDONESIAN WATERS

Roni Kurniawan*, M. Najib Habibie, Donald S. Permana

Pusat Penelitian dan Pengembangan BMKG

Jl. Angkasa I/No.2 Kemayoran, Jakarta 10720 – INDONESIA

**E-mail : ronie_354@yahoo.co.id*

Naskah masuk: 11 Oktober 2012; Perbaikan terakhir: 19 Desember 2012; Naskah diterima: 21 Desember 2012

ABSTRAK

Berkaitan dengan pentingnya informasi tentang gelombang laut, terutama bagi keselamatan beragam kegiatan di laut, berdasarkan data periode tahun 2000-2010, dilakukan studi tentang gelombang tinggi di perairan Indonesia. Hasil studi menunjukkan bahwa variasi spasial dan temporal tinggi gelombang dan frekuensi terjadinya gelombang tinggi mempunyai pola yang berasosiasi dengan siklus angin musonal, periode monsun Australia (Desember, Januari, Februari) dan monsoon Australia (Juni, Juli, Agustus). Daerah rawan gelombang tinggi pada periode monsun Asia umumnya lebih luas daripada pada periode monsun Australia. Pada periode peralihan antar monsun, sebagian besar wilayah perairan Indonesia tidak rawan gelombang tinggi. Daerah rawan gelombang tinggi pada periode peralihan antar monsun umumnya lebih sempit dan terdapat di perairan Indonesia yang menjadi bagian dari Laut Cina Selatan, Samudera Pasifik dan Samudera Hindia, terutama selatan Jawa sampai Bengkulu. Meskipun korelasinya tidak signifikan, berlangsungnya El-Nino menyebabkan meningkatnya tinggi gelombang di wilayah perairan Indonesia bagian timur, terutama utara ekuator dan berlangsungnya La-Nina menyebabkan meningkatnya tinggi gelombang di perairan Indonesia yang berada di Samudera Hindia terutama di selatan Jawa. Sedangkan terjadinya IODM negatif menyebabkan meningkatnya tinggi gelombang di perairan barat Sumatera sebelah utara ekuator.

Kata kunci: gelombang tinggi, monsun, El Nino, La Nina, IODM

ABSTRACT

Related to the importance of information about ocean waves, especially for the safety of a variety activities at sea, based on data in the period 2000-2010 obtained by numerical wave model, conducted a study of high waves in the Indonesian waters. The study shows that the spatial and temporal variations in wave height and frequency of high waves have a pattern associated with monsoonal wind cycle, Australia monsoon period (December, January, February) and the Australian monsoon (June, July, August). High waves prone areas in the period of monsoon Asia are generally wider than the Australia monsoon period. In the transitional period between monsoons, most of the Indonesian territorial waters are not high waves prone areas. High waves prone areas in the transitional period between monsoons are generally narrower and it were in the Indonesian waters, which became part of the South China Sea, Pacific Ocean and Indian Ocean, particularly southern part of Java to Bengkulu. Although the correlation is not significant, El-Nino led to an increasing wave height in the eastern waters of Indonesia, especially north of the equator and La-Nina led to an increasing wave height in the Indonesian waters around the Indian Ocean, especially in the southern part of Java, while the negative IODM caused increasing wave height in the northern equator of western part of Sumatra waters.

Keywords: high waves, monsoon, El Nino, La Nina, IODM

1. Pendahuluan

1.1. Latar belakang

Indonesia merupakan negara kepulauan terbesar di dunia yang terdiri dari lima pulau besar dan ribuan pulau kecil yang beragam bentuk dan ukuran, dan secara keseluruhan 70% wilayah teritorial Indonesia adalah lautan, sehingga kehidupan sehari-hari penduduk Indonesia sangat berhubungan dengan laut. Wilayah Indonesia juga terletak diantara benua Asia dan Australia serta diapit oleh Samudera Hindia dan Pasifik, kondisi ini membuat wilayah laut Indonesia mempunyai posisi yang sangat strategis dalam rute pelayaran internasional untuk kepentingan perekonomian dunia.

Gelombang merupakan faktor yang penting dalam pelayanan informasi meteorologi kelautan (*marine meteorological services*) [1]. Sering terjadinya gelombang tinggi tentu dapat menyebabkan terganggunya aktifitas nelayan, transportasi laut antar pulau yang dapat berdampak pada kehidupan masyarakat di darat, seperti kelangkaan bahan pangan di beberapa pulau kecil dan terganggunya berbagai aktifitas pembangunan karena terhambatnya suplai bahan-bahan konstruksi.

Akibat adanya gelombang tinggi tersebut dapat dikurangi atau dapat dicegah apabila informasi karakteristik gelombang di setiap wilayah perairan Indonesia dipahami dengan baik, sehingga kegiatan-kegiatan kelautan dapat direncanakan dengan lebih baik dan efisien. Oleh karena itu kajian tentang informasi karakteristik gelombang dan daerah rawan gelombang tinggi di Indonesia perlu dilakukan guna memperoleh informasi yang diperlukan dalam menunjang perencanaan berbagai kegiatan kelautan.

Wilayah Indonesia merupakan wilayah monsun [2], yang ditandai oleh sistem angin musim yang secara periodik berbalik arah enam bulan sekali. Sistem angin ini mempunyai variasi antar musim yang juga dipengaruhi oleh fenomena global seperti El Nino/La Nina dan *Indian Ocean Dipole Mode* (IODM). Variabilitas monsun dan kompleksitas wilayah Indonesia menyebabkan adanya variasi spasial dan temporal arah dan kecepatan angin yang berpengaruh terhadap dinamika laut di wilayah Indonesia. Dinamika atmosfer di wilayah Indonesia yang kompleks tersebut menimbulkan pertanyaan-pertanyaan yang dipandang penting dan perlu di lakukan kajian diantaranya adalah pertanyaan tentang karakteristik gelombang seperti; kapan, dimana sering terjadi gelombang tinggi, berapa tingginya, daerah-daerah rawan gelombang tinggi dan bagaimana pengaruh fenomena El Nino/La Nina dan IODM terhadap tinggi gelombang di perairan Indonesia.

Tujuan dari penelitian ini adalah untuk Mengetahui karakteristik gelombang laut di perairan Indonesia, mengidentifikasi daerah-daerah rawan gelombang tinggi di perairan Indonesia, Mengetahui hubungan fenomena El Nino/La Nina di Samudera Pasifik, dan *Indian Ocean*

Dipole Mode (IODM) di Samudera Hindia dengan tinggi gelombang di perairan Indonesia.

1.2. Gelombang laut

Di lautan terdapat banyak jenis gelombang, baik ditinjau dari faktor penyebab maupun gaya pengembalinya (*restoring force*). Diantara sekian banyak gelombang yang menjadi perhatian dalam pelayanan informasi meteorologi kelautan adalah tiga jenis gelombang yaitu gelombang akibat angin, gempa bumi (tsunami) dan akibat gaya tarik menarik bumi-bulan-matahari atau disebut dengan gelombang tidal atau pasang surut [1].

Di banding jenis gelombang lainnya, gelombang akibat angin merupakan gelombang yang paling dominan terjadi di permukaan laut, baik ditinjau dari frekuensi kejadiannya maupun energinya [3]. Keberadaan gelombang akibat angin di permukaan laut mempengaruhi hampir semua kegiatan di laut, dan karena itu informasi tentang gelombang ini merupakan bagian terpenting dalam pelayanan informasi meteorologi kelautan.

Dalam praktek meteorologi kelautan, sering digunakan terminologi tinggi gelombang signifikan untuk menyatakan tinggi gelombang laut. Berdasarkan rekaman data, tinggi gelombang signifikan didefinisikan sebagai tinggi rata-rata 1/3 dari gelombang-gelombang tertinggi, yang nilainya setara dengan tinggi gelombang hasil observasi visual [4]. Tinggi gelombang signifikan biasa di simbolkan dengan $H_{1/3}$ atau H_s .

1.3. Sirkulasi atmosfer di Indonesia

Wilayah Indonesia sering disebut sebagai wilayah benua maritim (*maritime continent*) karena terdiri atas ribuan pulau yang dibatasi oleh laut dengan topografi yang umumnya bergunung-gunung [2]. Wilayah benua maritim Indonesia dipengaruhi oleh tiga sirkulasi atmosfer yaitu sirkulasi atmosfer meridional (sirkulasi Hadley), sirkulasi atmosfer zonal (Sirkulasi Walker), dan sirkulasi atmosfer lokal (konveksi). Sirkulasi meridional (Hadley) yang menjadi monsun, sirkulasi zonal (Walker) yang mengindikasikan kejadian *El Nino Southern Oscillation* (ENSO) dan *Indian Ocean Dipole Mode* (IODM), serta sirkulasi lokal akibat konveksi.

Monsun adalah sistem sirkulasi regional yang mempunyai variasi musiman, monsun ditandai oleh pembalikan musiman sistem angin utama, yang diartikan sebagai perubahan arah gaya gradient tekanan permukaan dan cuaca utama ketika musim panas (*summer*) dan ketika musim dingin (*winter*) [5]. Menurut Aldrian [6], penyebab utama dari fenomena ini adalah pergerakan titik kulminasi matahari terhadap bumi yang bergerak utara-selatan dan terciptanya kontras tekanan dan suhu antara benua dan samudera. Ditinjau dari kemantapan arah dan kecepatan angin monsun, maka di Indonesia dikenal dua

musim yang meliputi bulan Desember, Januari, Februari dan Juni, Juli, Agustus [5]. Keadaan monsun di wilayah Indonesia ditandai dengan berhembusnya secara tetap sirkulasi angin untuk satu periode tertentu (minimal 3 bulan) dan pada periode yang lain arah anginnya hampir berlawanan. Pada musim transisi antar kedua monsun yang terjadi pada Maret-April-Mei (MAM) dan September-Oktober-Nopember (SON), arah dan kecepatan angin bertiup tidak menentu [7].

1.4 El Nino Southern Oscillation

Secara umum para ahli membagi ENSO menjadi ENSO hangat (El Nino) dan ENSO dingin (La Nina). El Nino dan La Nina adalah fenomena alam yang terkait dengan peristiwa anomali iklim ekstrem dalam variabilitas iklim. Kondisi tanpa kejadian ENSO biasanya disebut sebagai kondisi normal.

El Nino adalah gejala penyimpangan (anomali) pada suhu permukaan Samudra Pasifik di pantai Barat Ekuador dan Peru yang lebih tinggi daripada rata-rata normalnya. Fenomena yang teramati adalah meningkatnya SPL yang biasanya dingin. Akibat adanya perubahan suhu permukaan laut di Pasifik ekuator, maka terjadi pula perubahan arah angin dan pergeseran kolom penarikan dan penurunan udara dari sirkulasi Walker dan ada saat yang bersamaan terjadi perubahan pola tekanan udara yang mempunyai dampak sangat luas dengan gejala yang berbeda-beda, baik bentuk dan intensitasnya. Kejadian ini dapat mempengaruhi iklim dunia. La Nina merupakan kebalikan dari El Nino ditandai dengan anomali suhu muka laut di daerah tersebut negatif / lebih dingin dari rata-ratanya (gejala penyimpangan/ anomali pada suhu permukaan Samudra Pasifik di pantai Barat Ekuador dan Peru berupa penurunan suhu). La Nina secara umum akan menyebabkan curah hujan di Indonesia meningkat.

Terjadinya El Nino dianggap sebagai faktor pengganggu sirkulasi monsun yang berlangsung di Indonesia, dan pengaruhnya sangat terasa yaitu timbulnya bencana kekeringan yang meluas. Pada saat berlangsung El Nino, terjadi penguatan angin baratan di Pasifik barat daerah ekuator mulai dari sebelah utara Papua hingga Pasifik Tengah.

1.4 Indian Ocean Dipole Mode

Indian Ocean Dipole mode yang disingkat IODM atau sering dilafalkan sebagai DM saja, merupakan fenomena yang mirip dengan ENSO tetapi terjadi di Samudera Hindia. Peristiwa *dipole mode* ditandai adanya perbedaan anomali suhu permukaan laut antara Samudera Hindia tropis bagian barat dengan Samudera Hindia tropis bagian timur. Anomali SST ini memiliki kondisi yang lebih dingin dari normal dan muncul dipantai barat Sumatera (Samudera Hindia bagian timur), sementara di Samudera Hindia bagian barat menjadi lebih panas dari biasanya.

Variasi dampak IODM dan interaksinya dengan monsun sangat beragam dan merupakan fungsi waktu dan tempat. Untuk mengetahui kekuatan IODM maka dapat dihitung dengan indeks yang disebut dengan Indeks Dipole Mode yang digunakan oleh Saji et.al., [8]. Indeks ini berupa dipole anomali SST yang didefinisikan sebagai perbedaan anomali SST Samudera Hindia bagian barat ($50^{\circ} - 70^{\circ}$ BT, 10° LS – 10° LU) dan Samudera Hindia bagian timur ($90^{\circ} - 110^{\circ}$ BT, 10° LS – ekuator). Mekanisme IODM bermula dari munculnya anomali SST negatif di sekitar selat Lombok hingga selatan Jawa pada bulan Mei – Juni, bersamaan terjadi anomali angin tenggara yang lemah di sekitar Jawa dan Sumatera. Anomali terus menguat (Juli–Agustus) dan meluas sampai ke ekuator sepanjang pantai selatan Jawa hingga pantai barat Sumatera. Kondisi diatas dibarengi munculnya anomali positif SST di Samudera Hindia bagian barat. Adanya dua kutub di Samudera Hindia ekuator ini, semakin memperkuat anomali angin tenggara di sepanjang ekuator dan pantai barat Sumatera. Siklus puncaknya pada bulan Oktober, dan selanjutnya menghilang dengan cepat pada bulan November – Desember. Dampak IODM untuk wilayah Indonesia baru dikaji kepada dampak terhadap curah hujan, dan masih sedikit yang mengungkap dampaknya terhadap vektor kecepatan angin dan tinggi gelombang.

1.5. Model gelombang Windwaves-05

Berdasarkan panduan WMO [4], untuk keperluan analisa klimatologi gelombang, data dapat diperoleh dari dua sumber utama yaitu: (a) hasil pengukuran dan observasi, dan (b) hasil estimasi berdasarkan data angin (*wave hindcast*). Data hasil pengukuran dan observasi di lautan umumnya sangat terbatas dan tidak kontinyu. Dalam kajian ini digunakan model gelombang Windwaves-05 untuk memperoleh data tinggi gelombang.

Model Windwaves-05 merupakan model generasi II yang dikembangkan berdasarkan model MRI-II (*Marine Research Institute*) dari Jepang dan telah dioperasionalkan di BMKG sejak 2004. Penelitian Suratno [9], menunjukkan bahwa hasil verifikasi model Windwaves-05 dengan data kapal diperoleh korelasi diatas 0,6. Model Windwaves-05 merupakan model *Limited Area*, dimana dalam prosesnya, wilayah yang berada diluar batas posisi yang telah diatur sebelumnya tidak diperhitungkan, sehingga untuk memperoleh data yang baik diperlukan domain yang lebih luas dari fokus penelitian dalam proses *runningnya*, hal ini untuk memperhitungkan kemungkinan adanya perambatan energi gelombang dari wilayah diluar objek penelitian.

2. Metode Penelitian

2.1. Area Penelitian

Batas wilayah yang menjadi kajian dalam penelitian ini berada pada posisi 12° LU – 15° LS, 90° BT- 141° BT

dengan dengan batas terluar Zona Ekonomi Eksklusif (ZEE) wilayah Indonesia.

2.2. Data

Input data model

- Data reanalysis Arah dan kecepatan angin 10 meter periode tahun 2000 – 2010, resolusi spasial $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ ($\pm 111 \times 111$ km) dan resolusi temporal 6 jam dari NCEP-NOAA [10].
- Data Bathimetri, Resolusi $5' \times 5'$ ($\pm 9 \times 9$ km) dari NGDC-NOAA [11].

Index ENSO

- Periode bulanan, tahun 2000 – 2010 dari NCEP-NOAA [12].
- Indeks ENSO diukur dari anomali suhu permukaan laut (SPL) bulanan pada wilayah Nino 3.4. Posisi daerah Niño 3.4 mencakup sebagian daerah Niño 3 dan sebagian daerah Niño 4, terletak pada $120^{\circ} \text{BB} - 170^{\circ} \text{BB}$ dan $5^{\circ} \text{LS} - 5^{\circ} \text{LU}$.

Index IODM

- Periode bulanan, tahun 2000 – 2010 dari JAMSTEC [13].
- Indeks IODM ditentukan dari nilai perbedaan anomali suhu permukaan laut (SPL) Samudera Hindia ekuator bagian barat di perairan pantai timur Afrika pada koordinat $10^{\circ} \text{LU} - 10^{\circ} \text{LS}$; $50^{\circ} \text{BT} - 70^{\circ} \text{BT}$ dengan anomali SPL Samudera Hindia di lepas pantai perairan sebelah barat Sumatera pada koordinat $10^{\circ} \text{LS} - 0^{\circ}$; $90^{\circ} \text{BT} - 110^{\circ} \text{BT}$.

Data pendukung

- Data peta dasar Rupa Bumi Indonesia (RBI) digital Tahun 2010 dari Bakosurtanal.

2.3. Pengolahan dan analisis data

Tinggi gelombang

Tinggi gelombang dihitung dengan menggunakan model Windwaves-05, dengan setting data sebagai berikut:

- Periode tahun : 2000 – 2010
- Domain *running* model : $30^{\circ} \text{LU} - 30^{\circ} \text{LS}$, $75^{\circ} \text{BT} - 155^{\circ} \text{BT}$.
- Domain penelitian: $12^{\circ} \text{LU} - 15^{\circ} \text{LS}$, $90^{\circ} \text{BT} - 141^{\circ} \text{BT}$
- Resolusi Spasial : $10' \times 10'$ ($\pm 18.5 \times 18.5$ km). (Resolusi ini dianggap cukup mewakili informasi tinggi gelombang di perairan Indonesia).
- Resolusi Temporal : tiap 6 jam

Identifikasi gelombang tinggi

Sesuai dengan *Guide the marine Meteorological Services, Third edition* [1], yang menyebutkan bahwa hampir semua jenis kapal yang sedang berlayar akan terpengaruh oleh gelombang dengan tinggi ≥ 2 meter, maka gelombang tinggi didefinisikan sebagai gelombang dengan tinggi signifikan (H_s) dua meter atau lebih.

Penentuan daerah rawan gelombang tinggi

Daerah rawan gelombang tinggi ditentukan berdasarkan frekuensi kejadian gelombang dengan tinggi signifikan ≥ 2 meter yang dihitung dalam prosentase (%). Adapun tingkat kerawanan daerah rawan gelombang tinggi dibedakan menjadi empat dengan klasifikasi sebagai berikut:

- Rawan rendah, jika frekuensi gelombang tinggi = 20% - 40%,
- Rawan sedang, jika frekuensi gelombang tinggi = 40% - 60%,
- Rawan tinggi, jika frekuensi gelombang tinggi = 60% - 80%,
- Rawan sangat tinggi, jika frekuensi gelombang tinggi $> 80\%$.

Korelasi antara gelombang terhadap ENSO dan IODM

Korelasi gelombang dengan ENSO dan IODM dihitung berdasarkan rumus sebagai berikut:

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2} \cdot \sqrt{\sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

Dimana:

r = koefisien korelasi antara x dan y;

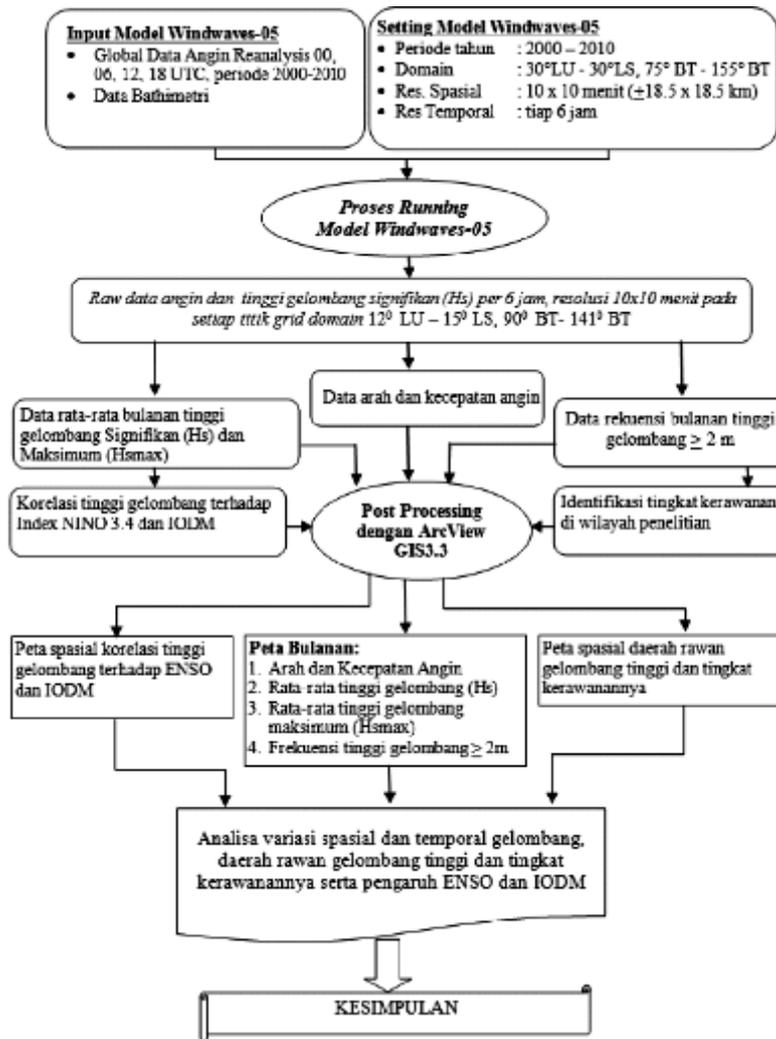
x = nilai indeks bulanan ENSO / IODM;

y = nilai anomali rata-rata bulanan tinggi gelombang signifikan.

Angka korelasi berkisar antara -1 s/d +1. Semakin mendekati 1 maka korelasi semakin mendekati sempurna. Sementara nilai negative dan positif mengindikasikan arah hubungan, adapun interpretasi angka korelasi yang digunakan menurut Sugiyono [14] adalah:

Interval Koefisien	Tingkat Hubungan
0.00 – 0.199	Sangat lemah
0.20 – 0.399	Lemah
0.40 – 0.599	Sedang
0.60 – 0.799	Kuat
0.80 – 1.000	Sangat kuat

2.4. Alur penelitian



Gambar 1. Alur penelitian

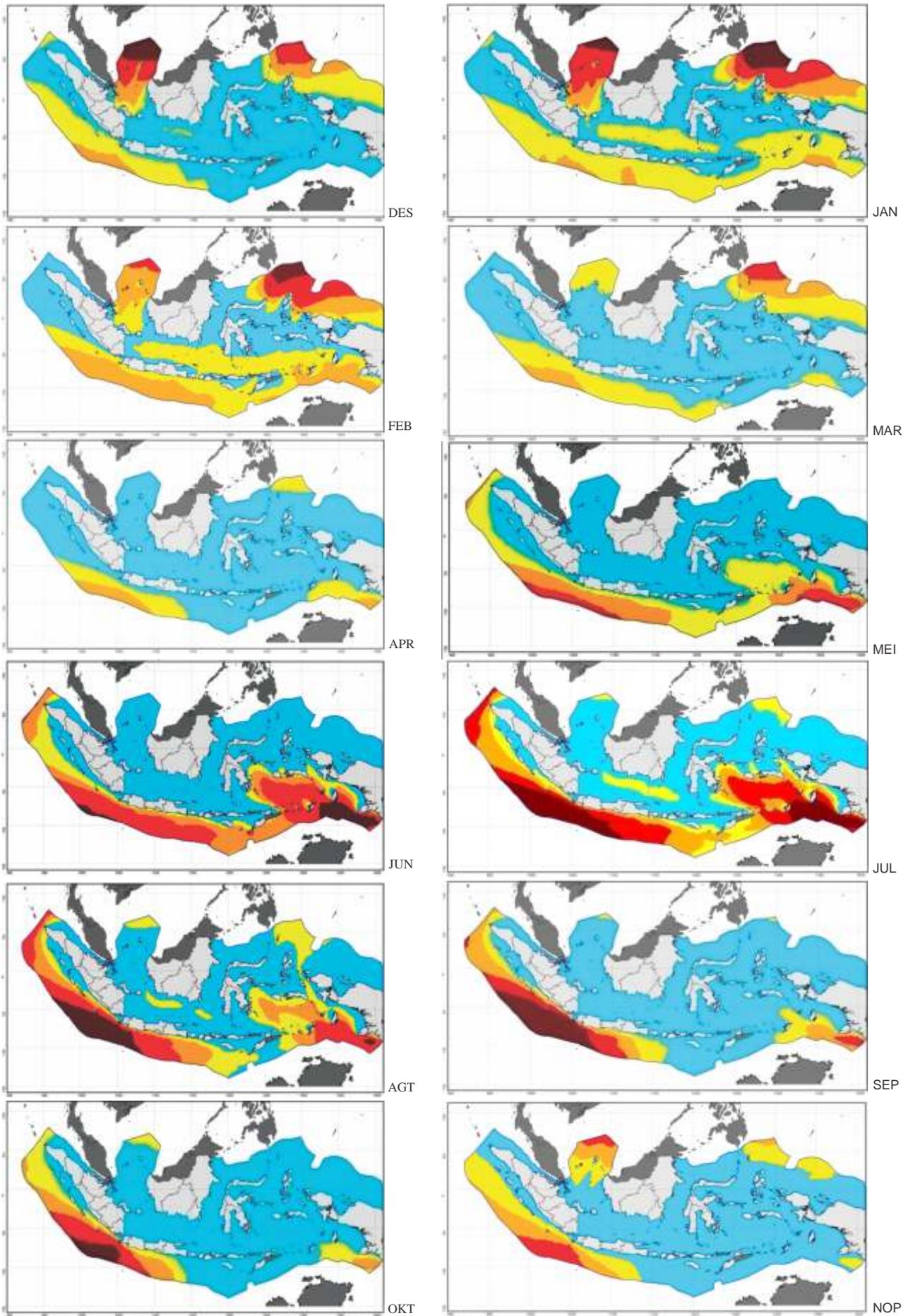
3. Hasil Dan Pembahasan

3.1. Daerah rawan gelombang tinggi

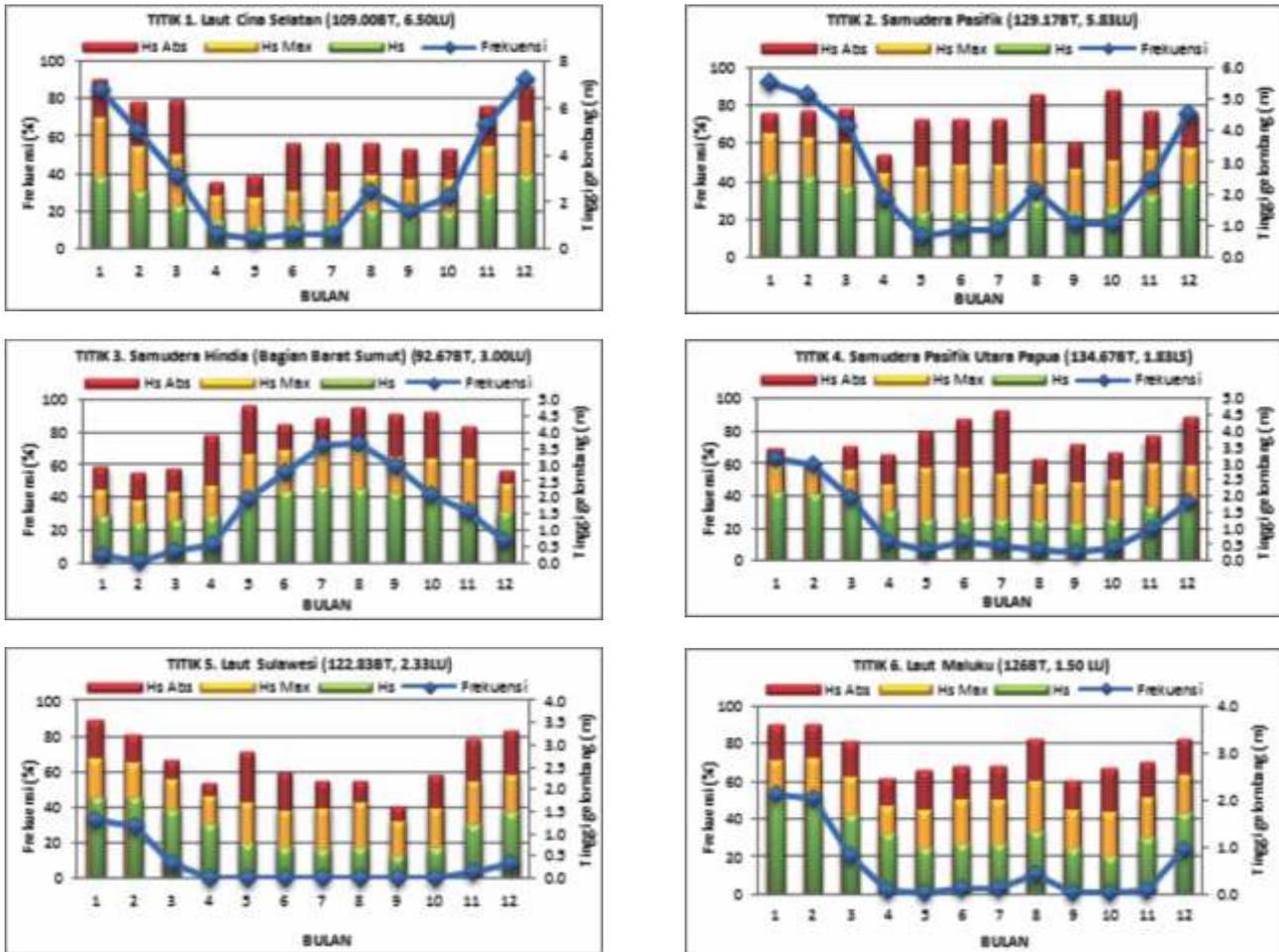
Daerah rawan gelombang tinggi ditunjukkan pada gambar 3.1, pada periode monsun Asia (Desember, Januari, Februari) daerah yang tergolong dalam kategori rawan, lebih luas daripada periode monsun Australia (Juni, Juli, Agustus). Pada periode monsun Asia, daerah rawan gelombang tinggi di perairan Indonesia terdapat di Selat Karimata, Laut Natuna, Laut Sulawesi bagian timur, perairan kepulauan Sangihe Talaud, perairan utara Halmahera dan perairan utara Papua), Laut Jawa, Laut Flores, Laut Banda, Laut Arafuru dan wilayah perairan selatan Bengkulu ke Timur hingga perairan selatan Nusatenggara Timur. Sedangkan Pada periode monsun Australia, daerah rawan gelombang tinggi di perairan Indonesia terdapat sebagian besar wilayah perairan yang berada di Samudera Hindia meliputi perairan Aceh, perairan Barat Sumatera ke timur hingga perairan Nusatenggara Timur bagian selatan, Laut Banda, Laut Arafuru dan sebagian Laut Jawa serta perairan kepulauan Sangihe Talaud dan perairan Halmahera utara pada bulan Juli dan Agustus. Hasil penelitian Hadikusumah [15], juga menunjukkan bahwa rata-rata tinggi gelombang di

Laut Jawa pada bulan Februari dan Agustus lebih tinggi dari pada bulan Mei (musim peralihan)

Pada periode peralihan, sebagian besar perairan Indonesia umumnya masuk dalam kategori tidak rawan. Daerah rawan gelombang tinggi pada periode peralihan dari monsun Asia ke monsun Australia (Maret, April, Mei), hanya terdapat di perairan perairan lepas pantai selatan Bengkulu, selatan Jawa ke timur hingga selatan Nusa Tenggara Barat, Laut Banda dan laut Arafuru terutama pada bulan Mei. Laut Natuna dan perairan kepulauan Sangihe Talaud, perairan Halmahera bagian utara, perairan lepas pantai Papua juga masuk kategori rawan pada bulan Maret (gambar 2). Sedangkan pada periode transisi dari monsun Australia ke Monsun Asia, daerah rawan gelombang tinggi terdapat di perairan Aceh, perairan Barat Sumatera, perairan selatan Jawa pada bulan September dan Oktober serta Laut Natuna dan perairan Sangihe Talaud, perairan laut lepas utara Halmahera ke timur hingga perairan utara Teluk Cendrawasih pada bulan November (gambar 3.1). Hal ini sesuai dengan penelitian Kurniawan, (2011) [16] yang menjelaskan bahwa terjadinya gelombang tinggi di wilayah Indonesia berasosiasi dengan pola monsun diatas Benua Maritim Indonesia (BMI).



Gambar 2. Peta tingkat kerawanan daerah gelombang tinggi (≥ 2 meter) di perairan Indonesia

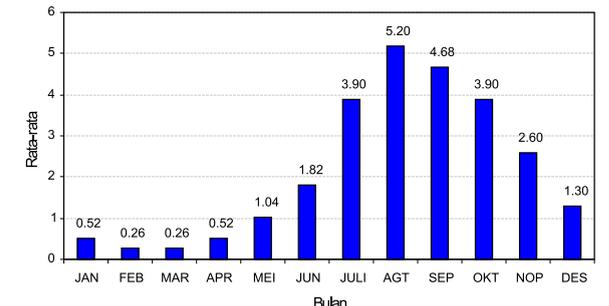


Gambar 3. Gelombang tertinggi yang pernah terjadi (Hs Abs), rata-rata tinggi gelombang maksimum (Hs Max), rata-rata tinggi gelombang (Hs), Frekuensi tinggi gelombang ≥ 2 m (Frekuensi) tahun 2000-2010 di perairan terbuka Utara Ekuator

Berdasarkan grafik pada gambar 3, wilayah perairan Indonesia yang berdekatan dengan laut terbuka di utara ekuator, seperti Laut Cina Selatan dan Samudera Pasifik, tingkat rawan gelombang tinggi puncaknya terjadi pada saat monsun Asia yaitu bulan DJF. Sedangkan untuk wilayah perairan Indonesia yang berdekatan dengan Samudera Hindia, baik di utara atau selatan ekuator, puncak rawan gelombang tingginya terjadi pada monsun Australia yakni pada bulan Juni-Juli-Agustus. Gelombang tertinggi (Hs Abs) di Laut Cina Selatan dapat mencapai ketinggian 7 meter pada bulan Desember dan Januari. Perairan Indonesia yang berada atau menjadi bagian dari Laut Cina Selatan, seperti Selat Karimata masuk kategori rawan sangat tinggi pada bulan tersebut. Di perairan yang berdekatan dengan Samudera Pasifik, ketinggian gelombang absolut dapat mencapai 5 meter lebih pada bulan Agustus. Di perairan Laut Sulawesi dan Laut Maluku, gelombang tertinggi bisa mencapai 3,5 meter. Sedangkan di Samudera Hindia bagian barat Sumatera bagian utara, ketinggian gelombang tertinggi dapat mencapai 5 meter.

Pola gelombang ekstrim di Laut Cina Selatan mulai bulan Desember sampai Februari terlihat serupa dengan pola tinggi gelombang rata-ratanya. Sedangkan di Samudera Pasifik, Laut Sulawesi dan Maluku intensitas gelombang

ekstrim yang terjadi bervariasi pada bulan Mei sampai Desember, tingginya intensitas gelombang ekstrim di banding rata-ratanya kemungkinan adanya peran badai tropis yang terjadi di wilayah Pasifik Barat Laut. Berdasarkan data BMKG (gambar 4), dengan data histori 1951-2006 (56 tahun), diketahui bahwa wilayah dekat Indonesia sebelah utara, siklon tropis terbanyak terjadi pada bulan Agustus dimana rata-rata kejadiannya 5.2 kali, kemudian bulan September (4,68), Juli dan Oktober (3,90).

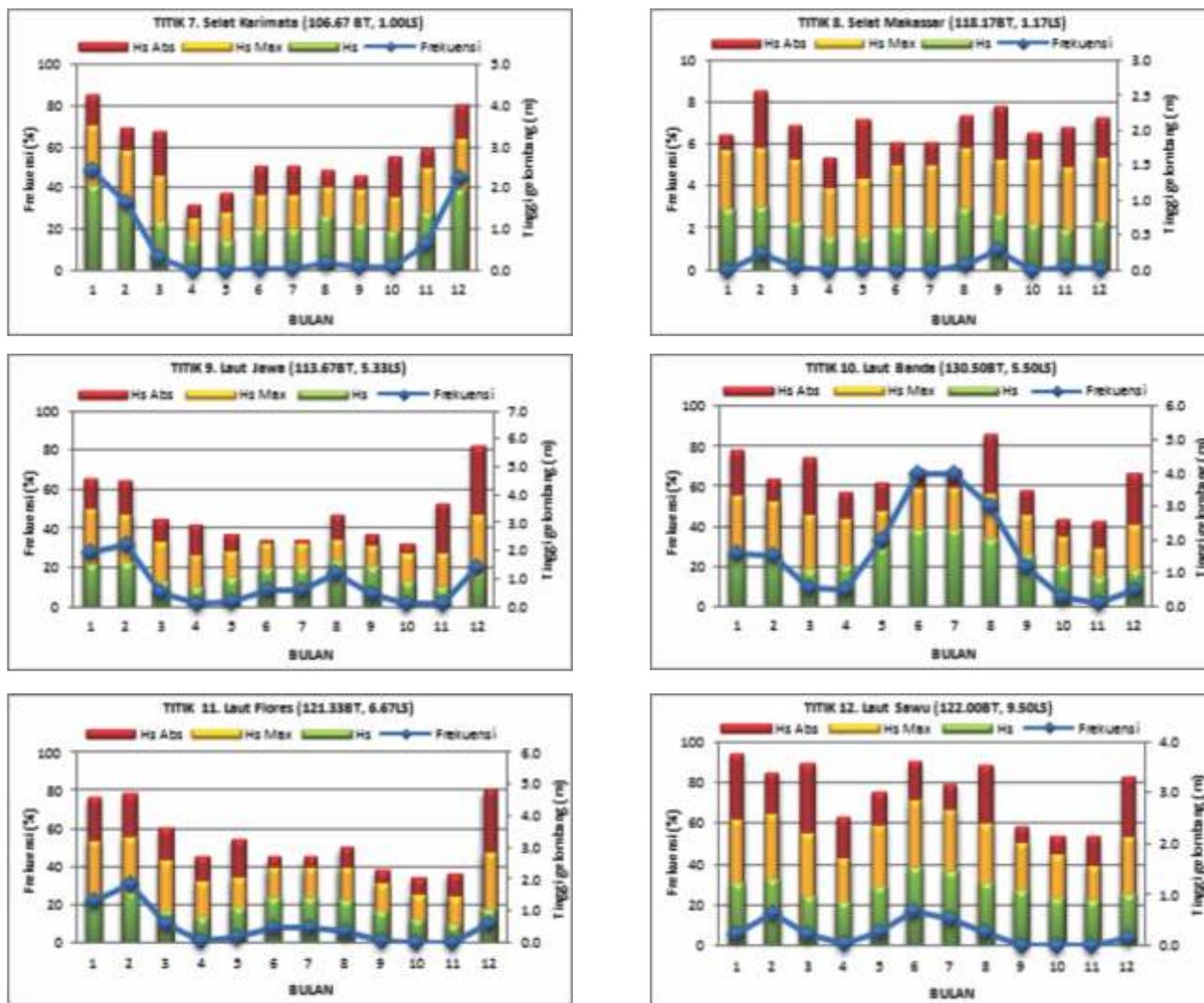


Gambar 4. Frekuensi Badai Tropis di BBU, 1951-2006, area: 0-30° LU, Laut Cina Selatan-150° BT[16]

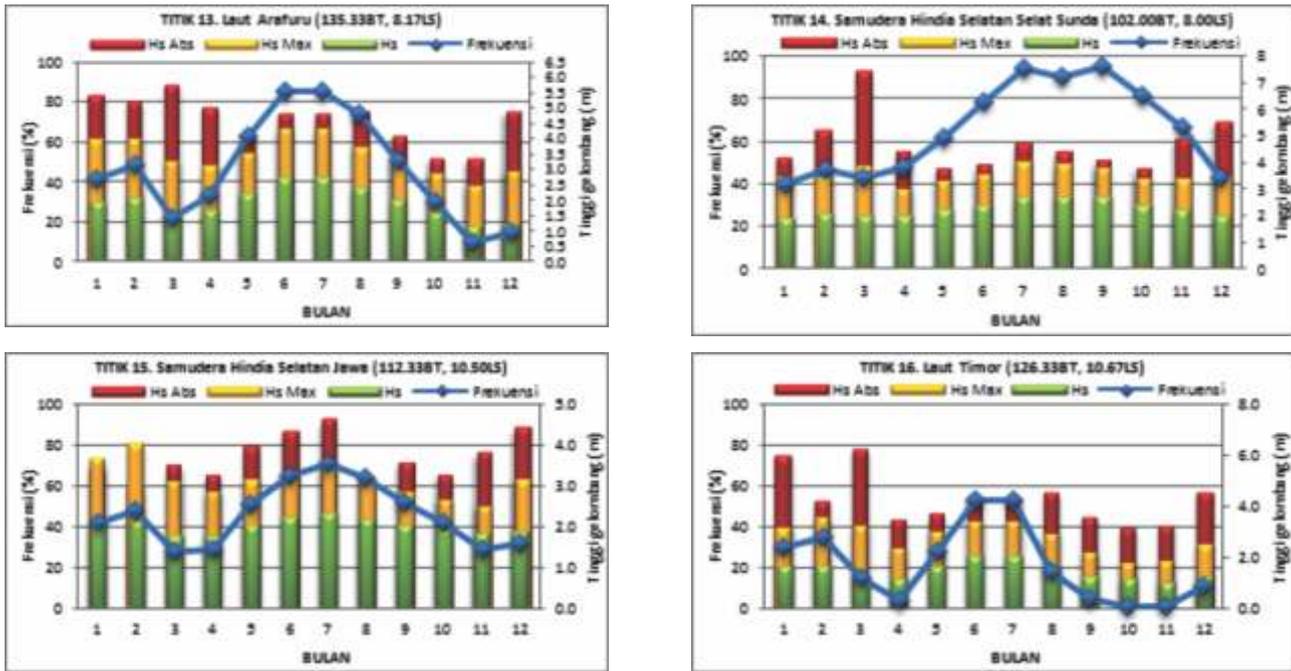
Untuk daerah rawan gelombang tinggi di perairan antar pulau (gambar 5), seperti Laut Jawa dan Laut Flores pada bulan Januari dan Februari dengan klasifikasi rendah, Laut Banda pada bulan Januari, Februari, Juni, Juli dan Agustus. Kondisi ini juga menunjukkan bahwa perairan Laut Jawa dan Laut Banda di pengaruhi oleh terjadinya angin monsun yang secara periodik melintasi perairan tersebut.

Tinggi gelombang ekstrim (gambar 5) yang terjadi di perairan antar pulau seperti Selat Karimata dapat mencapai 4 meter lebih pada bulan Desember dan Januari, di Selat Makassar meskipun frekuensi

gelombang diatas 2 meter sangat kecil, akan tetapi gelombang ekstrim yang terjadi dapat mencapai 2.6 meter. Di Laut Jawa gelombang ekstrim dapat mencapai 6 meter yang terjadi pada bulan Desember, sedangkan di Laut Banda tinggi gelombang ekstrim dapat mencapai 5 meter lebih pada bulan Agustus, di Laut Flores gelombang tertinggi mencapai 5 meter dan di Laut Sawu ketinggian gelombang ekstrim mencapai 3.7 meter. Fluktuasi gelombang absolut yang terjadi di wilayah perairan antar pulau Indonesia juga dimungkinkan dapat di sebabkan oleh terjadinya siklon tropis baik di Samudera Pasifik maupun di Samudera Hindia.



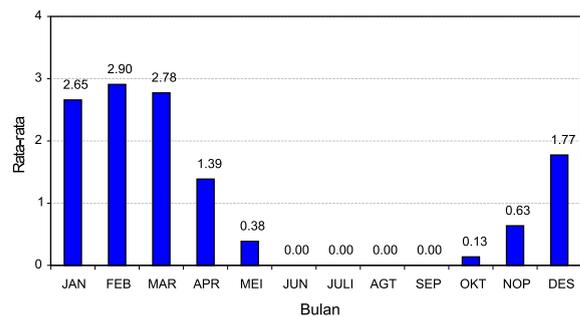
Gambar 5. Gelombang tertinggi yang pernah terjadi (Hs Abs), rata-rata tinggi gelombang maksimum (Hs Max), rata-rata tinggi gelombang (Hs), Frekuensi tinggi gelombang ≥ 2 m (Frekuensi) tahun 2000-2010 di perairan antar pulau.



Gambar 6. Gelombang tertinggi yang pernah terjadi (Hs Abs), rata-rata tinggi gelombang maksimum (Hs Max), rata-rata tinggi gelombang (Hs), Frekuensi tinggi gelombang ≥ 2 m (Frekuensi) tahun 2000-2010 di perairan terbuka Selatan Ekuator

Di selatan ekuator Samudera Hindia (gambar 6), tingkatan rawan gelombang tinggi puncaknya terjadi pada saat monsun Australia yaitu bulan JJA, perairan selatan Samudera Hindia selatan Selat Sunda sampai Jawa merupakan daerah paling rawan sepanjang periode monsun Asia, dengan tingkat kerawannya tinggi dan sangat tinggi. Gelombang ekstrim di perairan sekitar Samudera Hindia banyak terjadi pada bulan Desember sampai Maret, pola gelombang ekstrim di wilayah ini kemungkinan terjadi akibat adanya badai tropis yang terjadi di Samudera Hindia. Berdasarkan data dari BMKG (2012) [17], secara klimatologis, periode siklon tropis di wilayah Samudera Hindia yang paling sering terjadi pada bulan Februari yaitu 122 kejadian selama 42 tahun, dengan rata-rata kejadian mencapai 2,9 kejadian per tahun. Bulan Desember yang merupakan bulan teraktif kedua, selama 42 tahun terdapat 76 kejadian siklon tropis dengan nilai rata-rata sebesar 1,8 kejadian per tahun. Pada bulan Juni dan Agustus terjadi frekuensi terkecil dimana selama 42 tahun tidak pernah sekalipun terjadi siklon tropis (gambar 7).

Berdasarkan pola rata-rata tinggi signifikan dan frekuensi gelombang tinggi, menunjukkan bahwa karakteristik gelombang dan daerah rawan gelombang tinggi di wilayah perairan Indonesia berasosiasi dengan siklus angin monsun Asia dan Australia. Bayong [5], juga menjelaskan bahwa fenomena monsun sangat mempengaruhi kondisi perairan Indonesia dalam segala aspek, terutama kondisi oseanografis lapisan atas.



Gambar 7. Frekuensi Badai Tropis di BBS, 1964 – 2005, area: 0 - 30° LS, 90 - 150° BT [16].

Kejadian gelombang ekstrim (absolut) mempunyai pola dan fluktuasi yang bervariasi setiap bulannya dan tidak selalu bersesuaian dengan siklus monsun, dugaan sementara hal ini dapat disebabkan oleh adanya peran siklon tropis yang terjadi di Samudera Pasifik maupun di Samudera Hindia, akan tetapi diperlukan penelitian lebih lanjut, untuk mengetahui bagaimana peranan dan pengaruh siklon tropis terhadap intensitas gelombang ekstrim di perairan Indonesia

3.2. Hubungan ENSO dan IODM dengan tinggi gelombang

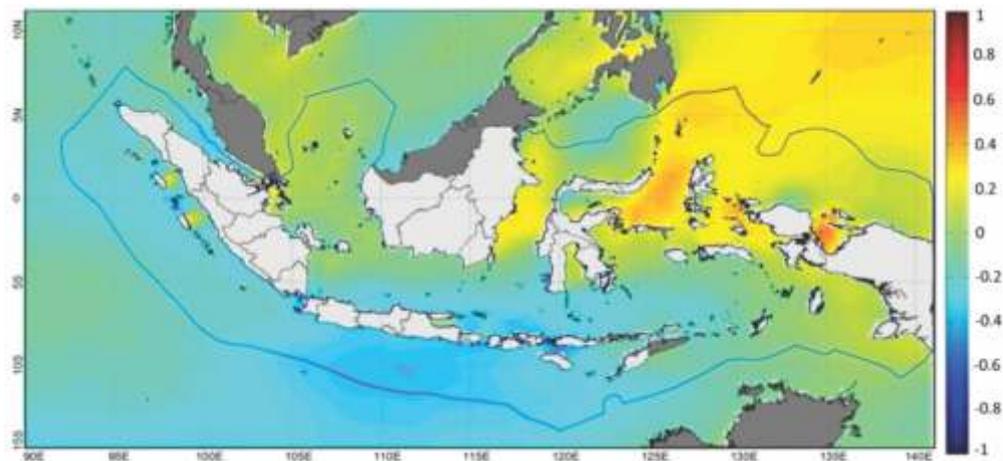
Pengaruh fenomena ENSO terhadap wilayah perairan Indonesia berdasarkan nilai koefisien korelasi spasial antara indeks Nino 3.4 dengan anomali gelombang di wilayah perairan Indonesia selama 11 tahun (gambar 8) menunjukkan korelasi paling tinggi terdapat di wilayah tertentu perairan Indonesia diantaranya untuk wilayah perairan utara Maluku sampai ke Samudera Pasifik bagian

barat berkorelasi positif sebesar 0.4, dan di perairan Selatan Jawa dengan nilai korelasi sekitar -0.4. Sedangkan untuk perairan laut Indonesia yang lain, pengaruh ENSO tidak terlalu kuat terhadap variasi tinggi gelombang. Kondisi ini mengartikan bahwa variasi tinggi gelombang untuk wilayah perairan Laut Maluku sampai ke Samudera Pasifik bagian Barat berhubungan dengan terjadinya fenomena ENSO, dimana ketika terjadi anomali SPL Nino 3.4 positif (El Nino) tinggi gelombang di wilayah perairan tersebut lebih tinggi dari rata-ratanya, sebaliknya ketika anomali SPL Nino 3.4 bernilai negatif (La Nina) tinggi gelombang di wilayah perairan tersebut lebih rendah. Sedangkan untuk wilayah di perairan Selatan Jawa, variasi tinggi gelombangnya berkorelasi negatif atau berlawanan dengan terjadinya anomali ENSO dengan tingkatan korelasi lemah, dimana ketika anomali SPL Nino 3.4 negatif, tinggi gelombang di wilayah perairan tersebut akan lebih tinggi dari rata-ratanya, sebaliknya ketika anomali SPL positif maka tinggi gelombang di wilayah perairan tersebut lebih rendah dari rata-ratanya.

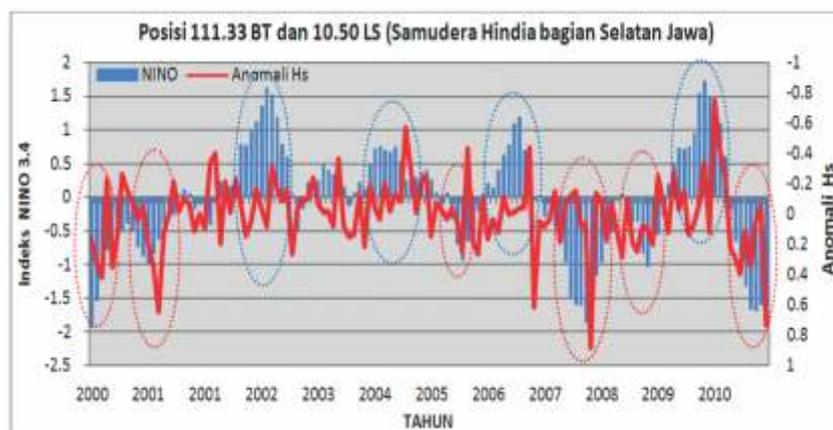
Grafik perbandingan SPL Nino 3.4 dan tinggi gelombang pada lokasi dengan nilai korelasi tertinggi (gambar 9) di wilayah Samudera Hindia bagian Selatan Jawa mempunyai pola yang berkebalikan, dimana pada saat terjadinya La Nina maka anomali tinggi gelombang di

perairan tersebut positif (lingkaran merah), dan sebaliknya ketika terjadi El Nino, anomali tinggi gelombang di perairan tersebut negatif (lingkaran biru).

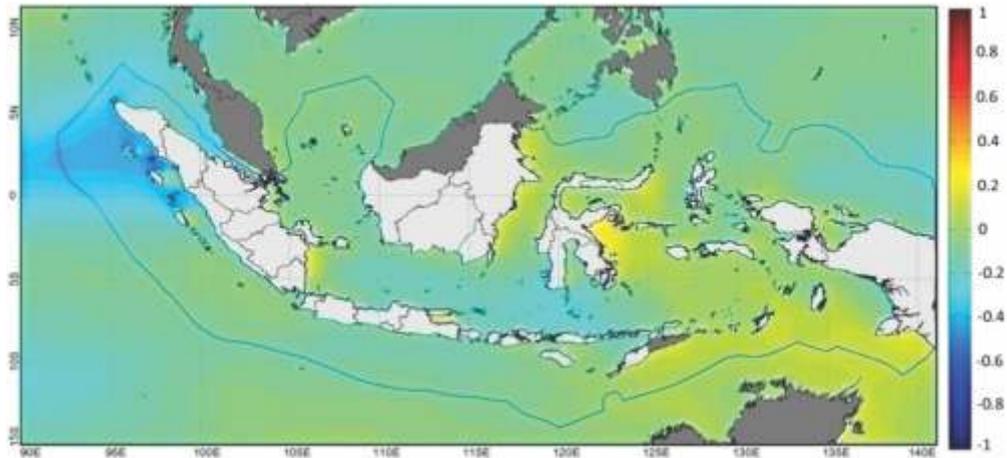
Kondisi ini merupakan akibat adanya perubahan atau anomali suhu permukaan laut yang terjadi di Pasifik ekuator, sehingga terjadi perubahan arah dan kecepatan angin dan pergeseran kolom penaikan dan penurunan udara dari sirkulasi angin zonal (Walker), menurut Aldrian [6], episode El Nino dimulai pada bulan April dan mencapai puncaknya pada bulan Agustus dan September, pada bulan Juni, Juli, Agustus pengaruh angin monsun Australia lebih dominan dari Tenggara menuju Barat Laut melintasi di wilayah perairan Indonesia, hal ini menjelaskan bahwa ketika terjadi El Nino, maka angin monsun Australia akan melemah, sehingga tinggi gelombang di perairan Samudera Hindia bagian Selatan Jawa lebih rendah dari rata-ratanya, sedangkan perairan Indonesia yang berdekatan dengan Samudera Pasifik tinggi gelombangnya akan lebih tinggi. Sebaliknya, ketika La Nina, maka angin zonal dari Pasifik akan meningkatkan persistensi arah dan kecepatan angin monsun Australia, sehingga tinggi gelombang di perairan Selatan Jawa lebih tinggi dari rata-ratanya, sedangkan di wilayah perairan yang berdekatan dengan Samudera Pasifik tinggi gelombangnya lebih rendah.



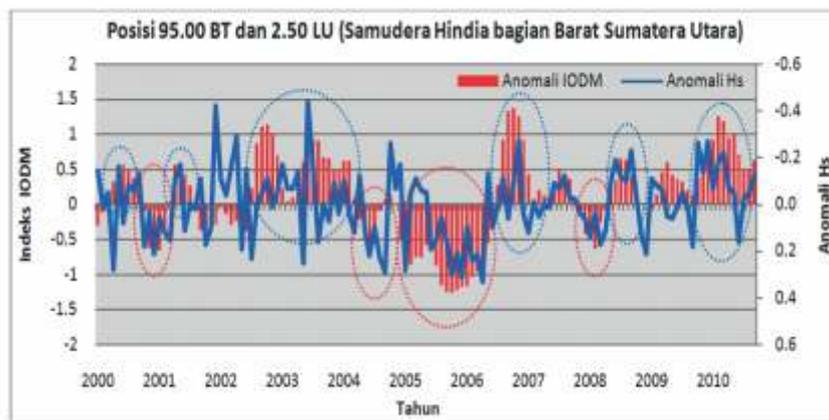
Gambar 8. Nilai koefisien korelasi anomali bulanan tinggi gelombang (model Windwaves-05) dengan indeks Nino 3.4, periode tahun 2000-2010



Gambar 9. Perbandingan anomali tinggi gelombang (H_s) dengan indeks Nino 3.4 pada titik korelasi tertinggi (posisi 111.33 BT dan 10.50 LS)



Gambar 10. Nilai koefisien korelasi bulanan anomali tinggi gelombang (model Windwaves-05) dengan indeks IODM periode tahun 2000 – 2010



Gambar 11. Perbandingan anomali tinggi gelombang (H.) dengan indeks IODM pada titik korelasi tertinggi (posisi 95.00 BT dan 2.50 LU)

Sedangkan pengaruh terjadinya IODM terhadap wilayah perairan Indonesia berdasarkan nilai koefisien korelasi spasial (gambar 10) secara umum, menunjukkan bahwa terjadinya fenomena IODM tidak berpengaruh besar terhadap kondisi gelombang laut di wilayah perairan Indonesia, dimana nilai rata-rata korelasinya sangat lemah, hanya berkisar antara -0.2 sampai 0.2. Terjadinya anomali IODM di Samudera Hindia dengan nilai korelasi paling tinggi berada di wilayah perairan barat Sumatera Utara dengan nilai korelasi -0,4 sampai -0,5. Hal ini menjelaskan bahwa ketika terjadi anomali IODM negatif (-), maka tinggi gelombang yang terjadi di wilayah perairan barat Sumatera Utara juga akan lebih tinggi dari rata-ratanya, sedangkan pada saat nilai anomali IODM positif (+) tinggi gelombang di perairan tersebut akan lebih rendah.

Dari grafik perbandingan anomali IODM dan anomali tinggi gelombang pada nilai korelasi tertinggi (gambar 11) dapat dilihat bahwa untuk wilayah Samudera Hindia bagian barat Sumatera Utara pada posisi sekitar 95 BT dan 2.5 LU mempunyai pola yang berkebalikan, dimana pada saat terjadinya IODM negatif maka anomali tinggi gelombang di perairan tersebut positif (ditandai dengan lingkaran merah), dan sebaliknya ketika terjadi IODM positif, anomali tinggi gelombang di perairan tersebut negatif (ditandai dengan lingkaran biru).

4. Kesimpulan

1. Karakteristik gelombang di perairan Indonesia mempunyai pola yang berasosiasi dengan siklus angin musonal. Pola variasi bulanan tinggi gelombang dan frekuensi gelombang tinggi di sebagian besar wilayah perairan Indonesia mempunyai dua puncak yang terjadi pada periode monsun Asia yaitu pada bulan DJF dan pada periode monsun Australia JJA. Untuk wilayah perairan yang berhubungan dengan Laut Cina Selatan (Selat Karimata, Laut Natuna) dan Samudera Pasifik (Laut Sulawesi, Laut Maluku dan perairan utara Papua), Laut Jawa, Laut Flores dan selat Makassar puncak tertinggi terjadi pada periode monsun Asia. Sedangkan Laut Banda, Laut Arafuru dan perairan yang berada di Samudera Hindia (Laut Timor, Laut Sawu) puncak tertinggi terjadi pada periode monsun Australia.
2. Daerah rawan gelombang tinggi pada periode monsun Asia lebih luas daripada daerah rawan gelombang tinggi pada periode monsun Australia. Sedangkan pada musim peralihan antar kedua monsun sebagian besar perairan Indonesia tidak masuk kategori rawan.

3. Korelasi ENSO dengan tinggi gelombang di wilayah perairan Indonesia umumnya lemah dengan nilai tertinggi (0.4) terdapat di wilayah perairan Indonesia Timur terutama yang berada di Samudera Pasifik. Sedangkan Samudera Hindia selatan Jawa negatif - 0.4.
4. Korelasi IODM dengan tinggi gelombang di perairan Indonesia umumnya sangat lemah. Daerah dengan korelasi negatif yang paling tinggi (-0.5) terdapat di wilayah perairan barat Sumatera bagian Utara.

Daftar Pustaka

- [1] World Meteorological Organization (WMO). (2001). *Guide the marine meteorological services, Third Edition*, WMO no.471. Secretariat of the World Meteorological Organisation, Geneva-Switzerland: Author.
- [2] Ramage, C. S. (1971). *Monsoon meteorology*. San Diego: Academic Press.
- [3] Hutabarat, S. & Evans, S.M. (2008). *Pengantar oseanografi*. Universitas Indonesia (UI-Press). Jakarta.
- [4] World Meteorological Organization (WMO). (1998). *Guide to wave forecasting and analysis, WMO-No. 702*, Secretariat of the World Meteorological Organisation, Geneva-Switzerland: Author.
- [5] Bayong, Tj.H.K. (2008). *Sains atmosfer*. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- [6] Aldrian, E. (2008). *Meteorologi laut Indonesia*. Jakarta: Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG).
- [7] Nontji, A. (2005). *Laut nusantara*. 4th ed. Jakarta: Jambatan.
- [8] Saji, N. H, Goswami, B. N, Vinayachandran, P. N & Yamagata, T. (1999) A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*. 401.
- [9] Suratno. (1997). *Model numerik prakiraan gelombang permukaan laut untuk perairan indonesia dan sekitarnya*. Tesis, Program studi Fisika, Fakultas MIPA, Universitas Indonesia. Jakarta.
- [10] National Center for Environmental Prediction (NCEP), NOAA (2010). *NCEP Operational Data (WRF inputs): 1-degree FNLs*. <http://dss.ucar.edu>, diakses 17 Januari 2010
- [11] National Geophysical Data Center (NGDC), NOAA. (2010). *Combined Bathymetry and Topografi*. <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/> diakses 15 Desember 2010
- [12] National Center for Environmental Prediction (NCEP), NOAA. *Monthly Atmospheric & SST Indices*. <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/indices/ersst3b.nino.mth.ascii>. diakses 20 Juni 2011.
- [13] Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (JAMSTEC) . . http://www.jamstec.go.jp/frcg/research/d1/iod/reynolds_monthly_dmi.txt, diakses 2 Juni, 2011
- [14] Sugiyono. (2007). *Metode penelitian administrasi*. Bandung: Alfabeta.
- [15] Hadikusumah. (2009). Karakteristik gelombang dan arus di Eretan Indramayu. *Jurnal Makara Seri Sains*, 13(2), 163-172.
- [16] Kurniawan R., M. N. Habibie & Suratno. (2011). Variasi bulanan gelombang laut di Indonesia. *Jurnal Meteorologi dan Geofisika*, 12(3), 221-232.
- [17] Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG). April, 2012. *Learn about TC, musim siklon di sekitar Indonesia*. (<http://meteo.bmkg.go.id/siklon/learn/06/id.>), diakses 15 September 2012