

# MEMAHAMI DAN MENGANTISIPASI DAMPAK PERUBAHAN IKLIM PADA PESISIR DAN LAUT DI INDONESIA BAGIAN TIMUR

*Ibnu Sofian*<sup>1</sup>, *Agus Supangat*<sup>2</sup>, *M.S.Fitriyanto*<sup>3</sup>, *Roni Kurniawan*<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Bakosurtanal, Jl. Raya Jakarta - Bogor KM. 46 Cibinong 16911, INDONESIA

<sup>2</sup>Dewan Nasional Perubahan Iklim, Jl. Medan Merdeka Selatan No 13. Lantai 18 Jakarta 10110

<sup>3</sup>Pengembangan Kawasan Pesisir dan Laut-ITB, Jl. Ganesha 10 Bandung 40132

<sup>4</sup>Puslitbang-BMKG, Jl. Angkasa 1 No.2, Jl. Angkasa 1 No.2 Kemayoran, Jakarta 10720

Email : [asupangat@gmail.com](mailto:asupangat@gmail.com)

## ABSTRAK

Indonesia mempunyai peran yang cukup besar dalam negosiasi internasional untuk mengelola dampak dari perubahan iklim. Peran tersebut antara lain dengan menyelenggarakan the 13th Conference of the Parties to the UNFCCC di Bali yang menghasilkan the Bali Action Plan. Peran pada isu perubahan iklim di atas merupakan konsekuensi logis dari besarnya bahaya dan kerentanan wilayah Indonesia terhadap fenomena global tersebut, antara lain di wilayah pesisir dan laut. Secara lebih spesifik, wilayah Indonesia bagian timur memiliki karakteristik bahaya dan kerentanan terhadap perubahan iklim. Kenaikan muka air laut dengan laju sekitar 0,6 – 0,8 cm/tahun, yang dapat menimbulkan dampak pada wilayah pemukiman, infrastruktur, dan ekosistem di wilayah pesisir serta pulau-pulau kecil. Sementara itu, peningkatan intensitas El Niño dan La Niña menyebabkan terjadinya perubahan pola arus dan sirkulasi laut seperti Arus Lintas Indonesia di Selat Makassar yang akan berdampak pada hasil tangkapan ikan. Selanjutnya, karakteristik gelombang laut juga mengalami perubahan sebagai akibat dari perubahan variabilitas iklim yang berdampak pada sektor transportasi laut. Selain itu, peningkatan intensitas La Niña, menyebabkan kenaikan intensitas pemutihan terumbu karang (coral bleaching) sebagai akibat dari kenaikan suhu permukaan laut yang drastis. Mengingat besarnya dampak dan kerentanan di wilayah Indonesia bagian timur tersebut, perlu disusun strategi adaptasi, yang meliputi strategi proteksi, akomodasi, dan retreat-adaptation.

Kata Kunci: Indonesia Bagian Timur, Perubahan Iklim, Pesisir, Adaptasi, El Niño, La Niña

## ABSTRACT

Indonesia has provided substantial role in international negotiations to manage the impacts of climate change. Roles include the holding of the 13th Conference of the Parties to the UNFCCC in Bali who produce the Bali Action Plan. Role in climate change issues is a logical consequence of the hazard and vulnerability of Indonesia to the global phenomenon, including in coastal areas and sea. More specifically, the eastern part of Indonesia has the characteristics of hazards and vulnerability to climate change. Sea level rise rate of about 0.6 to 0.8 cm / year, could have an impact on residential areas, infrastructure, and ecosystems in coastal zones and small islands. Meanwhile, the increased intensity of El Niño and La Niña leads to changes in currents and ocean circulation patterns such as Indonesia Through Flow in Makassar Strait that will be impact on fish catches. Furthermore, the characteristics of ocean waves is also changing because of climate changes variability and wil be impact on marine transportation sector. In addition, the increased intensity of La Niña, causing an increase in the intensity of coral bleaching (coral bleaching) as a result of rising sea surface temperatures are drastic. In consideration of the impact and vulnerability in eastern Indonesia, need to be developed adaptation strategies, include protection strategies, accommodation, and retreat-adaptation.

Keywords: Eastearn of Indonesia, Climate Change, Coastal, Adaptation, El Niño, La Niña

Naskah masuk : 18 Februari 2011

Nasakah diterima : 2 Mei 2011

## I. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Peningkatan intensitas pemanasan global (*global warming*) ditunjukkan dengan semakin meningkatnya akselerasi kenaikan suhu permukaan, tinggi muka laut, dan mencairnya es baik di Antartika maupun di Greenland. Disamping berdampak langsung terhadap kenaikan tinggi muka laut, pemanasan global juga menyebabkan terjadinya perubahan iklim, yang berdampak pada sektor kesehatan, pertanian, kehutanan dan transportasi. Beberapa kejadian cuaca ekstrim yang pada beberapa tahun terakhir, sangat dipengaruhi oleh intensitas pemanasan global yang terjadi. Seiring dengan semakin intensifnya proses pemanasan global, intensitas terjadinya El Niño dan La Niña semakin meningkat<sup>1),2)</sup>

Pada umumnya El Niño terjadi antara 2 tahun sampai 7 tahun sekali, tetapi sejak tahun 1970, frekuensi El Niño dan La Niña menjadi 2 tahun sampai 4 tahun<sup>3)</sup>. Sebagai tambahan, pada waktu terjadinya El Niño tahun 1997/1998, Indonesia pada umumnya mengalami musim kering yang panjang, dan pada saat terjadinya La Niña tahun 1999, Indonesia mengalami kenaikan curah hujan yang tinggi, dan kenaikan tinggi muka air laut sebesar 20 cm sampai 30 cm, sehingga menyebabkan banjir di sebagian besar wilayah Indonesia, terutama di wilayah pesisir.

Berkaitan dengan kenaikan suhu iklim global, intensitas siklon tropis kuat menjadi meningkat<sup>4)</sup>. Rata-rata kekuatan siklon tropis di Samudera Atlantik menguat, dengan kecepatan angin maksimum meningkat sebesar 0,4m/det/tahun<sup>4)</sup>. Selanjutnya Webster<sup>5)</sup> menjelaskan bahwa meningkatnya frekuensi dan intensitas dari siklon terkuat tahunan disebabkan oleh pemanasan global, sebaliknya jumlah dan durasi hari kejadian siklon menurun di semua samudera, kecuali di Atlantik Utara selama satu dekade terakhir ini<sup>5)</sup>. Meskipun mekanisme fisis penyebab penurunan jumlah dan durasi hari kejadian siklon masih belum jelas, tetapi hal ini mungkin disebabkan oleh lebih banyaknya tahun-tahun El Nino dibandingkan dengan La Niña pada beberapa dekade terakhir ini.<sup>4),5)</sup>

Berkaitan dengan kenaikan suhu iklim global, intensitas siklon tropis kuat menjadi meningkat<sup>4)</sup>. Rata-rata kekuatan siklon tropis di Samudera Atlantik menguat, dengan kecepatan

angin maksimum meningkat sebesar 0,4m/det/tahun<sup>4)</sup>. Selanjutnya Webster<sup>5)</sup> menjelaskan bahwa meningkatnya frekuensi dan intensitas dari siklon terkuat tahunan disebabkan oleh pemanasan global. Sebaliknya jumlah dan durasi hari kejadian siklon menurun di semua samudera, kecuali di Atlantik Utara selama satu dekade terakhir ini<sup>5)</sup>. Meskipun mekanisme fisis penyebab penurunan jumlah dan durasi hari kejadian siklon masih belum jelas, tetapi hal ini mungkin disebabkan oleh lebih banyaknya tahun-tahun El Nino dibandingkan dengan La Niña pada beberapa dekade terakhir ini.<sup>4),5)</sup>

Disamping variabilitas iklim ekstrim (El Niño dan La Niña), *global warming* juga menyebabkan kenaikan tinggi muka air laut, baik akibat ekspansi volume air laut karena naiknya suhu air laut, maupun mencairnya es glasier dan es di kutub utara dan selatan. Meskipun dampak kenaikan tinggi muka air laut hanya menjadi wacana di kalangan ilmuwan, tetapi setiap penduduk terutama yang tinggal di daerah pantai harus tanggap akan risiko terhadap penurunan kualitas kehidupan di lingkungan pantai akibat naiknya tinggi muka air laut.

Secara global, kenaikan *sea level* (tinggi muka laut) sekitar 3.1 mm/tahun, sementara rata-rata kenaikan TML pada abad ke-20 hanya 1.7mm/tahun. Lebih dari sepertiga dari tingkat kenaikan TML diakibatkan oleh mencairnya es baik di Greenland, Antartika maupun es glacier. Beberapa riset terakhir menunjukkan bahwa proses mencairnya es meninggi seiring dengan makin intensifnya progress pemanasan global. Apabila proses pemanasan dan mencairnya es berlangsung seperti pada 5 tahun terakhir ini, maka diprediksi kenaikan tinggi muka air laut pada tahun 2100 sebesar 80 cm sampai 180 cm<sup>6)</sup>.

### 1.2. Maksud dan Tujuan

Kajian ini dilakukan dengan tujuan untuk memberikan dasar acuan dan informasi bagi pengembangan daerah pantai, dan adaptasi terhadap perubahan iklim, terutama dampak *sea level rise* (SLR, kenaikan tinggi air laut), tinggi gelombang, ENSO dan potensi terjadinya pemutihan terumbu karang (*coral bleaching*). Sebagai tambahan, kajian ini dilakukan dengan maksud, agar dapat dijadikan dasar dalam mengurangi risiko akibat terjadinya bencana alam

yang berkaitan dengan kenaikan tinggi muka air laut.

## II. METODOLOGI

Tulisan ini memberikan ulasan secara deskriptif dari berbagai literatur yang terkait dengan dampak perubahan iklim di wilayah pesisir laut Indonesia. Kemudian dari hasil pembahasan dapat digunakan sebagai acuan dalam menyusun strategi adaptasi dan mitigasi dalam mengantisipasi dampak perubahan iklim di wilayah pesisir dan laut di Indonesia bagian timur.

## III. PEMBAHASAN

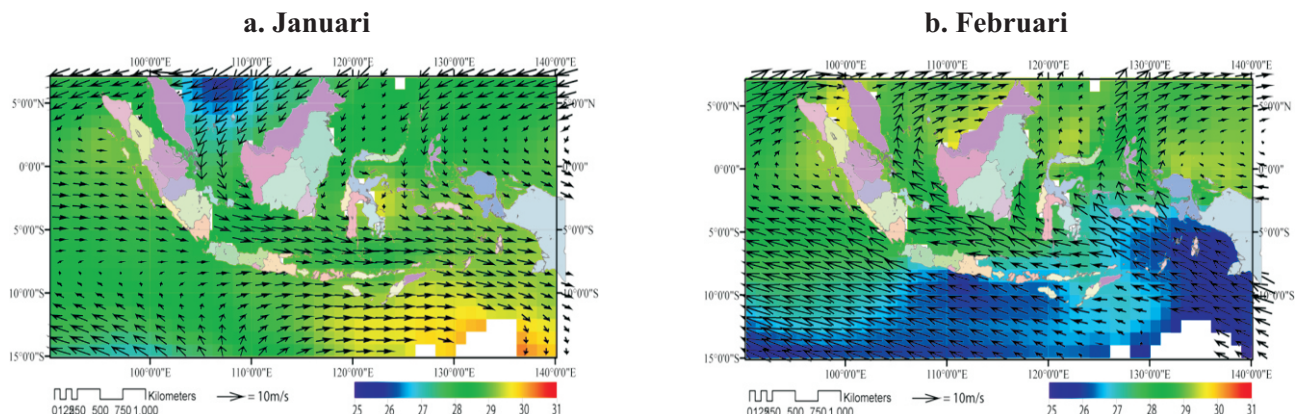
### 3.1. Iklim dan Kondisi Oseanografi

Pada waktu musim angin barat (angin bertiup dari barat) dari bulan Oktober sampai Maret, cuaca di Indonesia dipengaruhi oleh monsun Asia, angin bertiup dari timur laut dan berbelok menjadi angin barat laut setelah melewati khatulistiwa. Sebaliknya pada musim angin timuran, angin bertiup dari tenggara dan berbelok menuju ke timur laut setelah melalui katulistiwa, dari bulan Mei sampai September. Pengaruh Samudera Pasifik menjadi dominan pada periode angin baratan kecuali sebagian besar Sumatera, yang dipengaruhi oleh karakteristik Samudera Hindia sebelah barat. Sebaliknya pada musim angin timuran, pengaruh Samudera Hindia menjadi dominan dengan ditandai oleh berkurangnya curah hujan di Pulau Jawa, dan kepulauan Nusa Tenggara, sementara di sebagian besar Sumatera, dan Kalimantan masih berpeluang terjadinya curah hujan dengan intensitas sedang.

Selanjutnya, propagasi angin dari utara dari bulan Oktober sampai Maret mendorong air laut

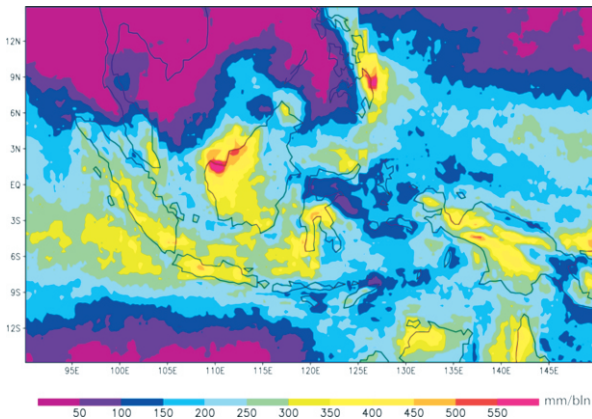
hangat dari Samudera Pasifik bergerak ke Samudera Hindia, yang menyebabkan terjadinya curah hujan yang tinggi di hampir seluruh wilayah Indonesia. Sebaliknya pada musim angin timuran dari bulan Mei sampai September, angin timuran menekan balik air laut dengan suhu rendah dari Samudera Hindia ke Samudera Pasifik melalui Laut Jawa, Selat Karimata dan Laut Cina Selatan, yang ditandai dengan menurunnya curah hujan di Pulau Jawa, Kalimantan dan Sumatera bagian selatan, meskipun masih terlihat curah hujan dengan intensitas tinggi di Pulau Papua, Kalimantan dan sebagian Sulawesi.

Gambar 1 menunjukkan pola angin dan distribusi spasial suhu permukaan laut (SPL) pada bulan Januari saat puncak musim angin barat dan Agustus saat puncak musim angin timur. Pola angin dan SPL, masing-masing berdasarkan data satelit QuickScat (*Quick Scatterometer*) dan NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Agency*) OI (*Optimal Interpolation*). Sementara itu curah hujan bulanan untuk bulan Januari dan Agustus berdasarkan data TRMM (*Total Rainfall Measurements Mission*) terlihat seperti pada Gambar 2. Berdasarkan Gambar 1 dan 2, terlihat adanya hubungan yang erat antara pola curah hujan dan distribusi SPL. Pada bulan Januari terlihat curah hujan tinggi di hampir seluruh wilayah Indonesia, yang berkisar antara 250 mm sampai 400 mm, dengan SPL yang tinggi diatas 28°C. Sementara itu, pada bulan Agustus terlihat rendahnya curah hujan di Indonesia, terutama pada wilayah di sebelah selatan khatulistiwa dengan total curah hujan dibawah 50 mm/bulan, dengan SPL dibawah 27°C.

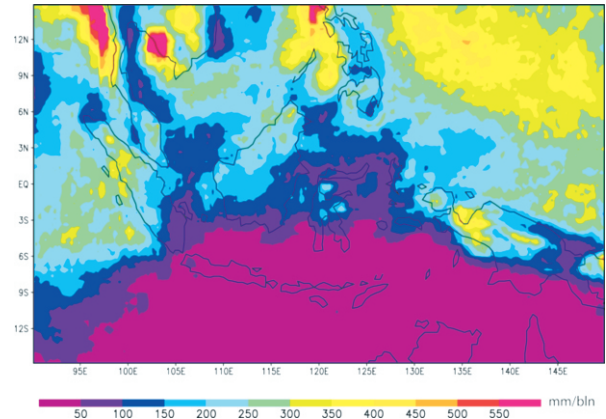


Gambar 1. Pola angin dan suhu permukaan laut (SPL) pada bulan Januari dan Agustus

a. Januari



b. Februari



Gambar 2. Siklus tahunan rata-rata curah hujan di Indonesia bulan Januari dan Agustus

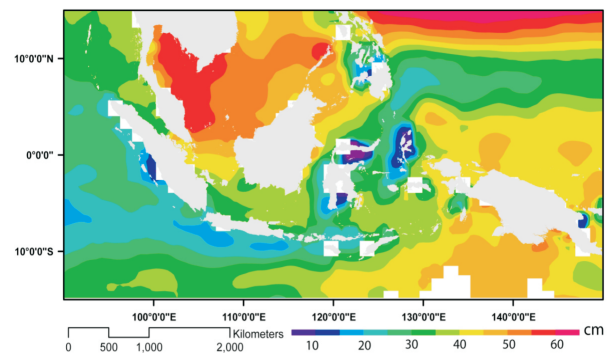
### 3.2. Proyeksi kenaikan TML berdasarkan IPCCAR-4

Secara umum TML di Samudera Pasifik 30 cm sampai 50 cm lebih tinggi dibandingkan TML di Samudera Hindia seperti yang terlihat pada Gambar 3. Pola Indonesia Through Flow (ITF) terlihat jelas dari karakteristik TML, dengan membentuk TML yang lebih rendah dibandingkan dengan TML sekitarnya, terutama ITF lintas tengah, melalui Selat Makassar dan keluar ke Samudera Hindia melalui Selat Lombok, Selat Timor dan Laut Savu, meskipun terlihat juga lintasan jalur ITF sebelah timur melalui Kepulauan Maluku dan keluar ke Samudera Hindia melalui Selat Timor dan Laut Savu. Sementara itu Jalur ITF lintas barat, melalui Selat Karimata, Laut Jawa dan Selat Lombok tidak terlihat jelas.

Hal ini mungkin disebabkan karena arus di kedua selat ini banyak dipengaruhi oleh angin, dengan kedalamannya yang dangkal hanya berkisar 40 m sampai 50 m, meskipun rata-rata arus tahunannya cenderung mengalir ke Samudera Hindia melalui Selat Lombok<sup>7)</sup>.

Kenaikan TML akibat pemanasan global menjadi sesuatu yang tidak bisa terelakkan dengan segala konsekuensinya. Pola arus musiman dan ITF mungkin akan terpengaruh dengan adanya kenaikan TML yang tidak seragam, dengan kenaikan TML di Samudera Pasifik lebih tinggi dibandingkan dengan kenaikan TML di Samudera Hindia. Pada akhirnya pola arus geostrofik akan lebih mendominasi dibandingkan dengan kondisi sekarang.

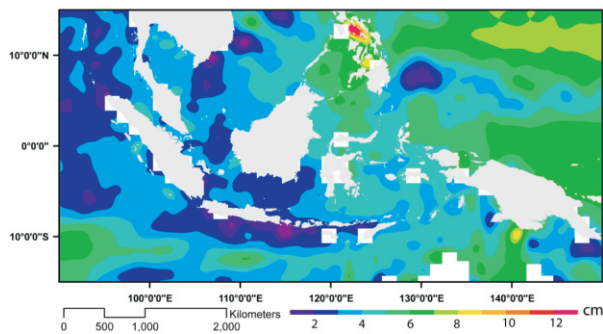
Kenaikan TML tidak hanya merubah pola arus, juga dapat mengakibatkan peningkatan terjadinya erosi, perubahan garis pantai dan mereduksi daerah *wetland* (lahan basah) di sepanjang pantai. Ekosistem lahan basah di daerah pantai mungkin akan mengalami kerusakan jika tingkat kenaikan tinggi dan suhu muka air laut melebihi batas maksimal dari kapasitas adaptasi biota pantai. Disamping itu kenaikan TML juga mempertinggi tingkat laju intrusi air laut terhadap *aquifer* daerah pantai.



Gambar 3. TML rata-rata selama 15 tahun dari Januari 1993 sampai Desember 2008, dengan menggunakan titik 0 cm berdasarkan TML regional terendah.<sup>8)</sup>

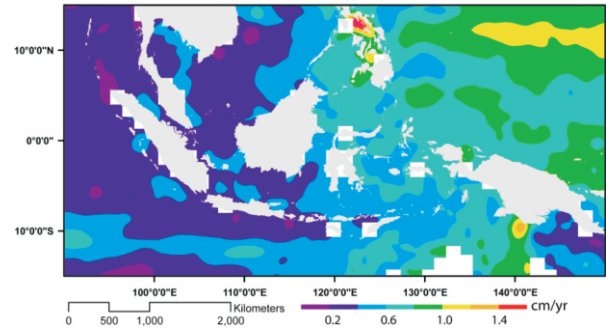
Gambar 4 menunjukkan perubahan TML menggunakan data altimeter berdasarkan analisa komparatif selama 7 tahun. Kenaikan TML terbesar terjadi di Samudera Pasifik bagian barat dengan kenaikan sebesar 8 cm, dan terendah terjadi di pantai selatan Pulau Jawa, Laut Cina Selatan, dan

pantai barat Filipina, di lokasi Mindanao Eddy (Pusaran Mindanao). Secara umum, perbedaan tingkat kenaikan TML antara Samudera Pasifik dan Hindia mungkin berdampak terhadap perubahan karakteristik ITF yang akan merubah pola iklim regional di Indonesia. Tingginya kenaikan TML di Samudera Pasifik dibandingkan dengan Samudera Hindia mempertinggi intensitas transport massa air laut hangat dari Samudera Pasifik ke Samudera Hindia. Pada akhirnya peningkatan intensitas ITF ini dapat mengakibatkan terjadinya perubahan pola hujan lokal di wilayah Indonesia.



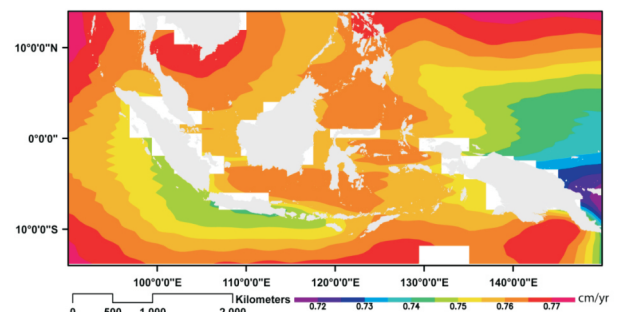
Gambar 4. Rata-rata TML dari tahun 2001 sampai 2008 dikurangi rata-rata TML dari tahun 1993 sampai 2000, dengan kenaikan TML yang bervariasi antara 2 cm sampai 12 cm, dan rata-rata kenaikan sebesar 6 cm, dalam kurun waktu 7 tahun.<sup>8)</sup>

Hasil analisa spatial trend analysis ditunjukkan pada Gambar 5. Kenaikan TML berkisar antara 0.2 cm/tahun sampai 1cm/tahun, dengan rata-rata kenaikan sebesar 0.6 cm/tahun. Kenaikan TML tertinggi terjadi di Samudera Pasifik sebelah utara Pulau Papua mencapai 1 cm/tahun, dan kenaikan terendah terjadi di pantai selatan Pulau Jawa yang hanya berkisar antara 0.2 cm/tahun sampai 0.4 cm/tahun. Selanjutnya berdasarkan kenaikan ini, TML pada tahun 2030 akan mencapai 6 cm sampai 30 cm, dengan rata-rata kenaikannya untuk seluruh wilayah Indonesia, berkisar antara 15 cm sampai 18 cm. Pada tahun 2050, TML meningkat menjadi 10 cm sampai 50 cm dengan kenaikan rata-rata sebesar 25 cm sampai 30 cm. Kenaikan TML pada tahun 2080 akan mencapai 16 cm sampai 80 cm dengan rata-rata kenaikan berkisar antara 40 cm sampai 48 cm. Pada akhirnya, TML akan meningkat sebesar 20 cm sampai 100 cm, dengan rata-rata kenaikan sebesar 50 cm sampai 60 cm.



Gambar 5. Tren kenaikan TML berdasarkan data altimeter dari Januari 1993 sampai Desember 2008 dengan menggunakan spatial trend analysis.<sup>8)</sup>

Gambar 6 menunjukkan distribusi spasial tingkat kenaikan TML berdasarkan model IPCC dengan skenario iklim SRESa1b. Kenaikan TML berdasarkan model mempunyai range yang kecil, dibandingkan dengan altimeter, meskipun mempunyai distribusi spasial yang relatif *matching* dengan perbedaan hanya terbatas di Samudera Hindia bagian utara. Kecilnya *range* TML *rise rate* berdasarkan model mungkin disebabkan oleh rendahnya resolusi spasial model global. Selanjutnya, tingkat kenaikan TML berkisar antara 0.7 cm/tahun sampai 0.8 cm/tahun. TML naik  $22.5 \pm 1.5$  cm pada tahun 2030 relatif terhadap TML tahun 2000, selanjutnya akan berkisar antara 35 cm sampai 40 cm pada tahun 2050. TML akan terus naik dan mencapai  $60 \pm 4$  cm pada tahun 2080, dan mencapai  $75 \pm 5$  cm pada tahun 2100. Hasil estimasi kenaikan TML berdasarkan altimeter, pasut (gambar tidak ditampilkan) dan model, menunjukkan tren yang sama dengan tingkat kenaikan rata-rata sekitar 0.6 cm/tahun sampai 0.8cm/tahun.



Gambar 6. Estimasi tingkat kenaikan TML di Perairan Indonesia berdasarkan skenario IPCC SRESa1b dengan asumsi konsentrasi CO2 sebesar 750ppm.<sup>8)</sup>

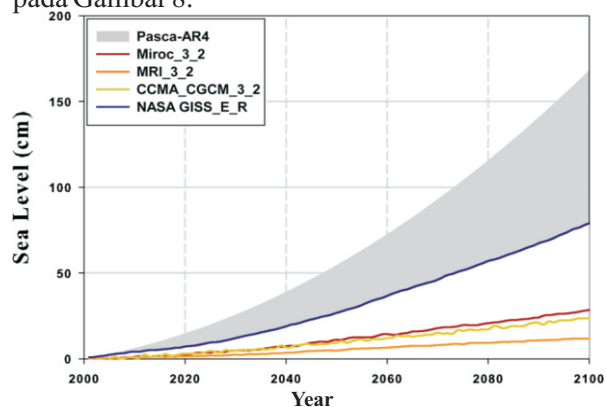
### 3.3. Proyeksi Kenaikan TML (Pasca-IPCC AR4)

Dengan menggunakan model, data observasi dan hasil penelitian sampai tahun 2005, kesimpulan mendasar yang tertuang dalam IPCC AR4 adalah kenaikan konsentrasi Gas Rumah Kaca (GRK) selama 50 tahun terakhir yang diakibatkan oleh aktivitas manusia. Sebagai konsekuensi, kenaikan konsentrasi GRK tidak hanya menaikkan suhu udara dan laut, tapi secara langsung dapat menaikkan TML melalui proses *thermosteric*. Lebih lanjut lagi, kenaikan konsentrasi GRK ini menyebabkan naiknya suhu global, terutama di Greenland dan Antartika serta Siberia bagian tengah. Sebagai tambahan, berdasarkan IPCC AR4 kenaikan TML diperkirakan akan berkisar antara 20 cm sampai 80 cm, meskipun model NASA GISS E\_R menunjukkan kenaikan TML sekitar 90cm sampai tahun 2100. Hasil riset dalam IPCC AR4 hanya menitik beratkan pada naiknya TML akibat proses *thermosteric* dengan prosentase sebesar 70% dan mencairnya es glasier sebesar 30%. Sementara itu, hasil riset yang dilakukan setelah tahun 2005, menunjukkan adanya kenaikan intensitas mencairnya es baik di Antartika maupun Greenland.

Rahmstorf<sup>9)</sup> menggunakan korelasi dan hubungan antara kenaikan TML dan kenaikan temperatur permukaan memprediksi kenaikan TML pada akhir abad ke-21, berkisar antara 50 cm sampai 140 cm relatif terhadap TML tahun 1990. Prediksi ini lebih tinggi daripada proyeksi IPCC AR4. Lebih lanjut, bahwa kenaikan TML sampai tahun 1990, karena perubahan massa, hanya didominasi oleh mencairnya es glasier<sup>10)</sup>, maka prediksi Rahmstorf<sup>9)</sup> tidak memuat perubahan TML karena mencairnya es di Antartika dan Greenland.

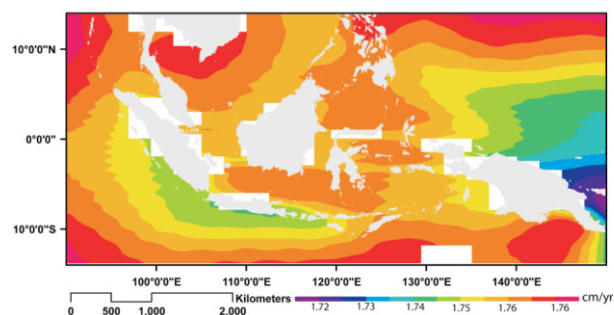
Berdasarkan USGS<sup>11)</sup>, mencairnya es di Greenland terjadi sejak pertengahan tahun 1990-an, dengan pertambahan akselerasi pencairan dari waktu ke waktu. Meskipun masih terlihat adanya pertambahan ketinggian es di daerah dataran tinggi karena turunnya salju, tetapi pencairan es di daerah pantai dan dataran rendah lebih intensif dan jauh lebih besar. Mencairnya es di Greenland berkisar antara 100 Gt/tahun (gigaton per tahun, dimana 360 Gt es identik dengan penambahan TML sebesar 1mm) pada akhir tahun 1990-an dan bertambah menjadi 200 Gt/tahun berdasarkan hasil observasi

tahun 2006. Perubahan massa es di Antartika berkisar antara 80Gt/tahun pada pertengahan tahun 1990-an, dan meningkat menjadi 130Gt/tahun. Hal ini berakibat terhadap penambahan tingkat kenaikan TML karena perubahan massa es, sehingga total kenaikan TML menjadi 140 cm sampai 180 cm. Sehingga proyeksi kenaikan TML global pada tahun 2100 terilustrasikan pada Gambar 7. Dengan menggunakan perubahan TML pasca AR4 maka distribusi spasial tingkat kenaikan TML secara linier dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 8.



Gambar 7. Kenaikan TML pada tahun sampai tahun 2100, relatif terhadap TML pada tahun 2000.<sup>8)</sup>

Berdasarkan grafik kenaikan TML (Gambar 7) maka TML akan mencapai 175 cm pada tahun 2100 relatif terhadap TML tahun 2000. Sementara itu TML pada tahun 2030 naik sebesar 52.5 cm, tahun 2050 naik sebesar 87.5 cm, dan naik 140cm pada tahun 2080. Kecenderungan ini mendorong makin tingginya abrasi, erosi dan genangan air laut, tidak hanya disebabkan oleh makin tingginya TML, tapi juga oleh gelombang badai, pasang surut, serta variabilitas iklim ekstrim seperti La Niña yang termodulasi dengan tingginya TML tersebut.



Gambar 8. Estimasi tingkat kenaikan TML di Perairan Indonesia berdasarkan model dengan penambahan *dynamic ice melting* pasca IPCCAR4.<sup>8)</sup>

### 3.4. Proyeksi El Niño dan La Niña

El Niño ditandai dengan menurunnya SPL di Perairan Indonesia, dan meningkatnya SPL di Samudera Pasifik tropis bagian timur, dengan kenaikan SPL lebih dari 0.5°C. Tekanan udara di Indonesia naik menyebabkan melemahnya *Pacific trade wind* dan meningkatnya angin lokal timuran, meskipun pada permulaan fase El Niño seringkali ditemukan fenomena *wind burst* angin lokal baratan. Menurunnya SPL, dan berpindahnya *warm-pool* (kolam hangat) dari Perairan Indonesia ke Samudera Pasifik tropis bagian tengah menyebabkan berkurangnya curah hujan di sebagian besar Indonesia. Hal ini menyebabkan timbulnya bahaya kebakaran, dan kekeringan terutama untuk daerah Indonesia bagian timur. Sementara itu, La Niña adalah fenomena alam dengan proses dan dampak yang berlawanan dengan El Niño.

La Niña ditandai dengan naiknya SPL di Perairan Indonesia, dan menurunnya SPL di Pasifik tropis bagian timur lebih dari 0.5°C. Pada periode La Niña, terjadi peningkatan intensitas *Pacific trade wind*, yang menyebabkan berpindahnya *warm-pool* lebih ke barat dibandingkan dengan kondisi normal. Perpindahan *warm-pool* lebih ke barat menyebabkan makin intensifnya hujan di Indonesia, sehingga mempertinggi risiko banjir. Disamping itu kenaikan SPL yang mempertinggi risiko *coral bleaching*.

Dengan menggunakan analisa wavelet terhadap data SPL NINO3 dari model MRI 3.2 pada skenario SRESa1b, Sofyan<sup>12)</sup> melaporkan bahwa El Niño dan La Niña berpotensi terjadi dengan periode 2 sampai 3 tahun sekali. Sementara itu, El Niño dan La Niña terbesar yang terjadi pada tahun 2005 sampai dengan 2015, 2015 sampai 2025, 2050 sampai 2055 dan 2065 sampai 2070. Terjadinya El Niño akan berlanjut dengan terjadinya La Niña. Periode transisi ini menyebabkan terjadinya kenaikan drastis tinggi muka air laut mencapai 20 cm. Disamping kenaikan tinggi muka air laut yang drastis ENSO menyebabkan terjadinya cuaca ekstrem yang berpeluang menimbulkan terjadinya gelombang tinggi, serta kerusakan terumbu karang akibat kenaikan SPL yang drastis pada fase La Niña.

### 3.5. ENSO dan Tinggi Gelombang

Secara umum, hasil estimasi tinggi gelombang menunjukkan bahwa tinggi gelombang

di Perairan Indonesia dipengaruhi oleh angin musiman. Pada bulan November sampai Maret, tinggi gelombang di Pasifik lebih tinggi dibandingkan dengan tinggi gelombang signifikan di Samudera Hindia. Gambar 9 menunjukkan rata-rata tinggi SWH (*Significant wave height*, tinggi gelombang signifikan) pada puncak bulan basah, Desember, Januari dan Pebruari, berdasarkan hasil model WAVEWATCH III. Secara umum, di Samudera Pasifik sebelah utara Papua mencapai 3m atau lebih, sementara tinggi gelombang di Samudera Hindia selatan Pulau Jawa dan sebelah barat Sumatera mencapai 2.5 m.

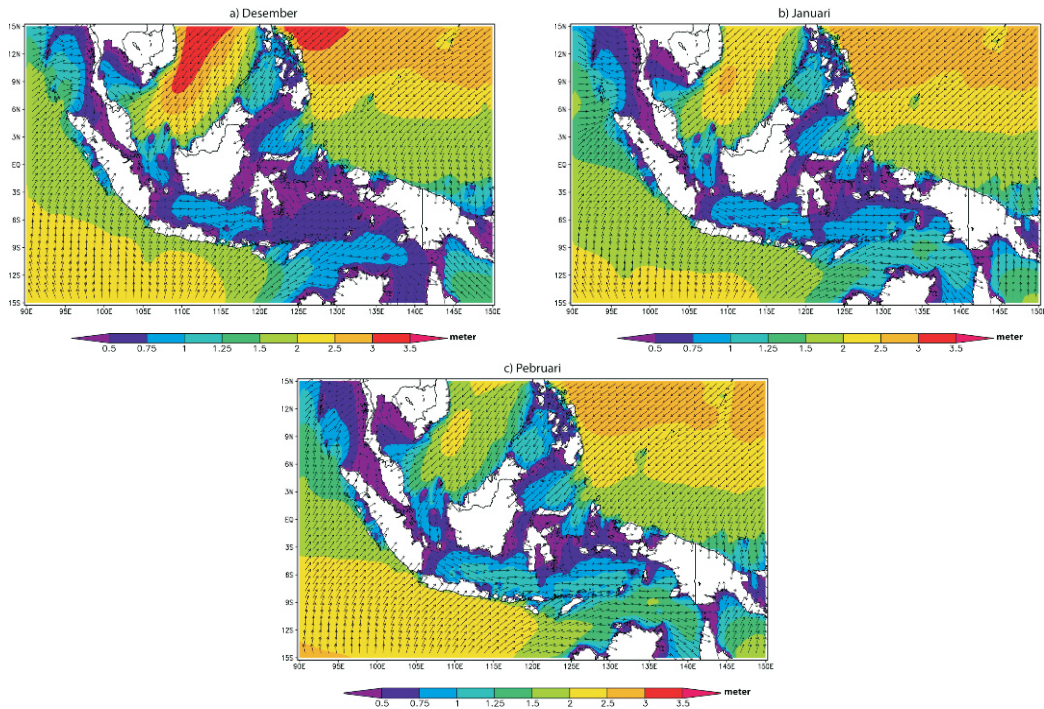
Selanjutnya tinggi gelombang di Laut Jawa hanya berkisar antara 0,5 m sampai 1,5 m dengan tinggi gelombang signifikan tertinggi terjadi pada bulan Pebruari. Tinggi gelombang di Laut Sulawesi, Selat Karimata dan Laut Cina Selatan bagian selatan mencapai puncak tertinggi pada bulan Pebruari dengan ketinggian mencapai 2,5 m. Selanjutnya tinggi gelombang di Laut Banda dan Flores mencapai puncaknya pada bulan Pebruari dengan ketinggian sekitar 2 m.

Rata-rata arah gelombang di belahan utara khatulistiwa menuju ke selatan sedangkan arah gelombang di belahan selatan khatulistiwa menuju ke utara dari Samudera Hindia. Intrusi gelombang dari Samudera Hindia terlihat mulai intensif dari bulan Maret, melalui Selat Lombok, sampai Selat Makassar. Sementara arah gelombang di Laut Jawa cenderung untuk bergerak ke timur sampai Laut Banda, dan Flores.

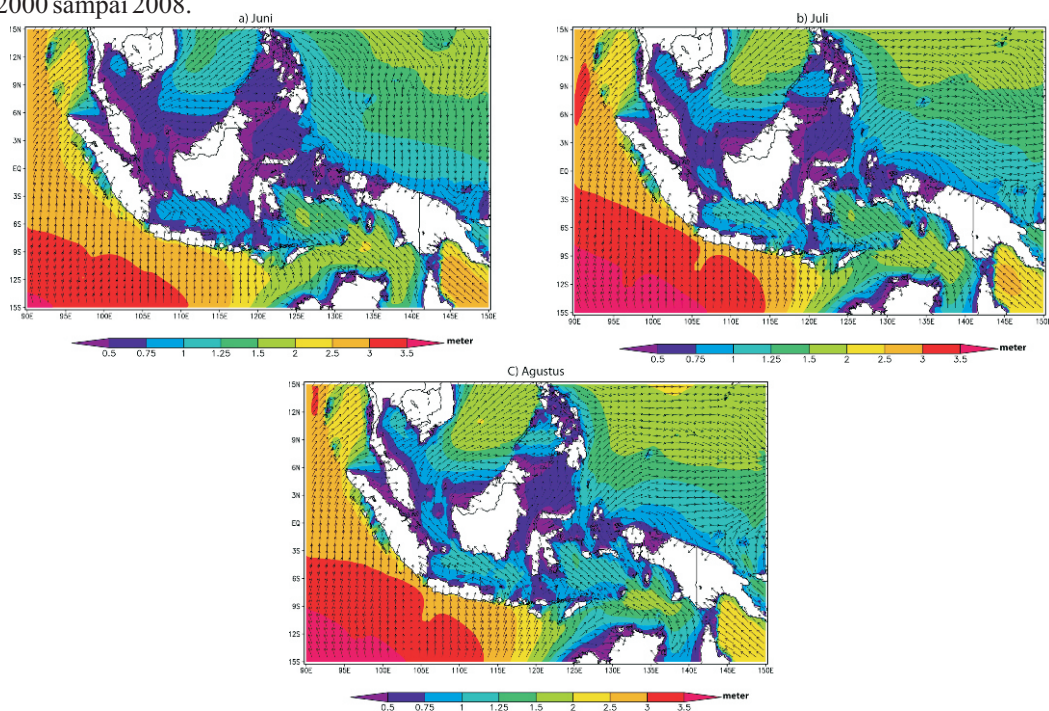
Selanjutnya pada bulan Mei sampai September, tinggi gelombang di Samudera Hindia lebih tinggi dibandingkan dengan tinggi gelombang di Samudera Pasifik. Rata-rata tinggi gelombang signifikan pada puncak monsun Australia ditunjukkan pada Gambar 10. Secara umum, tinggi SWH di Samudera Hindia mencapai 3 m atau lebih, sementara tinggi gelombang di Samudera Pasifik hanya mencapai 2.5 m. Selanjutnya tinggi gelombang di Laut Jawa hanya berkisar antara 1 m sampai 1,5 m dengan tinggi gelombang signifikan tertinggi terjadi pada bulan Agustus dan September. Tinggi gelombang di Laut Sulawesi, Selat Karimata dan Laut Cina Selatan bagian selatan melemah dan hanya berkisar antara 1,5 m sampai 2 m. Selanjutnya tinggi gelombang di Laut Banda dan Flores mencapai puncaknya pada bulan Juli dan Agustus dengan ketinggian sekitar 1,5 m. Sementara itu, rata-rata arah gelombang

bergerak dari selatan ke utara searah dengan arah angin musiman, meskipun di Samudera Pasifik, masih terlihat propagasi gelombang ke selatan pada awal dan akhir periode monsun Australia. Arah gelombang di Laut Jawa, Banda dan Flores

bergerak ke barat, dengan semakin intensifnya intrusi gelombang dari Samudera Hindia melalui Selat Lombok, sampai Selat Makassar dan Laut Sulawesi.



Gambar 9. Rata-rata tinggi gelombang signifikan pada puncak monsun Asia Desember, Januari dan Pebruari dari tahun 2000 sampai 2008.



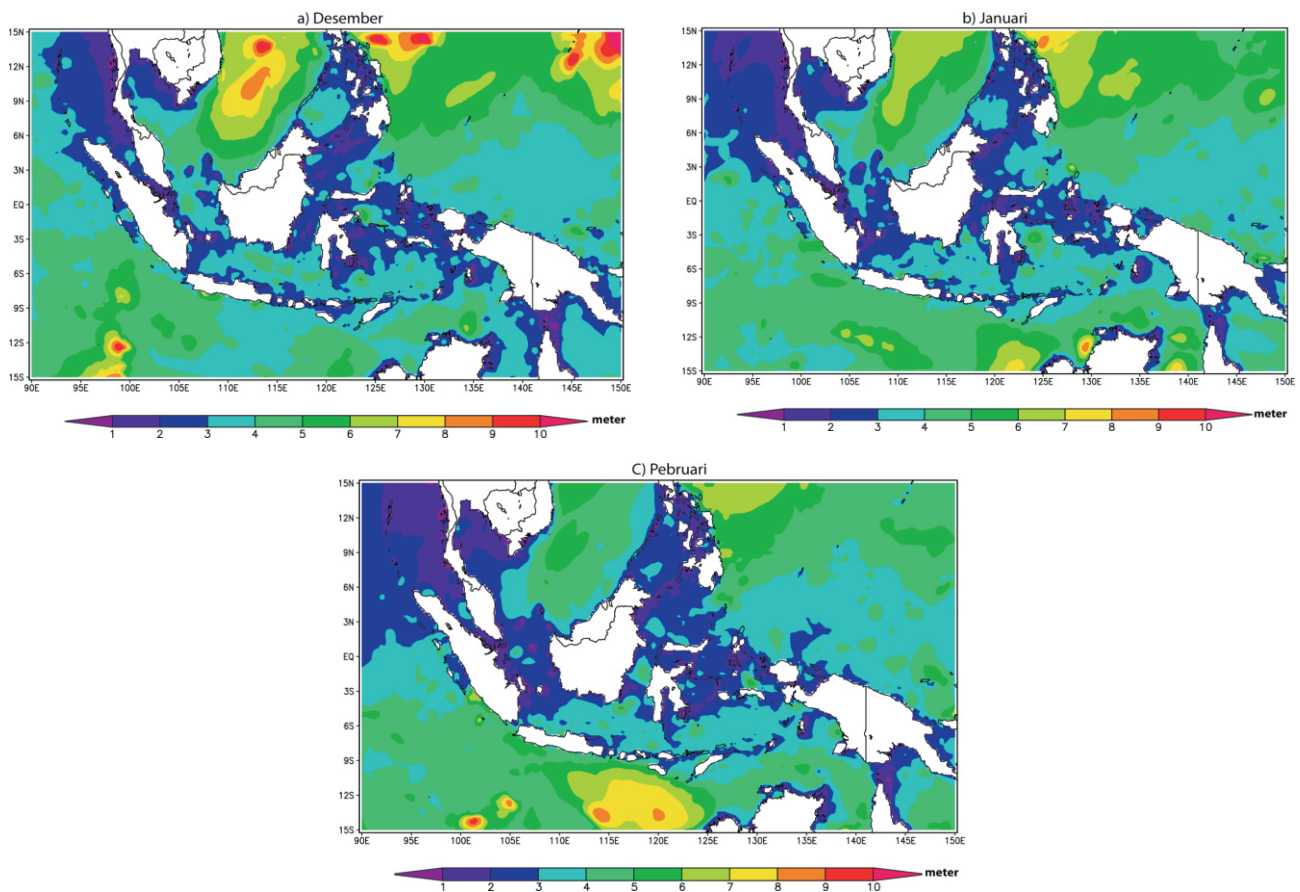
Gambar 10. Rata-rata tinggi gelombang signifikan pada puncak monsun Australia dari Juni, Juli dan Agustus dari tahun 2000 sampai 2008.

Tinggi gelombang ekstrim bulanan pada periode monsun Asia menunjukkan bahwa rata-rata tinggi gelombang maksimum di Perairan Indonesia berkisar antara 1 m sampai 6 m, dengan tinggi gelombang maksimum mencapai 6 m di Samudera Pasifik sebelah utara Papua (Gambar 11). Meskipun terlihat, bahwa tinggi gelombang signifikan maksimum di Pasifik dan Laut Cina Selatan mencapai tinggi maksimum pada bulan Desember yang mencapai 9 m sampai 10 m, kemudian melemah sekitar 6 m sampai 7 m, pada bulan Januari dan Pebruari.

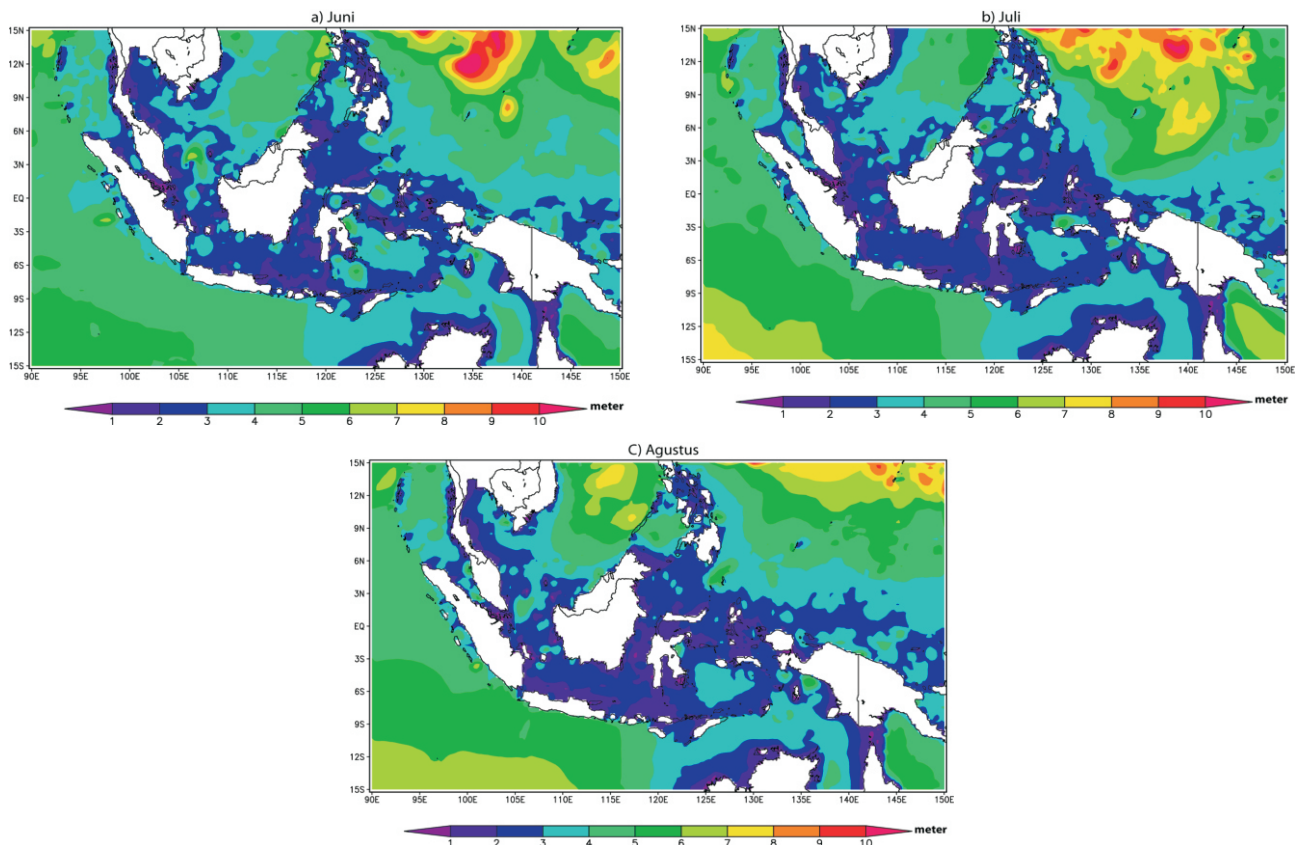
Sedangkan tinggi gelombang signifikan maksimum di laut Jawa berkisar antara 3m sampai 3,5 m, terutama pada bulan Januari dan Pebruari dengan tinggi gelombang maksimum mencapai 3,5 m.

Secara umum terlihat bahwa tinggi gelombang signifikan maksimum di Laut Jawa bagian selatan (Pantai Utara Jawa) lebih tinggi dibandingkan dengan tinggi gelombang maksimum di pantai selatan Kalimantan. Kecenderungan ini mempertinggi risiko banjir di Pantai Utara Jawa, karena bertepatan dengan puncak musim penghujan.

Tinggi gelombang signifikan maksimum di Pantai Selatan Jawa meningkat dari bulan Desember sampai Pebruari, dan mencapai 3,5 m. Tinggi gelombang signifikan di Selat Karimata bagian selatan cenderung rendah dengan ketinggian sekitar 3 m. Sementara tinggi gelombang signifikan maksimum di Laut Banda, Flores dan Sulawesi mencapai 2 m sampai 3.5 m.



Gambar 11. Rata-rata tinggi gelombang signifikan maksimum pada puncak monsun Asia, Desember sampai Pebruari dari tahun 2000 sampai 2008



Gambar 12. Rata-rata tinggi gelombang signifikan maksimum pada puncak monsun Australia, Juni sampai Agustus dari tahun 2000 sampai 2008

Tinggi gelombang signifikan maksimum pada periode monsun Australia ditunjukkan pada Gambar 12. Terlihat penurunan tinggi gelombang signifikan maksimum di Laut Jawa, Banda, Flores, Selat Karimata, dan Laut Sulawesi, yang hanya berkisar antara 1 m sampai 3 m. Ketinggian rata-rata gelombang signifikan maksimum di Samudera Pasifik lebih tinggi dibandingkan dengan Samudera Hindia selatan Jawa. Tekanan angin menyebabkan tinggi gelombang maksimum di Laut Jawa sebelah utara lebih tinggi dibandingkan dengan pantai utara Jawa, dengan perbedaan ketinggian antara 1 m sampai 2 m. Secara umum, tinggi gelombang maksimum pada periode monsun Australia lebih rendah dibandingkan tinggi gelombang maksimum pada periode monsun Asia. Sebagai penutup, tingginya gelombang signifikan maksimum ini akan menghambat arus barang antar pulau yang menggunakan sarana transportasi laut, selain mempertinggi risiko banjir pada daerah pantai dengan elevasi rendah antara 0 m sampai 3 m.

#### IV. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisa dan pembahasan dampak pemanasan global terhadap tinggi muka laut (TML), dan variabilitas iklim yang terdiri dari El Nino dan La Niña, dapat disimpulkan bahwa:

1. Hasil analisa dengan menggunakan data altimeter menunjukkan kenaikan TML berkisar antara 0.2 cm/tahun sampai 1 cm/tahun, dengan rata-rata kenaikan sebesar 0.6 cm/tahun. Kenaikan TML tertinggi terjadi di Samudera Pasifik sebelah utara Pulau Papua mencapai 1cm/tahun, dan kenaikan terendah terjadi di pantai selatan Pulau Jawa yang hanya berkisar antara 0.2 cm/tahun sampai 0.4 cm/tahun. Model IPCC menunjukkan bahwa tingkat kenaikan TML berkisar antara 0.7 cm/tahun sampai 0.8 cm/tahun.
2. Berdasarkan hasil penelitian sejak tahun 2006, dengan memasukkan perubahan massa es dinamis dari mencairnya es di Greenland dan Antartika, didapatkan bahwa tingkat kenaikan TML akan mencapai 175 cm pada tahun 2100

relatif terhadap TML tahun 2000. Sementara itu TML pada tahun 2030 naik sebesar 52.5 cm, tahun 2050 naik sebesar 87.5, dan naik 140 cm pada tahun 2080. Kecendrungan ini mendorong makin tingginya abrasi, erosi dan genangan air laut, tidak hanya disebabkan oleh makin tingginya TML, tapi juga oleh gelombang badai, pasang surut akibat gravitasi bulan dan matahari, serta La Niña yang termodulasi dengan tingginya TML tersebut.

3. Hasil analisa kejadian *extreme events* (ENSO) sampai tahun 2100 dengan menggunakan hasil model untuk SPL di daerah NINO3, menunjukkan terjadinya kenaikan frekuensi ENSO dari 3 sampai 7 tahun sekali, menjadi 2 tahun sekali.
4. Pada saat terjadi El Niño, TML akan terdepresi sebesar 20 cm dibawah normal, dan pada periode La Niña akan terelevasi sebesar 10 cm sampai 20 cm. Hal ini berpengaruh terhadap resiko erosi, abrasi dan genangan air laut, terutama pada saat terjadi La Niña, dengan intensitas hujan yang lebih tinggi.
5. La Niña dan El Niño mengakibatkan terjadinya gelombang pasang dengan variasi antara 2.1 m sampai 5 m, meskipun El Niño tidak menimbulkan dampak yang signifikan terhadap tinggi gelombang di Samudera Hindia. Tingginya gelombang laut pada fase El Niño dan La Niña akan mempertinggi intensitas erosi dan abrasi, dengan tingkat kerusakan yang tinggi pula. Pada akhirnya, dengan intensitas El Niño dan La Niña yang semakin tinggi, dapat mengakibatkan tingkat perubahan garis pantai yang semakin tinggi pula, meskipun tingkat kenaikan TML hanya 1 cm/tahun.
6. Besarnya dampak perubahan iklim di wilayah pesisir dan Laut Indonesia bagian timur tersebut, perlu disusun strategi adaptasi dan mitigasi, diantaranya strategi proteksi, akomodasi, dan *retreat-adaptation*.

## V. DAFTAR PUSTAKA

- <sup>1)</sup> Timmermann, A. M. Latif, A. Bacher, J. Oberhuber, & E. Roeckner, (1999). Increased El-Niño, Nature, 398, 694-696.
- <sup>2)</sup> Timmermann, A. (2001). Changes of ENSO stability due to Greenhouse Warming, Geophysical Research Letters, 28(8), 2064-

2066.

- <sup>3)</sup> Torrence, C., & G. P. Compo. (1999). A Practical Guide to Wavelet Analysis, Bulletin of the American Meteorological Society, 79(1), 61-78.
- <sup>4)</sup> Elsner, J. B., J. P. Kossin, & T. H. Jagger. (2008). The increasing intensity of the strongest tropical cyclones, Nature, 455, 92-95.
- <sup>5)</sup> Webster, P. J., G. J. Holland, J. A. Curry, & H. R. Chang. (2005). Changes in tropical cyclone number, duration, and intensity in a warming environment, Science, 309, 1844-1846.
- <sup>6)</sup> Vermeer, M., & S. Rahmstorf. (2009). Global sea level linked to global temperature, PNAS, 106(51), 21527-21532.
- <sup>7)</sup> Sofian, I, Kozai, K, & Ohsawa, T. (2008). Investigation on the relationship between wind-induced volume transport and mean sea level in the Java Sea using an oceanic general circulation model. Journal of Marine and Meteorological Society of Japan, Umitosora, 84.
- <sup>8)</sup> Bappenas-GTZ. (2010). Indonesian Climate Change Sectoral Roadmap (ICCSR).
- <sup>9)</sup> Rahmstorf, S. (2007). A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. Science, 315, 368-370.
- <sup>10)</sup> N. L. Bindoff et al. (2007). in Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, chap.5. Cambridge, UK, USA.
- <sup>11)</sup> USGS. (2009). Abrupt Climate Change, Final Report, Synthesis and Assessment Product 3.4, USA.
- <sup>12)</sup> Sofian, I. (2010). Pengarusutamaan isu perubahan iklim dalam perencanaan pembangunan nasional, Analisis dan proyeksi kenaikan tinggi muka laut dan iklim ekstrim, Bappenas-GTZ.
- <sup>13)</sup> Sofian, I., & A.B. Wijanarto. (2008). Kenaikan Tinggi Muka Laut di Jakarta berdasarkan IPCC AR4, Jurnal Geomatika, Vol. 14(2), 71-80.
- <sup>14)</sup> Hasselmann, D. E., M. Dunkel, & J. A. Ewing. (1980). Directional wave spectra observed

during JONSWAP 1973. *Journal of Phys. Oceanography*, 10, 529-549.

- <sup>15)</sup> Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, & D. P. Rowell. (2003). Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century, *Journal of Geoph. Res.*, 108(14), 4407.

- <sup>16)</sup> Tolman, H. L., & D. V. Chalikov. (1996). Source terms in a third-generation wind wave model, *Journal of Phys. Oceanography*, 26, 2497-2518.

- <sup>17)</sup> Tolman, H. L. (2002.) User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 2.22, NOAA/NWS/NCEP, 110 pp.