



Kajian Risiko dan Adaptasi Terhadap Perubahan Iklim Pulau Lombok Provinsi Nusa Tenggara Barat

Analisis dan Proyeksi Kenaikan Muka Laut
dan Iklim Ekstrim



gtz



DAFTAR ISI

ISI	i
GAMBAR	iii
TABEL	vi
1 PENDAHULUAN	1
.1 Latar Belakang	1
.2 Maksud dan Tujuan	4
2 IKLIM DAN KONDISI OSEANOGRAFI PULAU LOMBOK	6
.1 Pola Angin dan Hujan.....	6
.2 Variasi Tinggi Muka Laut	7
.2.1 Arus dan Tinggi Muka Laut	7
.2.2 Tinggi Muka Laut, El Niño dan La Niña	9
.3 Tinggi Gelombang	12
.4 Distribusi klorofil-a dan Suhu Permukaan Laut (SPL).....	14
3 DATA DAN METODE ANALISIS	16
.1 Data	16
.2 Metode Kajian	17
.2.1 Analisis Kenaikan SPL dan TML	17
.2.2 Validasi Hasil Permodelan	17
.2.3 Analisis <i>Extreme Events</i>	18
4 HASIL DAN PEMBAHASAN	21
.1 Analisis dan Proyeksi Kenaikan Suhu Permukaan Laut.....	21

.2 Analisis dan Proyeksi Kenaikan Tinggi Muka Laut.....	25
.2.1 Berdasarkan IPCC AR4.....	25
.2.2 Kenaikan tinggi muka laut pasca-IPCC AR4	28
.3 Proyeksi Extreme Events.....	32
.3.1 Frekuensi ENSO.....	33
.3.2 ENSO dan Tinggi Muka Laut.....	36
.3.3 ENSO dan Gelombang Ekstrim.....	37
.3.4 ENSO dan <i>Coral Bleaching</i>	40
.3.5 ENSO, Suhu Permukaan Laut dan Konsentrasi Klorofil-a.....	42
5 KESIMPULAN DAN SARAN	46
PUSTAKA	50

DAFTAR GAMBAR

1.1	Konsentrasi CO ₂ bulanan dari tahun 1980 sampai 2008. Tren kenaikan konsentrasi CO ₂ sebesar 162 ppm/	2
1.2	<i>Time series</i> temperatur udara menggunakan data observasi dan model dari tahun 1870 sampai tahun 2000, dengan kenaikan sekitar 1°C (Folland, et al., 2001)	2
1.3	<i>Time series</i> SPL anomali global hasil observasi, dari tahun 1870 sampai tahun 2000, dengan kenaikan SPL sekitar 0.4°C/abad±0.17°C/abad (Rayner, et al., 2001)	3
2.1	Pola angin dan suhu permukaan laut (SPL) pada bulan Januari dan	7
2.2	Siklus tahunan rata-rata curah hujan di Pulau Lombok dan	8
2.3	Distribusi tinggi muka air laut dan pola arus pada bulan a. Januari dan b. Agustus. Tinggi muka air laut dan pola arus adalah rata-rata bulanan selama 7 tahun, dari tahun 1993 sampai 1999 (Sofian, 2007)	9
2.4	Siklus tahunan Tinggi Muka Laut berdasarkan data pasut dan	10
2.5	<i>Time series</i> Tinggi Muka Laut di pantai Utara dan Selatan Pulau Lombok dan	10
2.6	<i>Time series</i> altimeter ADT (<i>Absolute Dynamic Topography atau Sea Level</i>) anomali dan SOI dari Januari 1993 sampai September	11
2.7	<i>Time series</i> volume transport air laut permukaan di Selat Makassar dari 0 sampai 50 m. <i>Negatif volume transport</i> mengindikasikan transport masa air laut ke Selatan (1 Sv = 1 juta /detik) (Sofian, 2007)	12
2.8	Tinggi gelombang harian di pantai Utara Pulau Lombok dari Januari 2006 sampai Desember 2008, dengan rata-rata tinggi gelombang 1.2	13
2.9	Tinggi gelombang harian di pantai Selatan Pulau Lombok dari Januari 2006 sampai Desember 2008, dengan rata-rata tinggi gelombang 1.5	13
2.10	Siklus tahunan rata-rata SPL di pantai Utara dan Selatan serta konsentrasi klorofil-a di pantai Selatan Pulau	14
2.11	Pola sebaran klorofil-a pada bulan Januari dan	15

3.1	Diagram alir estimasi kenaikan tinggi muka air laut dengan menggunakan data historis dan model IPCC, yang terdiri dari 3 model, yaitu MRI, CCCMA CGCM 3.2 dan Miroc 3.	17
3.2	Klimatologi tinggi muka air laut berdasarkan data pasut, altimeter dan ...	18
3.3	Wavelet	19
3.4	Proses penentuan Nino3 yang digunakan untuk estimasi terjadinya El Niño dan La	19
3.5	Hasil analisis wavelet dengan menggunakan data SPL Nino3 hasil model MRI untuk skenario	20
4.1	<i>Time series</i> SPL berdasarkan data paleoklimat dari 150 ribu tahun yang lalu sampai tahun 2005 (Hansen, 2006)	21
4.2	SPL di pantai Utara dan Selatan Pulau Lombok berdasarkan data NOAA OI SST, dari Januari 1981 sampai September	22
4.3	Global SPL <i>trend</i> berdasarkan data observasi dari tahun 1870 sampai 2000, dengan tingkat kenaikan SPL mencapai 0.4°C/abad±0.17°C/abad (Rayner, et al., 2003)	23
4.4	Tingkat kenaikan SPL berdasarkan hasil model MRI_CGCM 3.	23
4.5	Estimasi kenaikan TML (TML) dengan menggunakan data pasut di sekitar Pulau Lombok. Estimasi kenaikan TML di pantai Utara digunakan data pasut di Benoa sebagai	25
4.6	Distribusi kenaikan TML sampai tahun 2100 berdasarkan data satelit ...	26
4.7	Estimasi TML di a. pantai Utara dan b. pantai Selatan Pulau Lombok berdasarkan skenario IPCC SRESa1b dengan asumsi konsentrasi CO2 sebesar	27
4.8	<i>Positive feedback</i> antara mencairnya es dan peningkatan suhu permukaan (UNEP/GRID-ARENDAL, 2007)	29
4.9	Perubahan suhu Antartika selama 30 tahun terakhir (sumber: Earthobservatory, NASA, 2007).....	29

4.10	Perubahan tinggi lapisan tutupan es di Greenland berdasarkan analisis dengan menggunakan satelit IceSAT (sumber: Earthobservatory, NASA, 2007).....	31
4.11	Kenaikan TML pada tahun sampai tahun 2100, relatif terhadap TML pada tahun 2000, berdasarkan kajian pasca-IPCC	32
4.12	Hasil analisis wavelet untuk data historis dari tahun 1871 sampai	34
4.13	Hasil analisis wavelet untuk skenario	35
4.14	Time series altimeter ADT/TML dari tahun 1993 sampai 2008. TML turun sampai 20cm pada periode El Niño kuat, dan naik 20cm pada periode La Niña	37
4.15	Tinggi gelombang a. rata-rata dan b. maksimum yang diolah dari data <i>altimeter significant wave height</i> dari tahun 2006 sampai	38
4.16	Tinggi gelombang harian di a. pantai Utara dan b. pantai Selatan Pulau Lombok dari Januari 2006 sampai Desember	39
4.17	Pola angin pada fase a. El Nino (1 Januari 2007) dan b. La Nina (1 Januari 2008).....	40
4.18	Lokasi pemutihan terumbu karang karena pengaruh kenaikan suhu laut dari tahun 1998 sampai tahun 2006 (Marshall and Schuttenberg, 2006)	41
4.19	Peta kerusakan dan pemutihan terumbu karang berdasarkan data dari Basereef.	41
4.20	SPL anomali bulan Agustus dan September dari tahun 1980 sampai 2008, dengan kenaikan SPL sebesar 0.75°C pada periode La Niña, dan penurunan sebesar 0.75°C pada periode El	44
4.21	Distribusi spasial klorofil-a pada bulan September pada kondisi normal, El Niño dan La	45
5.1	Diagram alir penentuan daerah genangan akibat kenaikan	48

DAFTAR TABEL

4.1	Proyeksi kenaikan SPL di sekitar Pulau	24
4.2	Proyeksi kenaikan SPL di sekitar Pulau	24
4.3	Proyeksi kenaikan TML di pantai Utara Pulau	27
4.4	Proyeksi kenaikan TML di pantai Selatan Pulau	28
4.5	ENSO <i>time-table</i> berdasarkan MRI model	35

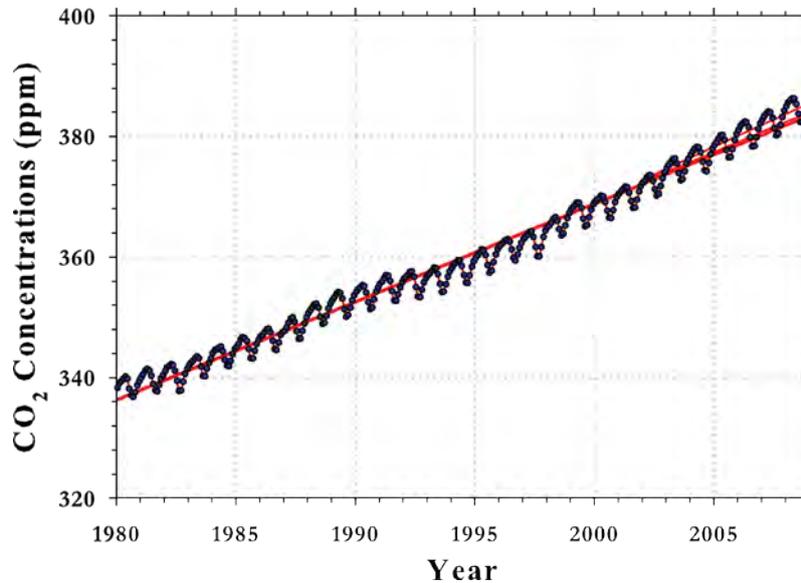
BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Belakang

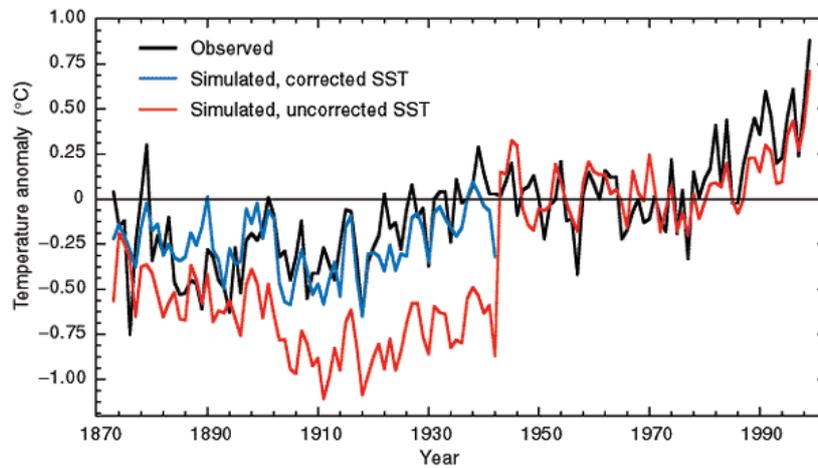
Lingkungan pantai merupakan daerah yang sangat rentan terhadap pengaruh aktivitas penduduk dan kondisi alam terutama naiknya tinggi muka air laut. Hampir setengah populasi penduduk dunia menempati daerah pantai sampai 100 kilometer dari garis pantai. Hal ini menyebabkan terjadinya kerawanan yang serius terhadap naiknya tinggi muka air laut akibat pemanasan global (*global warming*).

Sementara itu, penduduk dunia pada umumnya, merupakan penyumbang terbesar terhadap kenaikan gas rumah kaca (GRK) yang meliputi uap air (H_2O), karbon dioksida (CO_2), metan (CH_4), dan *chlorofluorocarbons* (CFC). Konsentrasi sebagai penyumbang terbesar dalam *global warming* ditunjukkan pada Gambar 1.1, dari tahun 1980 sampai tahun 2008, dengan tingkat kenaikan sebesar 162 ppm/abad, dengan prediksi pada tahun 2100 mencapai 540 ppm. Data global konsentrasi berasal dari *Earth Research Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration* (ERL NOAA). *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 2007) menyatakan bahwa pemanasan global terjadi dengan intensif sejak tahun 1910 sampai 1940, dan lebih intensif lagi sejak tahun 1970, dan berlanjut sampai sekarang. Pengaruh pemanasan global secara langsung tercermin dari perubahan suhu udara global.

Gambar 1.2 menunjukkan *time series* suhu udara global dari tahun 1870 sampai tahun 2000 (Folland et al., 2001). Data suhu udara yang digunakan oleh Folland, et al. (2000), adalah data observasi dan estimasi model dengan menggunakan data suhu permukaan laut (SPL, *Sea Surface Temperature*, SST). Kenaikan suhu udara dimulai dari tahun 1900-an, dengan didahului oleh penurunan suhu udara dari tahun 1870 sampai 1900. Sebagai tambahan, tren kenaikan suhu udara yang dimulai sejak tahun 1900-an dengan kenaikan suhu udara global mencapai 1°C/abad, memicu kenaikan suhu permukaan laut (SPL) dengan pola kenaikan yang sama.

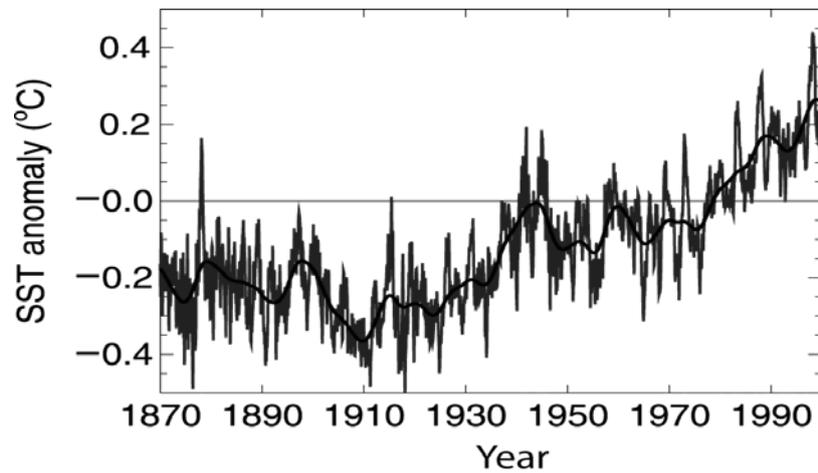


Gambar 1.1 Konsentrasi CO₂ bulanan dari tahun 1980 sampai 2008. Tren kenaikan konsentrasi CO₂ sebesar 162 ppm/abad



Gambar 1.2 *Time series* temperatur udara menggunakan data observasi dan model dari tahun 1870 sampai tahun 2000, dengan kenaikan sekitar 1°C (Folland, et al., 2001)

Gambar 1.3 menunjukkan *time series* SPL dari tahun 1870 sampai 2000. Tren tertinggi terjadi dari tahun 1910 sampai 2000 dengan tren mencapai 0.8°C/abad, dan total kenaikan sebesar 0.4°C±1.7°C/abad, jika dihitung dari tahun 1870. Penurunan suhu udara dan SPL dari tahun 1870 sampai 1900-an, mungkin disebabkan karena debu letusan gunung berapi terutama Gunung Krakatau yang mengurangi intensitas insolasi sinar matahari, sehingga menyebabkan penurunan suhu udara dan SPL dari tahun 1870 sampai 1900.



Gambar 1.3 Time series SPL anomali global hasil observasi, dari tahun 1870 sampai tahun 2000, dengan kenaikan SPL sekitar $0.4^{\circ}\text{C}/\text{abad} \pm 0.17^{\circ}\text{C}/\text{abad}$ (Rayner, et al., 2001)

Naiknya suhu global menyebabkan kenaikan tinggi muka air laut, baik akibat ekspansi volume air laut karena naiknya suhu air laut, atau mencairnya es glasier dan es di kutub Utara dan Selatan. Meskipun dampak kenaikan tinggi muka air laut masih 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.

Banyak ahli oseanografi berargumentasi bahwa *global warming* mempunyai kaitan yang erat dengan semakin tingginya frekuensi El Niño dan La Niña (Timmermann et. al. 1999 dan Timmerman, 2000). Hasil analisis *wavelet* menunjukkan bahwa frekuensi terjadinya ENSO (*El Niño Southern Oscillation*, El Niño dan La Niña), meningkat sejak tahun 1970, terutama sejak tahun 1993 sampai sekarang. Pada umumnya El Niño maupun La Niña terjadi antara 2 tahun sampai 7 tahun sekali, tetapi sejak tahun 1970, frekuensi El Niño dan La Niña menjadi 2 tahun sampai 6 tahun (Torrence and Compo, 1999). Sebagai tambahan, pada waktu terjadinya El Niño tahun 1997/1998, secara umum Indonesia mengalami musim kering yang panjang, dan pada saat terjadinya La Niña tahun 1999, Indonesia mengalami kenaikan curah hujan yang tinggi, sehingga menyebabkan banjir di sebagian besar wilayah Indonesia.

Pulau Lombok yang berbatasan dengan Selat Makassar dan Laut Banda di sebelah Utara, Selat Lombok di sebelah Barat, Selat Sumbawa di sebelah Timur dan Samudera Hindia di sebelah Selatan memiliki potensi pariwisata, perikanan dan

pertanian yang baik, terutama di Pulau Lombok bagian Barat dan Utara. Pulau Lombok yang dikelilingi oleh lautan sangat mudah terpengaruh oleh kenaikan tinggi muka air laut, terutama terhadap bahaya banjir (ROB), sedimentasi dan erosi. Kondisi ini akan semakin rentan dengan meningkatnya frekuensi iklim ekstrim seperti El Niño dan La Niña.

Daerah pantai yang rentan terhadap banjir dan genangan air selama musim angin Barat (penghujan, *northwest monsoon*), menjadi lebih rentan dengan adanya fenomena kenaikan tinggi muka air laut. Pulau Lombok sebelah Barat dengan dataran rendah yang terbentang sepanjang beberapa kilometer dari pantai, merupakan daerah potensi banjir selama musim penghujan dengan puncaknya pada bulan Desember sampai Pebruari.

1.2 dan Tujuan

Kajian ini dilakukan dengan maksud untuk mengetahui tingkat kenaikan *Sea Level Rise* (SLR, kenaikan tinggi air laut) akibat pemanasan global, dengan tidak menyampingkan analisis dampak pemanasan global terhadap perubahan suhu permukaan laut, intensitas iklim ekstrim (*extreme events*) dan berbagai dampaknya terhadap tinggi gelombang laut dan potensi perikanan tangkap.

Sementara itu tujuan kajian ini untuk memberikan dasar acuan dan informasi bagi pengembangan daerah pantai di Pulau Lombok, untuk adaptasi terhadap perubahan iklim, terutama SLR. Sebagai tambahan, kajian ini diharapkan juga dapat dijadikan dasar acuan adaptasi untuk mengurangi risiko akibat terjadinya bencana alam yang berkaitan dengan kenaikan tinggi muka air laut.

Disamping proyeksi kenaikan tinggi muka air laut, makalah ini juga menyajikan bahasan mengenai iklim ekstrim atau *extreme event* yang terdiri dari La Niña dan El Niño (El Niño dan La Niña dapat disebut juga dengan istilah ENSO, *El Niño Southern Oscillation*). Analisis *time-frequency event extreme* dilakukan dengan menggunakan *wavelet analysis* untuk mengetahui waktu dan frekuensi terjadinya El Niño dan La Niña. Makalah ini mempunyai struktur seperti berikut: bab pertama berisi pendahuluan yang memuat latar belakang serta tujuan kajian, bagian kedua

berisi klimatologi laut Pulau Lombok, yang berisi klimatologi tinggi dan suhu permukaan laut, distribusi spasial klorofil-a, serta tinggi gelombang. Bab ketiga memuat data dan metodologi analisis. Bab ke-empat memuat hasil analisis proyeksi suhu permukaan laut (SPL) dan tinggi muka laut (TML), serta proyeksi ENSO dengan menggunakan data SPL di daerah Nino3 (daerah yang didefinisikan antara 5°S sampai 5°N dan antara 210°E sampai 270°E), disertai analisis pengaruh ENSO terhadap karakteristik tinggi muka air laut, distribusi spasial klorofil-a, SPL di perairan sekitar Pulau Lombok, dan tinggi gelombang. Bagian terakhir berisi kesimpulan dan rekomendasi untuk adaptasi terhadap bencana naiknya tinggi muka air laut akibat pemanasan global dan ENSO.

BAB 2 IKLIM DAN KONDISI OSEANOGRAFI PULAU LOMBOK

Indonesia merupakan daerah maritim yang terletak diantara 2 samudera yaitu Samudera Hindia dan Samudera Pasifik. Hal ini mempengaruhi pola angin monsun, curah hujan dan karakteristik iklim lainnya. Pengaruh 2 samudera ini sangat terlihat jelas pada kondisi iklim Provinsi Nusa Tenggara Barat (NTB) yang sangat dipengaruhi oleh angin monsun.

2.1 Angin dan Hujan

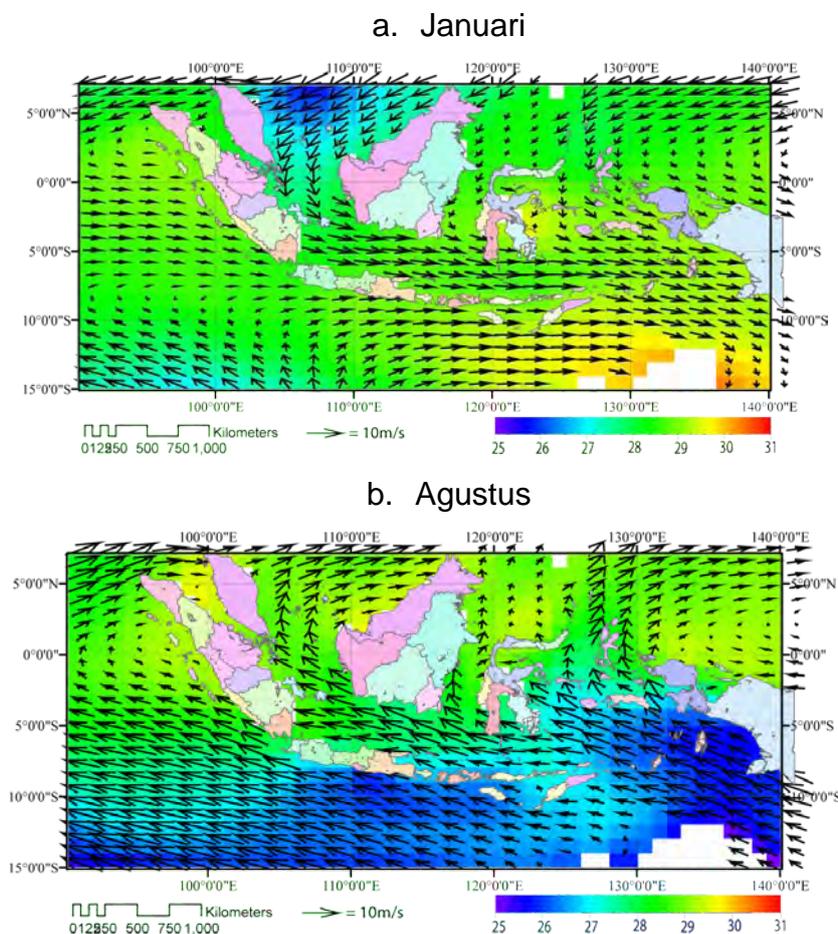
Pada waktu musim angin Barat (angin bertiup dari Barat) dari bulan Oktober sampai Maret, cuaca di Bali dan NTB dipengaruhi oleh angin Barat, baik yang melalui Laut Jawa (akan disebut Monsun Asia-Australia), maupun yang melalui Samudra Indonesia. Dua lautan ini mempengaruhi karakteristik curah hujan di wilayah NTB, dengan pengaruh angin monsun Barat Samudra Indonesia dominan di sebelah Selatan, dan Monsun pasifik di sebelah Utara. Hal ini dapat dilihat dari klimatologi pola angin pada bulan Januari dan Agustus dengan menggunakan data satelit QuickScat (*Quick Scatterometer*) seperti yang diilustrasikan dalam Gambar 2.1.

Pengaruh dua lautan (Laut Jawa dan Samudera Hindia) menyebabkan terjadinya pola hujan yang tidak seragam, terutama di Pulau Lombok, dengan curah hujan bulanan secara umum dapat digambarkan seperti pada Gambar 2.2. Pengaruh tingginya suhu permukaan laut (SPL) di Samudera Hindia dan Laut Jawa mendorong intensifnya evaporasi dan pembentukan awan pada musim angin Barat sehingga mendorong terjadinya curah hujan yang tinggi pada bulan Nopember sampai Pebruari (Gambar 2.2). Sebaliknya pada musim angin Timur SPL di Samudera Hindia menurun dan mencapai suhu terendah pada bulan Agustus, menyebabkan terjadinya musim kering dengan curah hujan yang sangat rendah seperti yang terlihat pada Gambar 2.2.

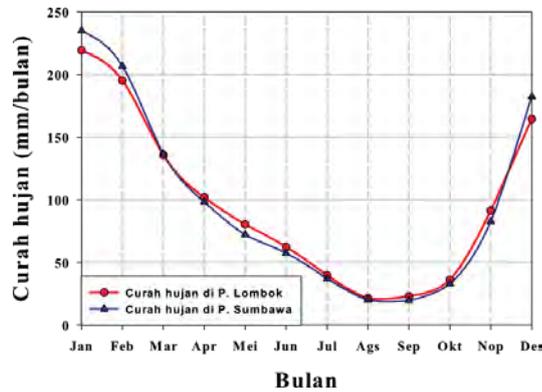
2.2 Tinggi Muka Laut

2.2.1 Arus dan Tinggi Muka Laut

Gambar 2.3 dan 2.4 menunjukkan pola arus dan tinggi muka air laut rata-rata bulanan selama 7 tahun dari tahun 1993 sampai 1999, pada bulan Januari dan Agustus. Pola arus dan estimasi tinggi muka air laut merupakan hasil perhitungan dengan menggunakan *HYbrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM, Bleck 2002). Konfigurasi model untuk laut Jawa, Selat Makassar dan sebagian Laut Cina Selatan, dapat dilihat di Sofian, 2007.

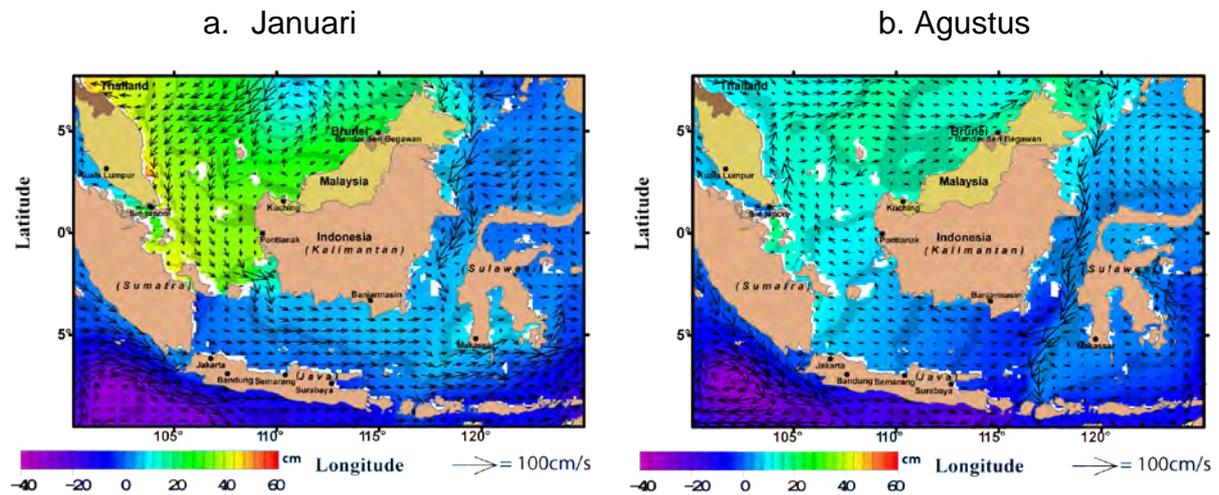


Gambar 2.1 Pola angin dan suhu permukaan laut (SPL) pada bulan Januari dan Agustus



Gambar 2.2 Siklus tahunan rata-rata curah hujan di Pulau Lombok dan Sumbawa

Gambar 2.3a menunjukkan pola arus pada bulan Januari saat monsun Barat. Propagasi angin Barat Daya (angin yang bertiup dari Barat Daya) menyebabkan arus di Laut Jawa mengalir ke Timur, dan arus di Selat Karimata ke Selatan. Sementara arus di Selat Sunda, mengalir ke Timur dan masuk ke Laut Jawa, dengan membawa massa air dari Samudera Hindia ke Laut Jawa. Sementara itu efek topografi karena menciut dan mendangkalnya kedalaman Selat Karimata sebelah Selatan, menyebabkan terjadinya perbedaan tinggi muka air laut sebesar 40 cm antara Laut Jawa dan Selat Karimata. Disamping itu, tekanan arus ke Timur menyebabkan terjadinya gradien perbedaan tinggi muka air laut, dengan merendahnya tinggi muka air laut di Laut Jawa dan meningginya tinggi muka air laut di Laut Banda, dan pantai Utara Pulau Lombok pada bulan Januari seperti terlihat pada Gambar 2.3a. Pola angin akan berubah seiring dengan perubahan musim. Angin bertiup dari tenggara pada waktu musim kemarau (Monsun Tenggara) mendorong arus di Laut Jawa menuju ke Barat, dan arus di Selat Karimata bergerak ke Utara (Gambar 2.3b). Air laut permukaan di Laut Jawa akan mengalir keluar melalui Selat Sunda seperti yang terlihat pada Gambar 2.3b.



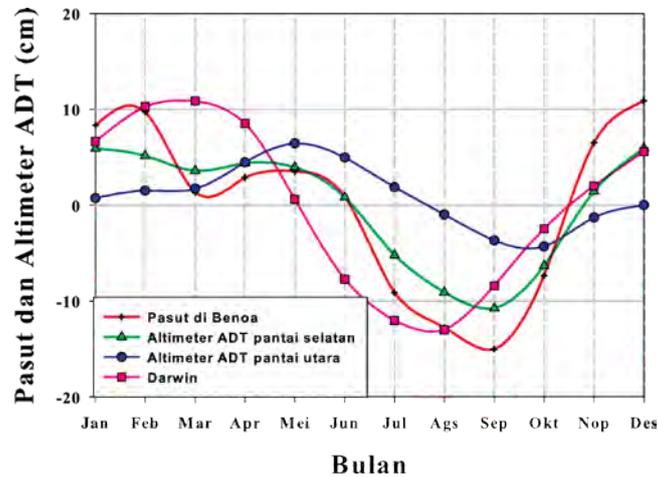
Gambar 2.3 Distribusi tinggi muka air laut dan pola arus pada bulan a. Januari dan b. Agustus. Tinggi muka air laut dan pola arus adalah rata-rata bulanan selama 7 tahun, dari tahun 1993 sampai 1999 (Sofian, 2007)

Berbeda dengan pola arus di Laut Jawa dan Selat Karimata, arus permukaan di Selat Makassar tidak mengikuti pola dan arah angin musiman. Arus permukaan di Selat Makassar cenderung untuk bergerak ke Selatan. Kecepatan arus permukaan di Selat Makassar lemah pada musim angin Barat Daya, meskipun angin Utara sangat intensif. Lemahnya arus permukaan di Selat Makassar ini disebabkan oleh kuatnya arus permukaan di Laut Jawa yang bergerak ke Timur, sehingga menghalangi laju arus permukaan di Selat Makassar. Lebih lanjut lagi, arus permukaan di Selat Makassar akan menguat pada musim kemarau (angin Tenggara), dan mendorong air permukaan yang bersalinitas dan bersuhu rendah kembali ke Laut Jawa. Kuatnya arus permukaan di Selat Makassar juga menyebabkan penurunan tinggi muka air laut di pantai Utara Pulau Lombok pada bulan Agustus, seperti yang terlihat pada Gambar 2.3b.

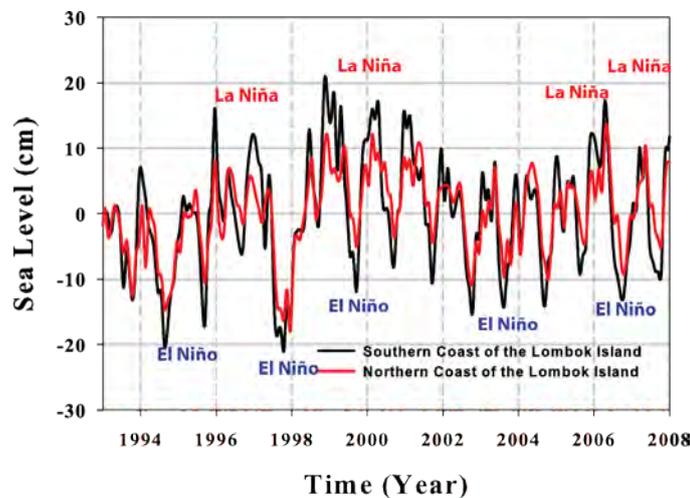
2.2.2 Tinggi Muka Laut, El Niño dan La Niña

Gambar 2.4 menunjukkan karakteristik tahunan Tinggi Muka Laut (TML) yang dipengaruhi oleh curah hujan, dan SPL. TML tinggi pada saat terjadi curah hujan tinggi dan SPL yang tinggi, dan akan menurun mencapai TML terendah pada bulan Agustus sampai September, pada saat curah hujan dan Suhu Permukaan Laut (SPL) mencapai titik terendah. Curah hujan berperan sebagai *fresh water flux* (penambah masa air) pada waktu musim penghujan, sedangkan SPL berperan untuk ekspansi termal, penambahan volume air laut akibat kenaikan suhu air. El Niño dan La Niña juga mempengaruhi karakteristik TML seperti yang terlihat pada

Gambar 2.5, *Time-series* TML dari tahun 1993 sampai 2008, dengan menggunakan data satelit altimeter. 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 risiko erosi, abrasi dan genangan air laut, terutama pada saat terjadi La Niña, dengan intensitas hujan yang lebih tinggi.



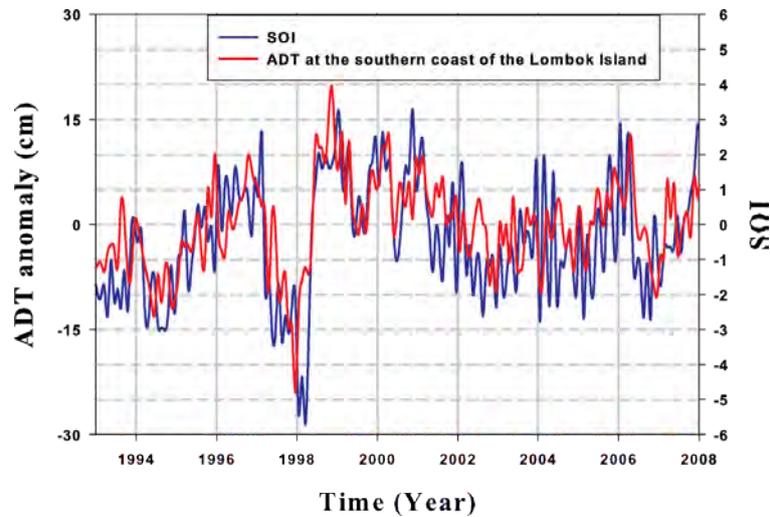
Gambar 2.4 Siklus tahunan TML berdasarkan data pasut dan altimeter



Gambar 2.5 Time-series TML di pantai Utara dan Selatan Pulau Lombok dan Sumbawa

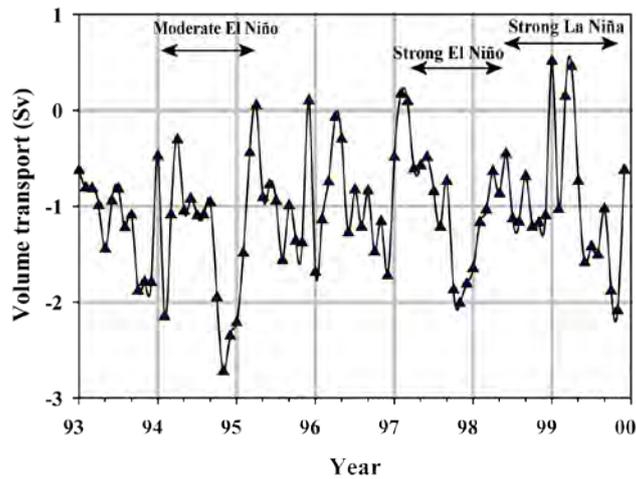
Gambar 2.6 menunjukkan data *time series* SOI (*Southern Oscillation Index*) dan ADT (*Absolute Dynamic Topography*, tinggi muka air laut anomali). SOI lebih kecil dari -1 menunjukkan El Niño, dan lebih besar dari +1 menunjukkan terjadinya La Niña, meskipun banyak ahli mengatakan, SOI lebih besar dari +0.5 telah menunjukkan terjadinya La Niña) dan ADT anomali. ADT anomali dihitung berdasarkan nilai relatif terhadap rata-rata bulanan (data klimatologi). Seiring

dengan karakteristik data *time series* TML, data TML anomali terhadap rata-rata bulanan, menunjukkan karakteristik yang sama pula.



Gambar 2.6 *Time series* altimeter ADT (Absolute Dynamic Topography atau sea level) anomali dan SOI dari Januari 1993 sampai September 2008

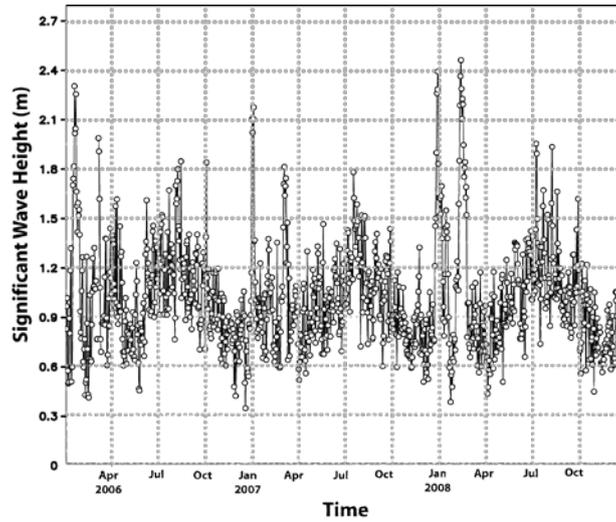
Kenaikan tinggi muka air laut terjadi pada saat periode transisi antara El Niño dan La Niña, dengan kenaikan antara 15 cm sampai 20 cm diatas rata-rata tahunan, dengan kenaikan tertinggi terjadi pada saat masa transisi antara El Niño kuat 1997/1998 dan La Niña kuat 1999 seperti terlihat pada Gambar 2.6. Hal ini diakibatkan oleh naiknya SPL, curah hujan, dan melemahnya arus permukaan di Selat Makassar (*time series volume transport* air laut di permukaan Selat Makassar antara 0 m sampai 50 m, berdasarkan estimasi dengan HYCOM di 3°S, 116°E to 119°E, Gambar 2.7). Sementara itu semakin intensifnya *trade wind* di Samudera Pasifik menyebabkan terdepresinya tinggi muka air laut di Samudera Pasifik sebelah Timur, dan menaikkan tinggi muka air laut di perairan Indonesia. Proses fisis pada saat terjadinya El Niño, merupakan kebalikan dari La Niña.



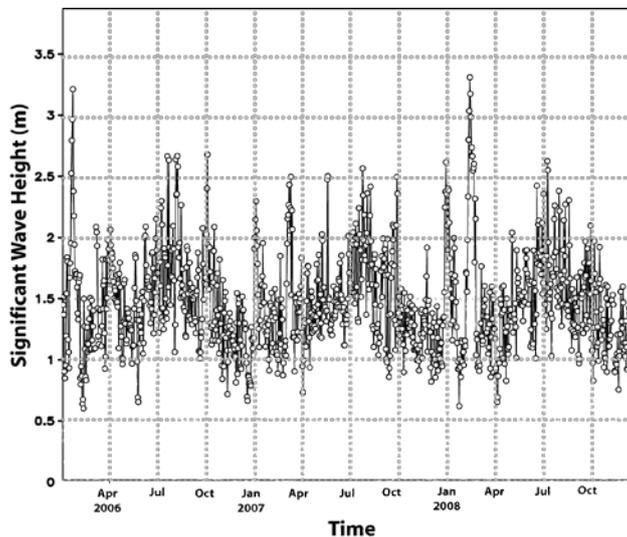
Gambar 2.7 Time series volume transport air laut permukaan di Selat Makassar dari 0 to 50 m. Negatif volume transport mengindikasikan transport masa air laut ke Selatan (1 Sv = 1 juta m³/detik) (Sofian, 2007)

2.3 Gelombang

Tinggi gelombang laut berdasarkan data altimeter *Significant Wave Height* (SWH) ditunjukkan pada Gambar 2.8 dan 2.9. Tinggi gelombang rata-rata di pantai Utara dan Selatan Pulau Lombok masing-masing sebesar 1.2m dan 1.5m. Tinggi gelombang tahunan tertinggi terjadi pada bulan Juli, dengan rata-rata ketinggian gelombang mencapai 1.5 m dan 2.4 m di pantai Utara dan Selatan Pulau Lombok. Intensifnya transport massa air di Selat Makassar membawa dampak pada tinggi gelombang maksimum, seiring dengan maksimum transport yang terjadi pada musim monsun Timur dengan puncaknya pada bulan Juli sampai September. Meskipun terjadi penurunan rata-rata tinggi muka laut bulanan. Sebaliknya tinggi gelombang akan mencapai titik terendah pada monsun Barat seiring dengan menurunnya transport di Selat Makassar, meskipun terlihat adanya beberapa anomali cuaca ekstrim, terutama pada bulan Januari.



Gambar 2.8 Tinggi gelombang harian di pantai Utara Pulau Lombok dari Januari 2006 sampai Desember 2008, dengan rata-rata tinggi gelombang 1.2 m

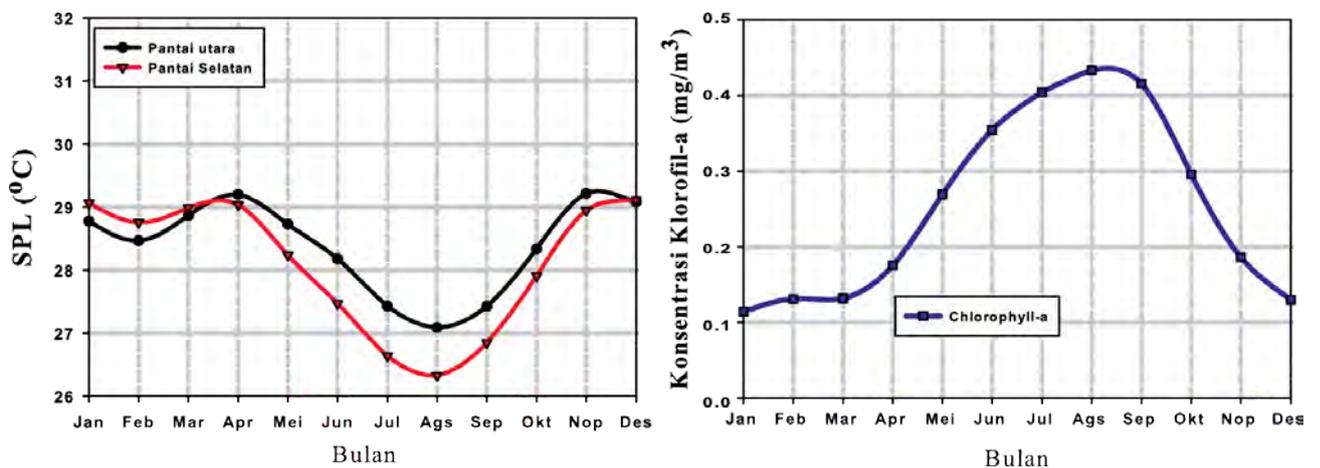


Gambar 2.9 Tinggi gelombang harian di pantai Selatan Pulau Lombok dari Januari 2006 sampai Desember 2008, dengan rata-rata tinggi gelombang 1.5 m

Gambar 2.8 dan 2.9 juga menunjukkan terjadinya beberapa gelombang ekstrim yang mencapai ketinggian 2 m sampai 2.5 m di pantai Utara dan 2.5 m sampai 3.4m di pantai Selatan Pulau Lombok. Hal ini mungkin berkaitan dengan adanya iklim ekstrim yang terjadi pada bulan-bulan tersebut, terutama pada monsun Barat bulan Januari 2006 dan 2007, serta dari Januari sampai Pebruari 2008. Detil hubungan antara tinggi gelombang dengan cuaca ekstrim, dan analisis *time-frequency* gelombang ekstrim akan dijelaskan pada bab prediksi ENSO (*El Niño Southern Oscillation*)

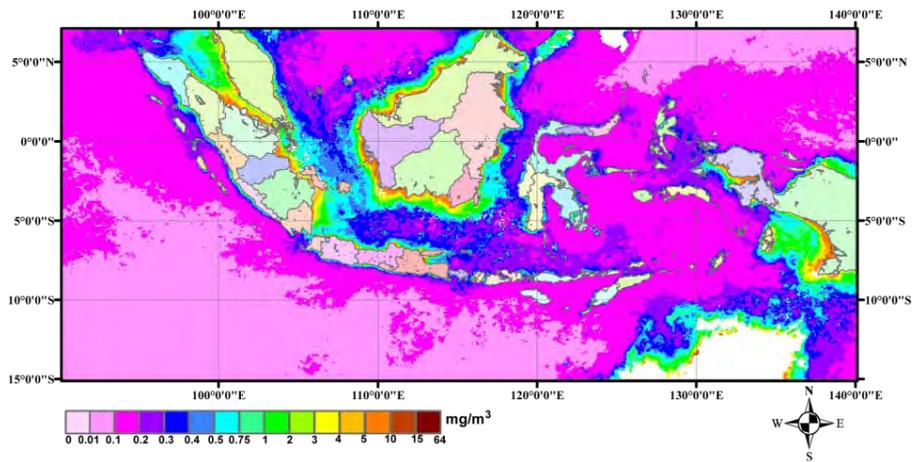
2.4 klorofil-a dan suhu permukaan laut (SPL)

Seiring dengan pola angin musiman, pola SPL dan klorofil-a bulanan digambarkan seperti pada Gambar 2.10, dan peta distribusi klorofil-a di pantai Selatan Pulau Lombok dan Sumbawa berdasarkan data satelit *Seawifs* pada bulan Januari dan Agustus dapat dilihat pada Gambar 2.11. Potensi tangkapan ikan paling besar terjadi pada saat musim angin Timur dengan SPL rendah dan konsentrasi klorofil-a yang tinggi pada bulan Juli sampai September. Angin Timur mengakibatkan terjadinya *upwelling* di sepanjang pantai Selatan, menyebabkan nutrient naik ke permukaan laut dari kedalaman sekitar 50 m sampai 100 m, sehingga menyebabkan tingginya konsentrasi klorofil-a. Kemudian potensi tangkapan ikan akan menurun seiring dengan berubahnya musim ke musim angin Barat dengan naiknya SPL dan menurunnya konsentrasi klorofil-a dari bulan Oktober sampai Maret.

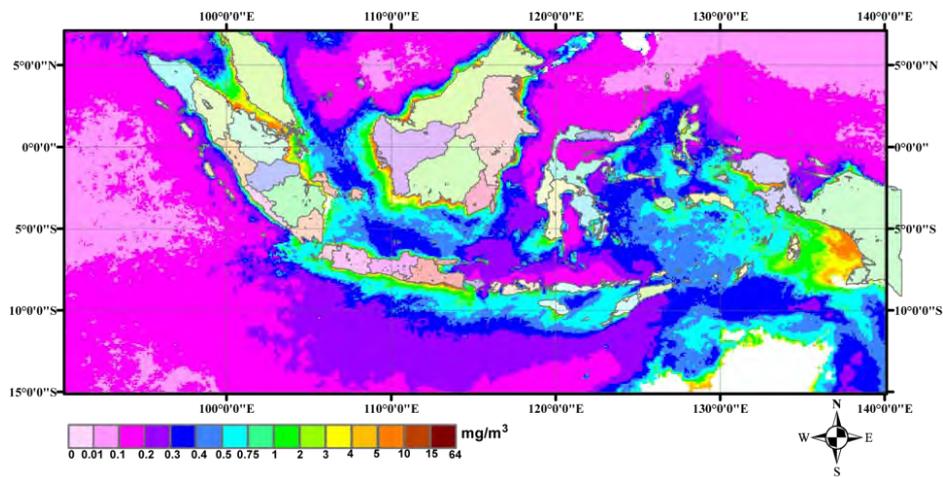


Gambar 2.10 Siklus tahunan rata-rata SPL di pantai Utara dan Selatan serta konsentrasi klorofil-a di pantai Selatan Pulau Lombok

a. Januari



b. Agustus



Gambar 2.11 Pola sebaran klorofil-a pada bulan Januari dan Agustus

BAB 3 DATA DAN METODE ANALISIS

Pada bagian ini dijelaskan mengenai data dan metodologi analisis yang digunakan untuk estimasi kenaikan tinggi muka air laut.

3.1

Data tinggi muka air laut yang digunakan dalam penelitian ini meliputi:

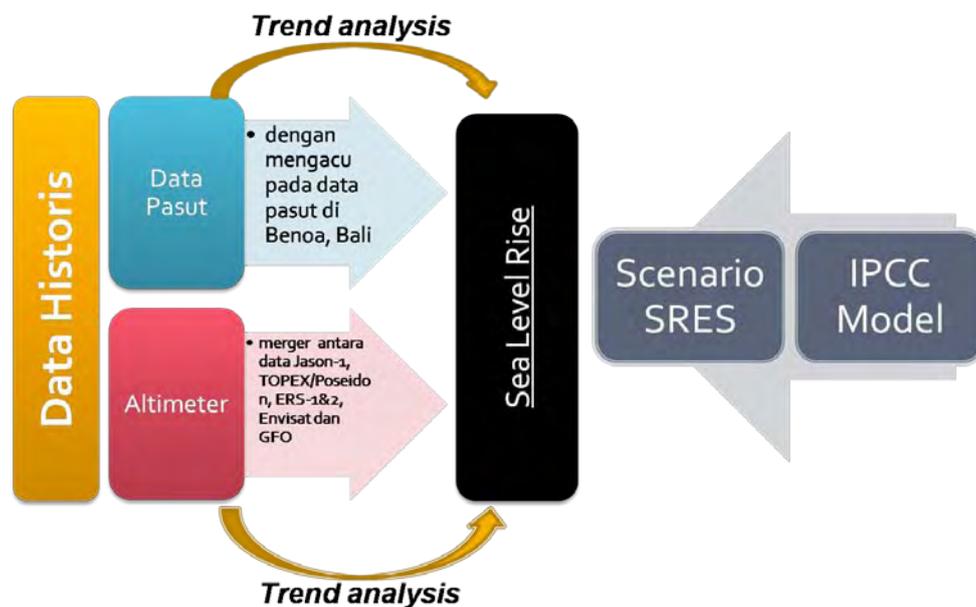
1. Data historis yang terdiri dari:
 - Data pasang surut (pasut), meliputi data pasut di Surabaya, Bena, Darwin, Broome, Ambon, dan Sadakan. Penghitungan MSL (*Mean Sea Level*, rata-rata ketinggian muka air laut), baik di Pantai Utara dan Selatan Pulau Lombok, menggunakan data pasut di Bena, Pulau Bali, sebagai acuan. Sebagai tambahan, semua data pasang surut diperoleh dari UHSLC (*University of Hawaii Sea Level Center*).
 - Data satelit altimeter yang merupakan gabungan (*merger*) dari beberapa satelit altimeter seperti TOPEX/Poseidon (T/P), GFO, Envisat, ERS-1 dan 2, serta Jason-1, yang tersedia sejak Oktober 1992 sampai Oktober 2008. Data altimeter ini diperoleh dari AVISO (AVISO, 2004)
2. Data hasil permodelan sampai tahun 2100 diperoleh dari permodelan IPCC berdasarkan skenario *Special Report on Emission Scenario* (SRES) b1, a1b dan a2, dengan proyeksi konsentrasi pada tahun 2100 sebesar 540ppm (*part per million*) untuk SRESb1 dan 740 ppm untuk SRESa1b, serta *un-stabilized* SRESa2. Data model IPCC yang digunakan adalah data suhu permukaan laut dan data ketinggian muka air laut, yang merupakan *output* dari model MRI_CGCM2.3 (Jepang), CCCMA_CGCM3.2 (Kanada) dan Miroc3.2 (Jepang).
3. Data penunjang yang digunakan dalam kajian ini, meliputi:
 - Data suhu permukaan laut (SPL), yang berasal dari NOAA (*National Oceanography and Atmospheric Agency*) OI (*Optimal Interpolation*) (Reynolds and Smith, 1994) dari tahun 1981 sampai 2008.
 - Data konsentrasi klorofil-a hasil estimasi dengan menggunakan satelit MODIS, dan *SeaWifs*.

3.2 Metode Kajian

Metode yang digunakan untuk estimasi kenaikan tinggi muka air laut dan terjadinya *extreme events* (iklim ekstrim) yang terdiri dari El Niño dan La Niña, dalam penelitian ini terdiri dari:

3.2.1 Analisis Kenaikan SPL dan TML

Trend analysis yang digunakan untuk mengetahui kecenderungan serta tingkat kenaikan SPL dan TML berdasarkan data historis yang meliputi data pasut dan satelit altimeter, maupun data hasil model IPCC. Dalam hal ini, *trend analysis* merupakan analisis regresi linier tinggi muka air laut terhadap waktu dalam bulan, dengan persamaan matematis $y = a + bt$. Dimana y adalah tinggi muka air laut, t waktu dalam bulan, a *offset*, dan b adalah tingkat kenaikan (*slope, trend*). Detil diagram alir penghitungan kenaikan tinggi muka air laut dengan menggunakan *trend analysis* seperti terlihat pada Gambar 3.1.

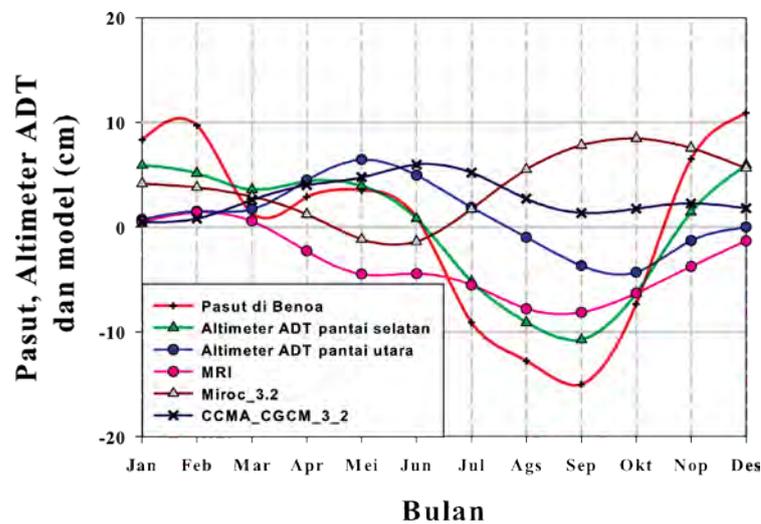


Gambar 3.1 Diagram alir estimasi kenaikan tinggi muka air laut dengan menggunakan data historis dan model IPCC, yang terdiri dari 3 model, yaitu MRI, CCCMA CGCM 3.2 dan Miroc

3.2

3.2.2 Validasi Hasil Permodelan

Pembuatan data iklim untuk mengetahui pengaruh monsun terhadap karakteristik klorofil-a, curah hujan, SPL, dan ketinggian muka air laut. Hasil analisis iklim juga digunakan untuk mendeteksi konsistensi model terhadap data historis. Gambar 3.2 menunjukkan komparasi data iklim antara hasil model dengan data historis di perairan Pulau Lombok dengan menggunakan data tinggi muka air laut sebagai acuan. Data model MRI (*Meteorological Research Institute*) Jepang, mempunyai karakter yang sama dengan data pasut dan data altimeter, dengan tinggi muka air laut terendah pada bulan Agustus sampai september, dan tinggi muka air laut tertinggi terjadi pada bulan Januari sampai April. Berdasarkan uji komparasi ini, maka data suhu permukaan laut (SPL) dari model MRI digunakan sebagai acuan untuk mendeteksi terjadinya *extreme events* yang akan dijelaskan pada poin no. 3.

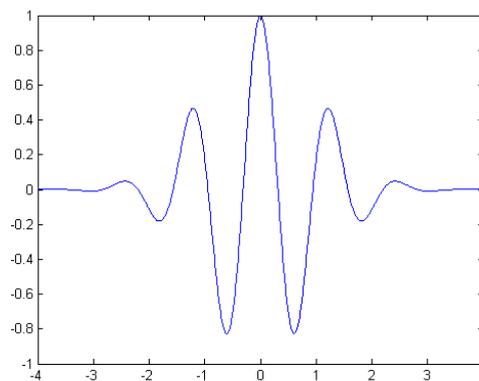


Gambar 3.2 Klimatologi tinggi muka air laut berdasarkan data pasut, altimeter dan model

3.2.3 Analisis *Extreme Events*

Wavelet analysis digunakan untuk mendeteksi waktu dan terjadinya El Niño dan La Niña dari tahun 2000 sampai 2100. Detil deskripsi dan algoritma numerik yang digunakan dalam analisis wavelet dapat dilihat di Torrence and Compo (1999). *Wavelet analysis* juga dikenal sebagai salah satu metode untuk melakukan analisis *Time-frequency*. Wavelet model yang digunakan untuk mendeteksi waktu dan frekuensi El Niño dan La Niña (ENSO, *El Niño Southern Oscillation*) adalah fungsi Morlet pada orde 6. Fungsi Morlet dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 3.3. Transformasi wavelet mempunyai beberapa keunggulan dibandingkan dengan transformasi Fourier yang sering digunakan. Transformasi wavelet digunakan untuk

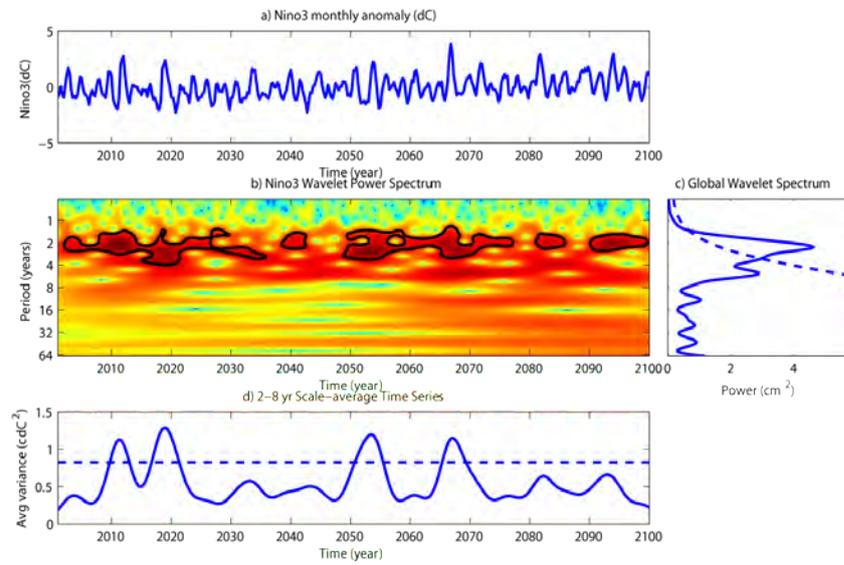
mendeteksi fenomena yang *non-stationary* (sinyal yang informasi frekuensinya berubah-ubah). Sementara transformasi Fourier hanya dapat digunakan untuk mendeteksi fenomena yang *stationary* (sinyal yang informasi frekuensinya tidak berubah). Berdasarkan kemampuan transformasi wavelet ini, maka analisis wavelet digunakan untuk mendeteksi waktu dan frekuensi terjadinya ENSO sampai tahun 2100. Untuk mendeteksi waktu dan frekuensi terjadinya ENSO dilakukan dengan implementasi analisis wavelet pada SPL di daerah Pasifik Timur yang didefinisikan antara 150°BB (Bujur Barat) sampai 90°BB dan dari 5°LU (Lintang Utara) sampai 5°LS (Lintang Selatan), atau yang disebut daerah Nino3. Proses penentuan Nino3 sebagai index ENSO terlihat seperti pada Gambar 3.4, dengan contoh hasil deteksi terjadinya iklim ekstrim seperti pada Gambar 3.5. Detil pembahasan tentang iklim ekstrim dapat dilihat pada BAB 5.



Gambar 3.3 Wavelet Morlet



Gambar 3.4 Proses penentuan Nino3 yang digunakan untuk estimasi terjadinya El Niño dan La Niña



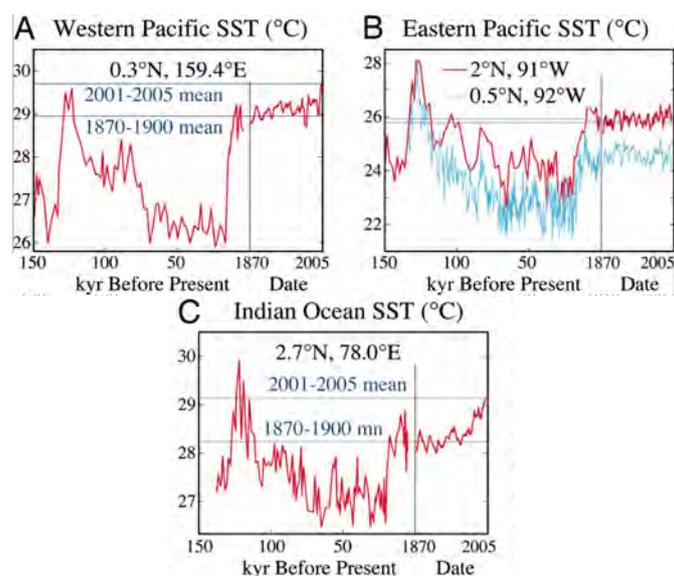
Gambar 3.5 Hasil analisis wavelet dengan menggunakan data SPL Nino3 hasil model MRI untuk skenario SRESa1b

BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

Kenaikan tinggi muka laut (TML) secara gradual akibat pemanasan global merupakan salah satu aspek yang paling kompleks dari efek pemanasan global, dengan akselerasi tingkat kenaikannya seiring dengan semakin intensifnya progres pemanasan global. Kenaikan TML mempertinggi risiko terjadinya erosi, perubahan garis pantai dan mereduksi daerah *wetland* di sepanjang pantai.

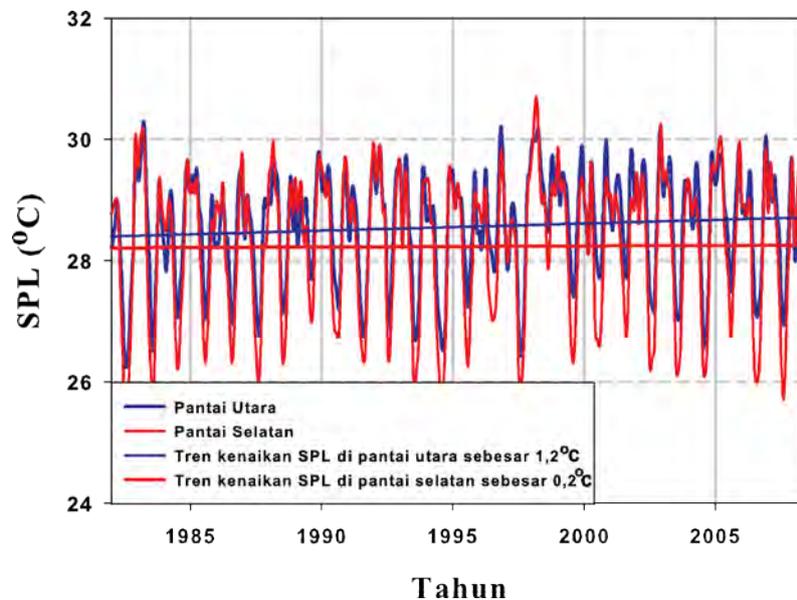
4.1 dan Proyeksi Kenaikan Suhu Permukaan Laut

Berdasarkan data paleoklimat di Samudera Pasifik dan Indonesia (Gambar 4.1, Hansen, 2006), didapatkan bahwa SPL tertinggi terjadi pada 125 ribu tahun yang lalu, yang mencapai 30°C di Pasifik Barat dan Samudera Hindia, serta 28°C di Pasifik Timur. Berdasarkan Gambar 4.3, terlihat bahwa terjadi kenaikan SPL yang drastis, terjadi sejak 10 ribu tahun lalu, dengan kenaikan sebesar 2°C sampai 3°C sampai tahun 1870. Sejak tahun 1870 kenaikan SPL terakselerasi dengan terjadinya revolusi industri di Eropa dan Amerika. Akselerasi kecepatan kenaikan SPL makin meninggi sejak tahun 1990-an. Setelah tahun 2005, apabila SPL naik antara 1°C sampai 2°C, maka tinggi SPL tersebut lebih tinggi daripada SPL tertinggi yang pernah terjadi pada 150 ribu tahun lalu.

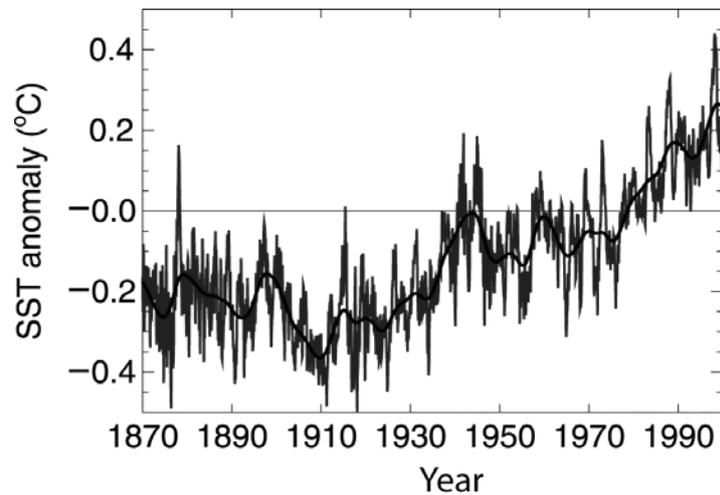


Gambar 4.1 Time series SPL berdasarkan data paleoklimat dari 150 ribu tahun yang lalu sampai tahun 2005 (Hansen, 2006)

Kenaikan suhu permukaan laut (SPL) berdasarkan data bulanan SPL dari NOAA (*National Oceanography and Atmospheric Agency*) *Optimum Interpolation* (OI) versi 2 (Reynolds and Smith, 1994), menunjukkan bahwa kenaikan SPL di pantai Utara Pulau Lombok dan Sumbawa lebih besar dibandingkan kenaikan SPL di pantai Selatan Pulau Lombok dan Pulau Sumbawa. Kenaikan SPL di pantai Utara mencapai $1,2^{\circ}\text{C}/\text{abad}$, dan kenaikan SPL di pantai Selatan hanya berkisar antara $0,2^{\circ}\text{C}/\text{abad}$ sampai $0,4^{\circ}\text{C}/\text{abad}$ (Gambar 4.2). Perbedaan tingkat kenaikan SPL antara pantai Utara dan Selatan ini disebabkan oleh perbedaan kedalaman, dan kondisi topografi. Pantai Utara berbatasan dengan Laut Jawa yang dangkal, sehingga *mixing layer* terbentuk dengan sempurna, dengan fluktuasi antara SPL tertinggi dan terendah tahunan tidak terlalu besar. Sementara itu kenaikan global SPL berkisar antara $0,3^{\circ}\text{C}$ sampai $0,4^{\circ}\text{C}$ (Gambar 4.3, Rayner, et al., 2003).

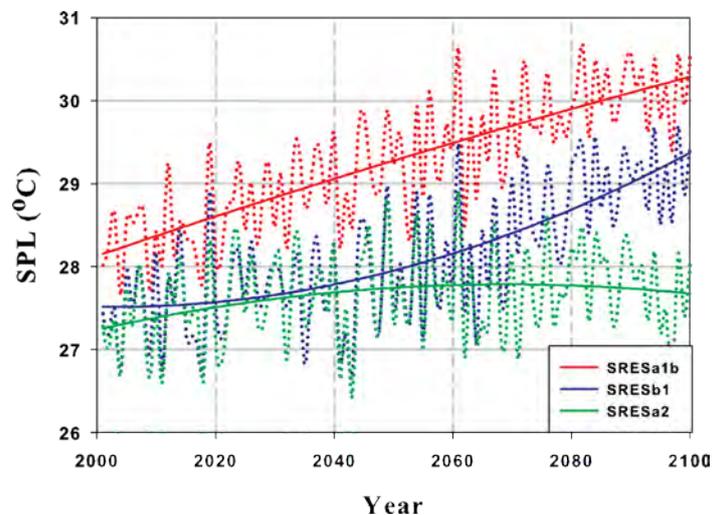


Gambar 4.2 SPL di pantai Utara dan Selatan Pulau Lombok berdasarkan data NOAA OI SST, dari Januari 1981 sampai September 2008



Gambar 4.3 Global SPL trend berdasarkan data observasi dari tahun 1870 sampai 2000, dengan tingkat kenaikan SPL mencapai $0.4^{\circ}\text{C}/\text{abad} \pm 0.17^{\circ}\text{C}/\text{abad}$ (Rayner, et al., 2003)

Kenaikan SPL berdasarkan data model *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Special Report on Emission Scenario (SRES)* berkisar antara $0.3^{\circ}\text{C}/\text{abad}$ sampai $2,1^{\circ}\text{C}/\text{abad}$ seperti pada Gambar 4.4, dengan ringkasan tren kenaikan SPL terlihat pada Tabel 4.1. Hasil estimasi model relatif sesuai dengan estimasi berdasarkan data observasi, meskipun SPL hasil estimasi model pada tahun 2100, cenderung lebih tinggi $\pm 1^{\circ}\text{C}$, dibandingkan hasil estimasi dengan data observasi (Gambar 4.2 dan 4.3). Perbedaan ini mungkin disebabkan karena perbedaan tingkat kenaikan GRK (Gas Rumah Kaca) pada tahun pengukuran (data observasi) dan model, dengan tingkat kenaikan hampir 2 kali lipat dibandingkan pada periode observasi (1870 sampai 2005).



Gambar 4.4 Tingkat kenaikan SPL berdasarkan hasil model MRI_CGCM 3.2

Kenaikan SPL yang tinggi akan membawa dampak terhadap potensi tangkapan ikan dan kerusakan terumbu karang. Daerah tangkapan ikan akan berpindah dari daerah tropis termasuk Samudera Hindia dan Laut Banda serta Flores ke daerah sub-tropis dengan suhu yang lebih rendah. Sementara itu, jika tingkat kenaikan (*rate*) SPL masih dalam batas adaptasi terumbu karang dan habitat biota pantai lain, maka kerusakan biota pantai akibat peningkatan SPL, dapat dihindari. Sebagai tambahan, seiring dengan kenaikan SPL, maka TML pun mengalami kenaikan akibat proses termal dan penambahan masa air akibat mencairnya es glasier, Greenland maupun Antartika. Potensi kenaikan TML berdasarkan pertambahan suhu dan mencairnya es, dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.1 Proyeksi kenaikan SPL di sekitar Pulau Lombok

Item	2030		2050		2080		2100	
SRESa1b	0.2°C±0.1° C	0.7° C	0.6°C±0.3° C	1.1° C	0.95°C±0.5° C	1.5°C	1.2°C±0.7° C	2.1°C
SRESa2		0.2° C		0.8° C		1.4°C		2.2°C
SRESb1		0.5° C		0.6° C		0.5°C		0.4°C
Level of Confident	High		High		High		High	

Keterangan: kenaikan SPL dengan bold gray menunjukkan estimasi kenaikan SPL berdasarkan data historis

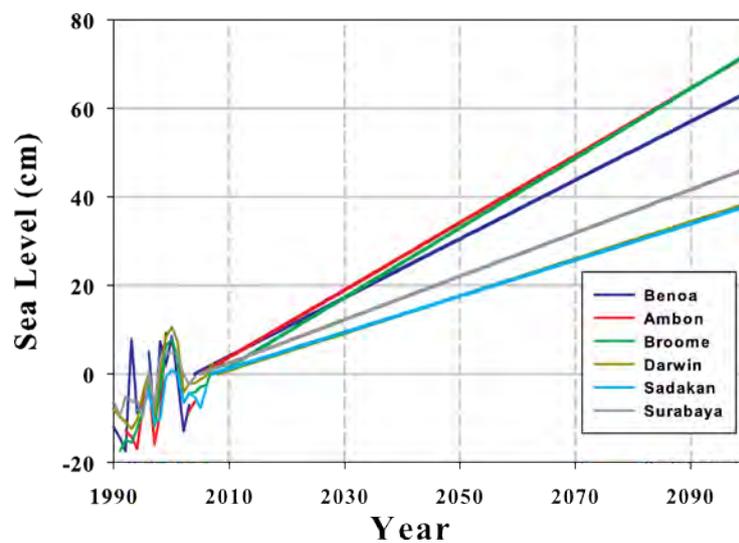
Tabel 4.2 Sumber potensial penyebab naiknya TML

Sumber potensial penyebab naiknya TML	
Expansi volume air laut	0.2 - 0.4 m per dC (Knutti et al., 2000)
Mencairnya glacier	0.15 - 0.37 m (IPCC, 2007)
Es di Greenland (Greenland)	7.3 m (Bamber et al., 2001)
Es di Antartika bagian Barat	5 m (Lythe et al., 2001)
Es di Antartika bagian Timur	52 m (Rignot et al., 2006)
TOTAL	± 63m

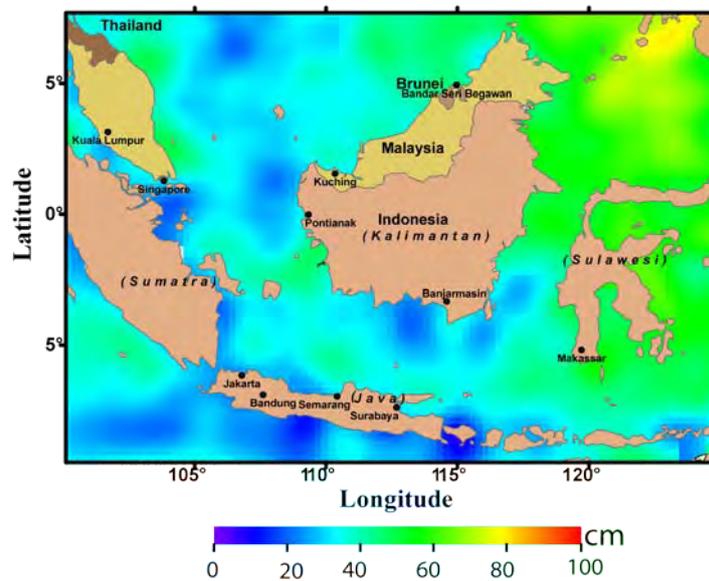
4.2 dan Proyeksi Kenaikan Tinggi Muka Laut

4.2.1 Berdasarkan IPCC AR4

Hasil analisis dengan menggunakan data historis pasang surut (pasut), dan altimeter menunjukkan tingkat kenaikan sebesar 3,5 mm/tahun sampai dengan 8,0 mm/tahun, masing-masing di pantai Utara dan Selatan Pulau Lombok dan Sumbawa seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.5 dan 4.6. Sebagai tambahan, estimasi kenaikan TML berdasarkan data pasut, dengan menjadikan data pasut Benoa sebagai titik acuan.

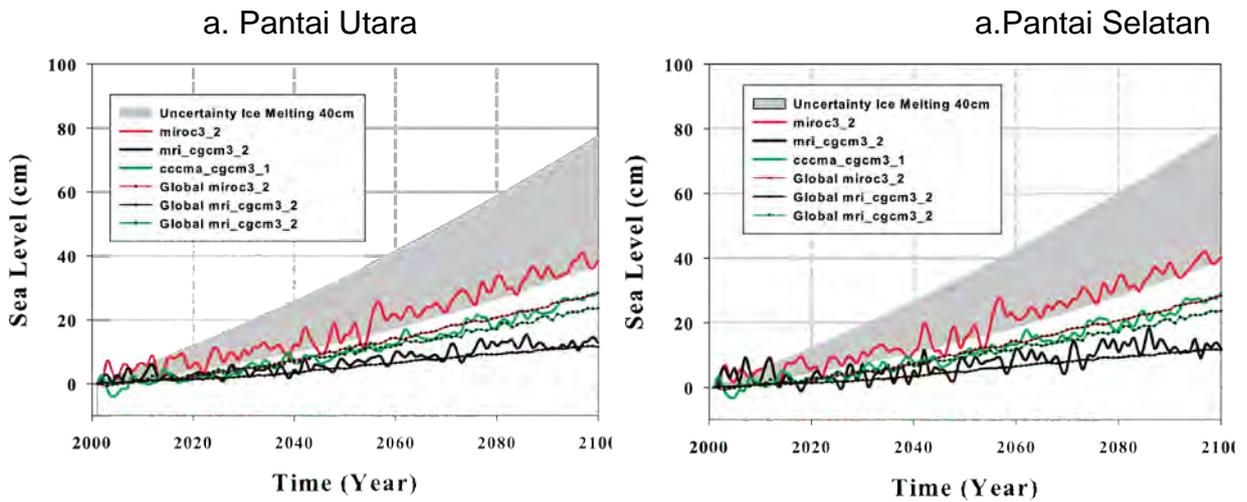


Gambar 4.5 Estimasi kenaikan TML dengan menggunakan data pasut di sekitar Pulau Lombok. Estimasi kenaikan TML di pantai Utara digunakan data pasut di Benoa sebagai acuan



Gambar 4.6 Distribusi kenaikan TML sampai tahun 2100 berdasarkan data satelit altimeter

Sementara, data hasil model berdasarkan skenario *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Special Report on Emission Scenario (SRES)* menunjukkan bahwa kenaikan TML akan bervariasi dari 4 mm/tahun sampai 8 mm/tahun sampai tahun 2100 (Gambar 4.7, gambar untuk SRESa1 dan b2 tidak ditampilkan). Gambar 4.7 menunjukkan kenaikan TML pada tahun 2030 akan bervariasi dari 10,5 cm sampai 24 cm relatif terhadap TML pada tahun 2000. Selanjutnya, kenaikan TML pada tahun 2080 akan mencapai 28 cm sampai 55 cm, sedangkan kenaikan TML pada tahun 2100 mencapai ketinggian 40 cm sampai dengan 80 cm. Disamping berdampak terhadap kenaikan TML, banyak ahli memperkirakan bahwa pemanasan global melalui peningkatan SPL di daerah tropis akan mempertinggi frekuensi terjadinya cuaca ekstrim yang akan mengakibatkan makin tinggi frekuensi terjadinya *storm surges*. Hal ini terlihat dari hasil analisis terhadap potensi terjadinya El Nino dan La Nina berdasarkan hasil model IPCC.



Gambar 4.7 Estimasi TML di a. pantai Utara dan b. pantai Selatan Pulau Lombok berdasarkan skenario IPCC SRESa1b dengan asumsi konsentrasi CO2 sebesar 740ppm

Tabel 4.3 dan 4.4 menunjukkan ringkasan tingkat kenaikan TML di Pulau Lombok yang bervariasi dari 40 cm sampai 80 cm sampai tahun 2100, berdasarkan hasil perhitungan menggunakan data model laut yang diperoleh dari IPCC, dengan ketidakpastian kenaikan permukaan air laut karena mencairnya es sebesar 40 cm. Kenaikan TML dengan data pasut adalah hasil estimasi kenaikan TML di Benoa, Darwin, Sadakan, dan Surabaya, dengan menggunakan proyeksi data pasut di Benoa sebagai acuan.

Tabel 4.3 Proyeksi kenaikan TML di pantai Utara Pulau Lombok

Period	Sea Level Rise Projection since 2000 (Northern coast of the Lombok Island)			Level of confidence
	Tide Gauge	Altimeter ADT	Model	
2020	10 cm	7 cm – 8 cm	5.1 cm – 12.9 cm	Moderate
			3.4 cm – 9.4 cm	
			6.7 cm – 15.5 cm	
2050	25 cm	17.5 cm – 20 cm	13.6 cm – 33.4 cm	Moderate
			11.2 cm – 20 cm	
			16.2 cm – 35 cm	
2080	40 cm	28 cm – 32 cm	27.1 cm – 59 cm	High
			24.1 cm – 55 cm	
			24.1 cm – 56 cm	
2100	50 cm	35 cm - 40 cm	37.8 cm – 78 cm	High
			36 cm – 74 cm	
			33 cm – 73 cm	

Keterangan: Model berdasarkan scenario SRESa1b, b1 dan a2

Tabel 4.4 Proyeksi kenaikan TML di pantai Selatan Pulau Lombok

Period	Sea Level Rise Projection since 2000 (Southern coast of the Lombok Island)			Level of Confidence
	Tide Gauge	Altimeter ADT	Model	
2020	12 cm	9 cm – 10 cm	5.1 cm – 13.1 cm	Moderate
			5 cm – 13 cm	
			4.2 cm – 11.5 cm	
2050	32 cm	22.5 cm – 25 cm	14.1 cm – 35.4 cm	Moderate
			13.2 cm – 31.1 cm	
			13.2 cm – 33 cm	
2080	52 cm	32 cm – 40 cm	29.1 cm – 61 cm	High
			26.1 cm – 58 cm	
			23.1 cm – 55 cm	
2100	70 cm	45 cm - 50 cm	40.1 cm – 80 cm	High
			38 cm – 75 cm	
			32 cm – 70 cm	

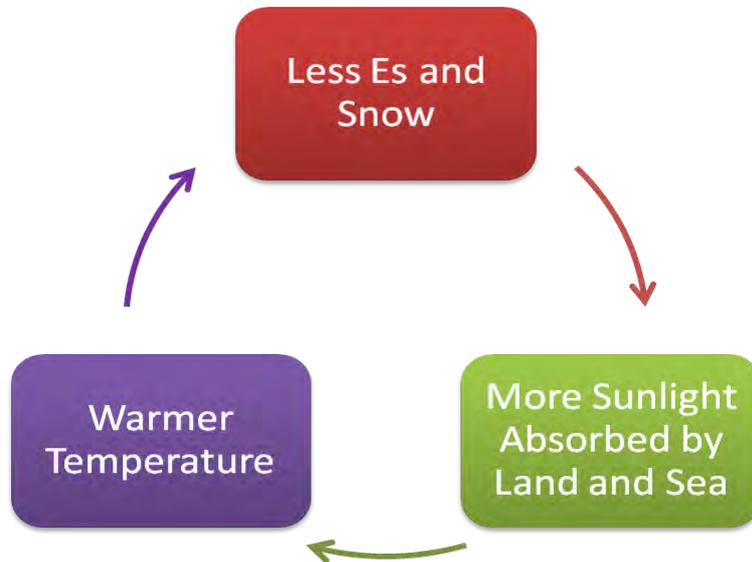
Keterangan: Model berdasarkan scenario SRESa1b, b1 dan a2

4.2.2 Kenaikan tinggi muka laut pasca-IPCC AR4

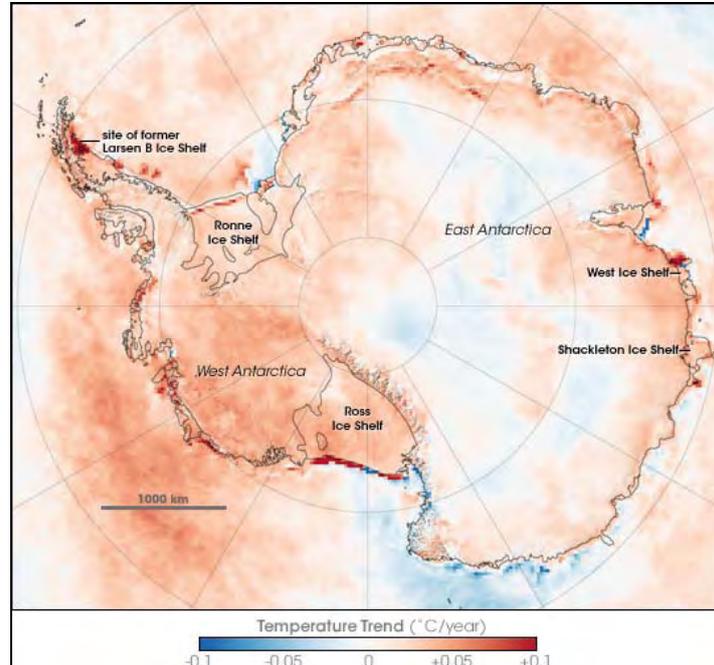
Kenaikan konsentrasi Gas Rumah Kaca (GRK) selama 50 tahun terakhir yang diakibatkan oleh aktivitas manusia merupakan kesimpulan mendasar dalam IPCC AR4 *report* pada tahun 2007, dengan menggunakan data dan model sampai tahun 2005. Kenaikan konsentrasi GRK ini menyebabkan naiknya temperatur global, terutama di Greenland dan Antartika serta Siberia bagian Tengah. Sebagai tambahan, berdasarkan IPCC AR4 kenaikan TML diperkirakan akan berkisar antara 20cm sampai 80cm sampai tahun 2100. Sementara itu, hasil riset yang dilakukan setelah tahun 2005, menunjukkan adanya kenaikan intensitas mencairnya es baik di Antartika maupun Greenland.

Secara umum kenaikan suhu di Antartika sebesar 2 kali tingkat kenaikan suhu global, meskipun *ice model* menunjukkan bahwa sebagian Antartika mengalami kenaikan suhu yang drastis (di dataran tinggi), sementara bagian lain menunjukkan penurunan suhu yang drastis pula (pada lembah) (UNEP/GRID-ARENDAL, 2007). Peningkatan suhu permukaan yang menyebabkan mencairnya es akan berdampak terhadap akselerasi pemanasan global seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.8. Kenaikan suhu permukaan di Greenland dan Antartika menyebabkan mencairnya es di kedua daerah tersebut, yang pada akhirnya akan meningkatkan akselerasi

kenaikan suhu permukaan baik di Greenland dan Antartika, maupun suhu global. Hal ini juga meningkatkan akselerasi kenaikan TML karena proses *thermosteric* (ekspansi termal karena peningkatan suhu laut) dan mencairnya es.



Gambar 4.8 Positive feedback antara mencairnya es dan peningkatan suhu permukaan (UNEP/GRID-ARENDAL, 2007)



Gambar 4.9 Perubahan suhu Antartika selama 30 tahun terakhir (sumber: Earthobservatory, NASA, 2007)

Gambar 4.9 menunjukkan perubahan suhu permukaan di Antartika selama 30 tahun terakhir ini, dengan kenaikan suhu udara rata-rata antara 0.05°C sampai 0.1°C. Kenaikan suhu permukaan tertinggi terjadi di Antartika sebelah Barat, dengan kontribusi potensi penambahan tinggi muka air laut sampai 6 m sampai 7 m apabila semua tutupan es-nya mencair.

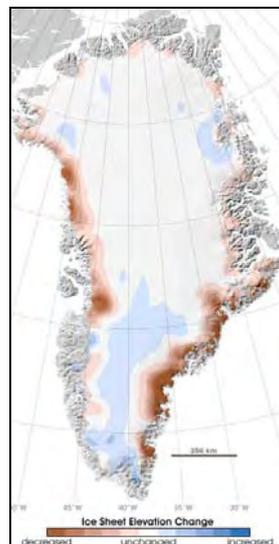
Kenaikan TML global sebesar 1.7 mm/tahun \pm 0.5 mm/tahun pada sampai akhir abad yang yang lalu. Hal ini berlainan dengan kenaikan TML antara tahun 1993 sampai 2003 yang mencapai 3.1 mm/tahun \pm 0.7 mm/tahun. Perubahan tingkat kenaikan ini menunjukkan adanya variabilitas pada tingkat kenaikan jangka panjang. Dibandingkan dengan tingkat kenaikan TML dari tahun 1961 sampai 1990 menunjukkan bahwa kenaikan suhu laut dan mencairnya es berkontribusi terhadap akselerasi tingkat kenaikan TML. Sementara itu berdasarkan hasil model dan prakiraan IPCC AR4 kenaikan TML sampai tahun 2100, berkisar antara 0.2 m sampai 0.8 m dengan tidak adanya perubahan pencairan es yang dinamis. Perhitungan ini didasarkan pada 70% sampai 75% ekspansi termal akibat kenaikan suhu laut (Meehl et al., 2007).

Proyeksi IPCC AR4 berdasarkan pada perbedaan massa es yang mencair dan terbentuknya es, dan karena massa es yang mencair lebih banyak daripada air yang membeku, maka Greenland *ice sheet* diproyeksikan berkontribusi terhadap kenaikan TML (Ridley, et al., 2005). Sebaliknya, Antartika diproyeksikan lebih membeku dan terjadi pembentukan es baru, sehingga bertambahnya es di Antartika dan mencairnya es di Greenland akan saling meniadakan, dengan kontribusi terhadap kenaikan TML mendekati 0 mm/tahun. Pada akhirnya, kontributor perubahan massa (selisih es mencair dan pembentukan es baru) terbesar hanya terbatas pada mencairnya es *glacier* dan tutupan es di dataran tinggi (Meehl, et al., 2007).

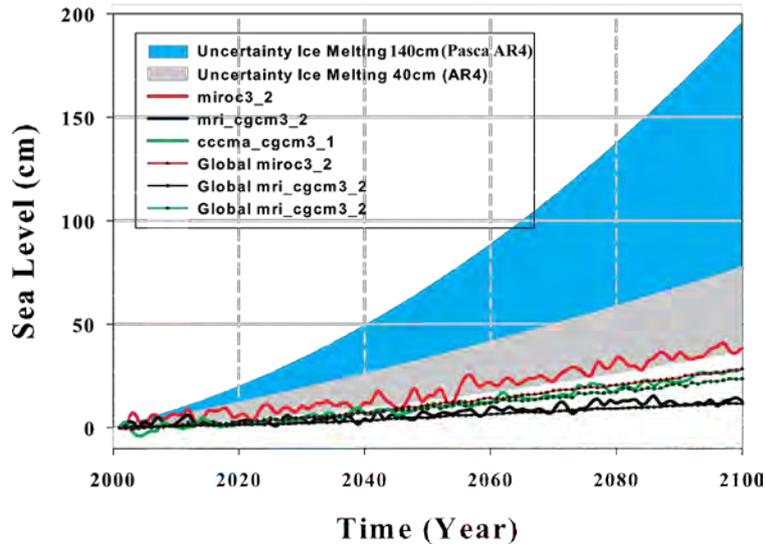
Rahmstorf (2007) menggunakan korelasi dan hubungan antara kenaikan TML dan kenaikan temperatur permukaan memprediksi kenaikan TML pada akhir abad ke-21, berkisar antara 50 cm sampai 140 cm relatif terhadap TML tahun 1990. Prediksi ini lebih tinggi daripada proyeksi IPCC AR4. Lebih lanjut, bahwa kenaikan TML karena perubahan massa, hanya didominasi oleh mencairnya es *glacier* (Bindoff, et al., 2007), maka prediksi *Rahmstorf (2007)* tidak memuat perubahan TML karena mencairnya es di Antartika dan Greenland.

Mencairnya es di Greenland terjadi sejak pertengahan tahun 1990-an, dengan penambahan akselerasi pencairan dari waktu ke waktu. Meskipun masih terlihat adanya penambahan 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 TML sebesar 1mm) pada akhir tahun 1990-an dan bertambah menjadi 200 Gt/tahun berdasarkan hasil observasi tahun 2006 (Steffen, et al., 2009). Perubahan massa es di Antartika berkisar antara 80 Gt/tahun pada pertengahan tahun 1990-an, dan meningkat menjadi 130 Gt/tahun. Hal ini berakibat terhadap penambahan tingkat kenaikan TML sampai tahun 2100, karena perubahan massa es menjadi 140 cm, sehingga proyeksi kenaikan TML di pantai Utara Pulau Lombok pada tahun 2100 terilustrasikan pada Gambar 4.11.

Gambar 4.11 menunjukkan tingkat kenaikan TML mencapai 184 cm pada tahun 2100. Sementara itu TML pada tahun 2020 naik sebesar 20 cm, naik 32 cm sampai tahun 2030, 68 cm pada tahun 2050, dan 138 cm 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 akibat gravitasi bulan dan matahari, serta iklim ekstrim seperti La nina.



Gambar 4.10 Perubahan tinggi lapisan tutupan es di Greenland berdasarkan analisis dengan menggunakan satelit IceSAT (sumber: Earthobservatory, NASA, 2007)



Gambar 4.11 Kenaikan TML pada tahun sampai tahun 2100, relatif terhadap TML pada tahun 2000, berdasarkan kajian pasca-IPCC AR4

4.3 Extreme Events

Secara umum, Indonesia yang terletak diantara dua samudera, yaitu Samudera Hindia dan Pasifik, sangat dipengaruhi oleh karakteristik dan anomali di kedua samudera tersebut. Dalam analisis *extreme events* ini, hanya dibatasi dengan *extreme events* yang terjadi di Samudera Pasifik yang lebih dikenal dengan ENSO yang terdiri dari La Nina dan El Nino.

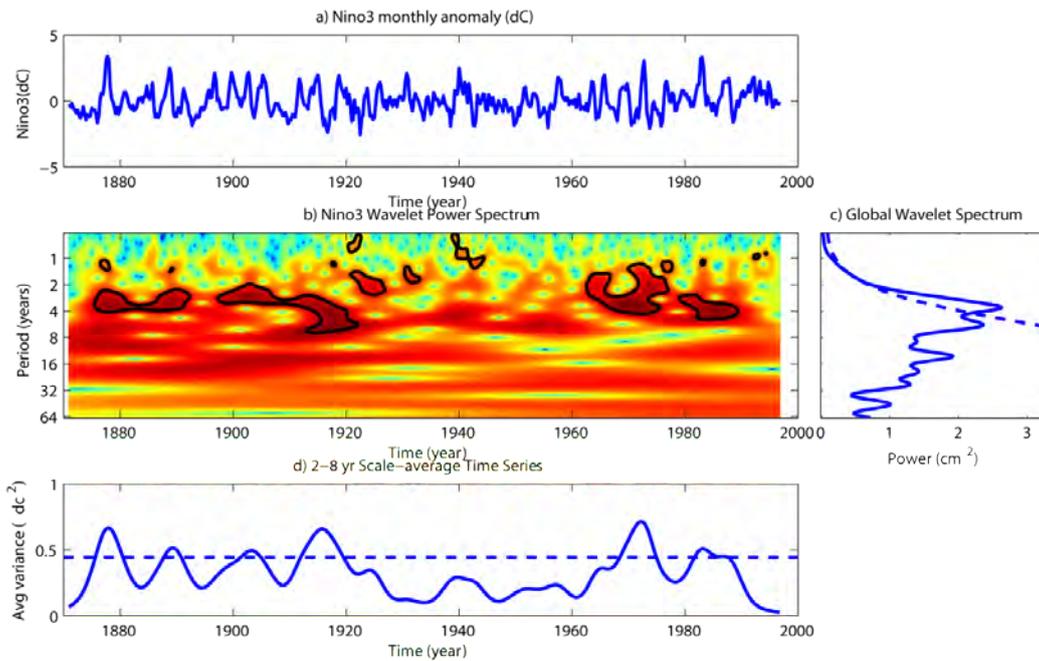
El Niño dan La Niña yang merupakan salah satu fenomena alam beberapa tahunan, terjadi karena evolusi SPL di Samudera Pasifik daerah tropis. El Niño ditandai dengan menurunnya SPL di Perairan Indonesia, dan meningkatnya SPL di Samudera Pasifik tropis bagian Timur, dengan kenaikan SPL lebih dari 0.5°C. 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.

4.3.1 Frekuensi ENSO

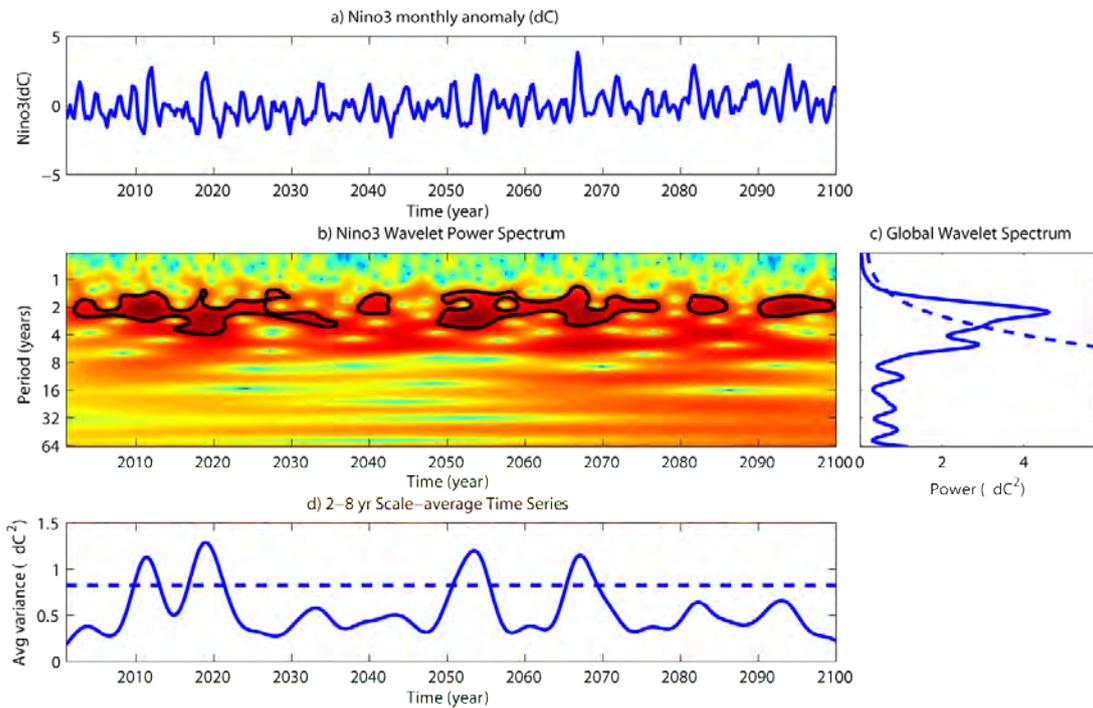
Berdasarkan pada evolusi SPL sebagai pemicu terjadinya El Niño dan La Niña, maka estimasi *time-frequency* El Niño dan La Niña dilakukan dengan menggunakan data SPL NINO3 (Nino3 adalah daerah di Samudera Pasifik Timur yang didefinisikan terletak antara 210°E sampai 270°E dan 5°S sampai 5°N) dengan proses detrenisasi (penghilangan tren kenaikan). Berdasarkan data historis SPL NINO3 dari tahun 1870 sampai 1998 (Gambar 4.12), menunjukkan bahwa ENSO terjadi dengan frekuensi 2 tahun sampai 7 tahun sekali, dengan periode ENSO intensif dari tahun 1875 sampai 1885 pada awal terjadinya revolusi industri di Eropa. Periode ENSO ke-dua terjadi pada tahun 1900 sampai 1920 pada waktu perang dunia pertama. Periode ketiga terjadi dari tahun 1920 sampai 1939, dengan frekuensi antara 1 sampai 2 tahun. Hal ini berkaitan dengan adanya industrialisasi besar-besaran terutama yang dilakukan oleh negara-negara yang kalah perang dalam perang dunia pertama, dilanjutkan dengan ENSO yang terjadi antara tahun 1939 sampai 1945 dengan frekuensi 1 tahunan, selama 5 tahun. Fenomena ENSO mengalami masa istirahat (*rest*) antara tahun 1945 sampai 1965, dan berlanjut lagi dengan periode keempat sejak tahun 1965 sampai sekarang. Meningkatnya frekuensi ENSO sejak tahun 1965, disebabkan oleh perkembangan negara-negara dunia ketiga, dari negara agraris menjadi negara industri. Setelah tahun 1965 periode ENSO meningkat menjadi 2 tahun sampai 6 tahun sekali dengan rentang waktu yang lebih lama. Total energi *power spectrum* menunjukkan ENSO dengan frekuensi 4 tahunan mempunyai energi tertinggi (lihat panel c). Hal ini menunjukkan bahwa dari tahun 1870 sampai 1999, frekuensi rata-rata terjadinya ENSO berada di 4 tahunan.



Gambar 4.12 Hasil analisis wavelet untuk data historis dari tahun 1871 sampai 1998

Hasil analisis *wavelet* dengan menggunakan keluaran model MRI_cgcm3.2 ditunjukkan pada Gambar 4.13 untuk scenario SRESa1b, sementara skenario SRESa2 dan b2 tidak ditampilkan. Berdasarkan hasil analisis wavelet dengan menggunakan data NINO3 MRI_cgcm3.2 pada skenario SRESa1b menunjukkan bahwa El Niño dan La Niña terjadi dengan periode 2 sampai 3 tahun sekali (Gambar 4.13 panel b). Pada skenario SRESa2 dan b1, masing-masing menunjukkan periode kejadian ENSO setiap 3 tahun sekali dan setiap 3 sampai 4 tahun sekali. Berdasarkan hasil ini, maka dapat disimpulkan bahwa frekuensi ENSO meningkat dibandingkan dengan hasil analisis dengan data historis.

Pada skenario SRESa1b menunjukkan bahwa, El Niño dan La Niña terbesar akan terjadi pada tahun 2005 sampai dengan 2015, 2015 sampai 2025, 2050 sampai 2055 dan 2065 sampai 2070 (Gambar 4.13 panel b). Sedangkan pada skenario SRESa2 menunjukkan bahwa El Niño dan La Niña terbesar akan terjadi pada tahun 2045 sampai 2050, 2060 sampai 2065, dan 2075 sampai 2085. Sementara, El Niño dan La Niña terbesar akan terjadi pada tahun 2035 sampai 2040, berdasarkan scenario SRESb1, dengan kekuatan ENSO lebih besar dibandingkan 2 skenario lainnya. Contoh hasil perhitungan dengan menggunakan MRI model *output* Nino3 SPL untuk estimasi kejadian dan frekuensi ENSO dapat dilihat pada Tabel 4.5.



Gambar 4.13 Hasil analisis wavelet untuk skenario SRESa1b

Tabel 4.5 ENSO *time-table* berdasarkan MRI model *output*

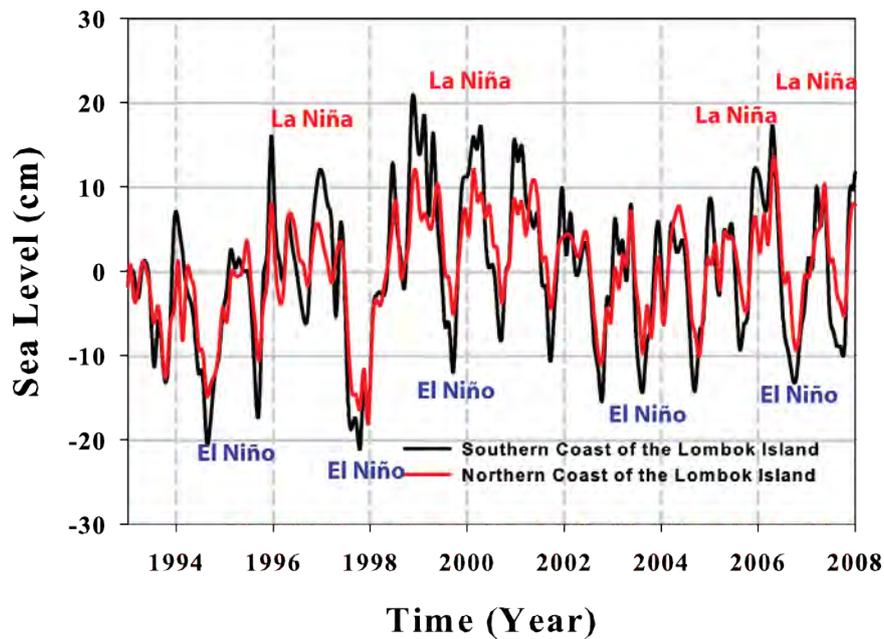
	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul	Agus	Sep	Okt	Nop	Des
2001	-1.04	-0.86	-0.81	-0.33	-0.55	-0.29	0.12	0.26	-0.34	-0.85	-0.85	-1.02
2002	-1.04	-0.77	-0.47	0.13	0.77	0.75	1.00	1.37	1.47	1.77	1.79	1.60
2003	1.13	0.81	0.09	-0.35	-0.56	-0.61	-1.16	-1.16	-1.05	-0.67	-0.69	-0.95
2004	-0.83	-1.20	-1.19	-0.86	-0.37	-0.78	0.30	0.42	0.77	0.93	0.89	1.13
2005	0.84	0.29	0.00	-0.25	-0.38	-0.75	-0.45	-0.68	-0.32	-0.77	-1.07	-0.99
2006	-0.89	-1.12	-1.19	-1.79	-1.68	-1.04	-0.53	-0.41	-0.36	-0.30	-0.28	-0.55
2007	-0.63	-0.93	-0.80	-0.72	-0.91	-0.29	0.10	0.23	0.43	0.72	0.76	0.69
2008	0.78	0.53	0.23	0.06	-0.90	-0.76	-0.84	-0.36	-0.67	-0.82	-0.75	-1.01
2009	-1.07	-0.78	-0.11	0.07	0.29	1.21	1.39	1.58	1.36	1.29	1.38	1.31
2010	0.98	0.56	-0.26	-1.18	-1.48	-1.23	-1.44	-1.74	-1.56	-1.86	-1.93	-2.11
2011	-1.98	-1.91	-1.63	-1.28	-0.10	1.53	2.21	1.99	2.24	2.40	2.73	3.06
2012	2.75	2.37	1.61	1.00	0.83	-0.06	-0.20	-0.01	-0.78	-1.02	-1.18	-1.59
2013	-1.45	-1.22	-0.54	-0.50	-0.42	-0.11	0.04	0.50	0.38	0.07	-0.08	0.12
2014	0.03	-0.20	-0.27	0.31	0.04	-0.24	-0.35	-0.46	-0.44	-0.14	-0.59	-0.54
2015	-0.70	-0.91	-0.50	-0.13	-0.04	-0.44	-0.15	-0.39	-0.05	-0.26	-0.52	-0.55
2016	-1.09	-0.91	-0.36	0.02	0.11	0.12	0.67	-0.03	-0.43	-0.45	-0.84	-0.97
2017	-1.09	-1.18	-1.30	-0.68	-0.95	-1.33	-1.09	-1.67	-1.91	-2.00	-2.09	-2.20
2018	-1.93	-1.97	-1.80	-1.36	-0.52	1.09	2.24	1.65	1.74	1.94	2.23	2.36
2019	2.50	2.25	1.85	1.39	1.19	0.73	0.50	0.73	0.45	0.17	-0.42	-0.78
2020	-0.82	-1.03	-0.85	-0.74	-1.26	-1.13	-1.41	-1.71	-2.28	-2.16	-2.35	-1.87
2021	-1.51	-1.54	-1.50	-1.09	-0.15	0.14	0.06	0.24	-0.21	-0.27	-0.08	-0.02
2022	-0.06	-0.18	-0.53	-0.56	-0.50	-0.83	-0.48	-0.40	-0.60	-0.71	-0.95	-1.49
2023	-1.40	-1.32	-0.90	-0.46	-0.03	1.05	0.63	1.13	1.04	0.92	0.73	0.25
2024	0.47	0.36	-0.28	-0.94	-1.33	-1.25	-1.31	-0.95	-0.85	-1.03	-0.90	-0.88
2025	-0.86	-0.97	-0.47	-0.66	-0.65	-0.48	-0.53	-0.36	0.29	0.53	0.70	0.50
2026	0.73	0.71	0.42	0.23	-0.56	-0.83	-0.85	-1.23	-1.87	-1.59	-1.64	-1.43
2027	-1.38	-2.00	-1.94	-1.49	-0.48	0.11	0.12	0.40	0.44	0.38	0.06	-0.38
2028	-0.54	-0.26	0.03	-0.20	-0.81	-0.64	-0.27	-0.44	-0.04	0.28	0.02	0.08
2029	0.26	0.39	0.18	-0.34	-0.65	-0.88	-1.37	-1.47	-1.94	-2.25	-1.92	-1.24
2030	-0.92	-0.80	-1.14	-0.89	-0.77	-0.79	-0.19	-0.12	0.51	0.45	0.56	0.37

La Niña El Niño

4.3.2 ENSO dan Tinggi Muka Laut

Dengan menggunakan model *HYbrid Coordinate Ocean model* dan data pasut di Jepara, Jakarta dan Surabaya, Sofian (2008), menyatakan bahwa pengaruh ENSO masih terlihat jelas di hasil perhitungan dengan model maupun data pasut. Hasil model dan data pasut menunjukkan kenaikan yang drastis dan cepat pada periode transisi antara El Niño kuat (1997/1998) dan La Niña kuat (1998/1999), meskipun hasil estimasi dengan model cenderung lebih rendah daripada observasi pasut di Jepara dan Surabaya.

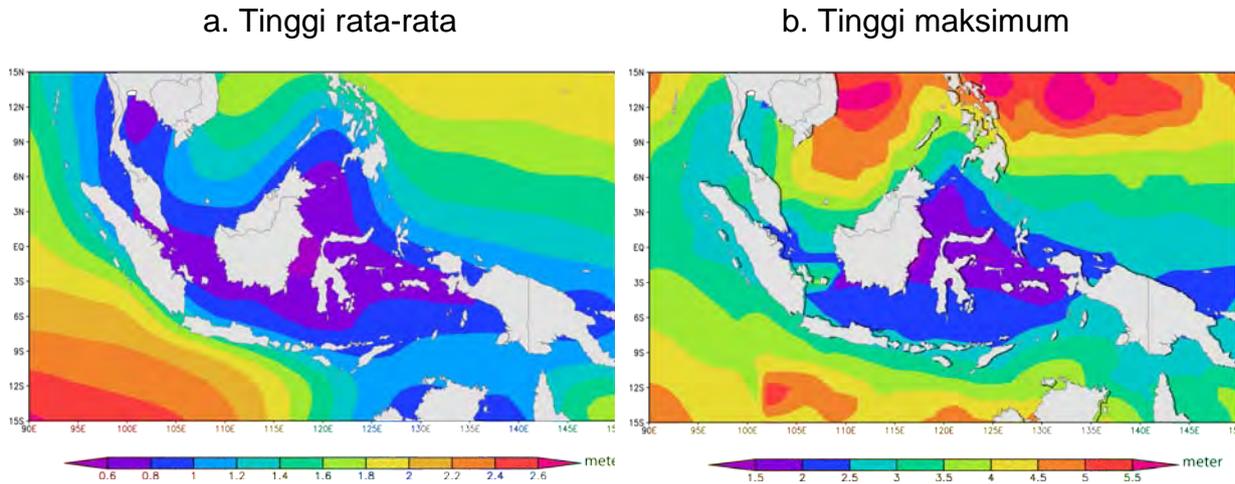
Seiring dengan Sofian (2008), *time-series* altimeter ADT/TML di sekitar Pulau Lombok dari tahun 1992 sampai 2008 menunjukkan bahwa pada saat terjadi El Niño, TML akan terdepresi sebesar 20 cm dibawah normal, dan pada periode La Niña akan terelevasi sebesar 10 cm sampai 20 cm. Hal ini berpengaruh terhadap resiko erosi, abrasi dan genangan air laut, terutama pada saat terjadi La Niña, dengan intensitas hujan yang lebih tinggi. Sofian et al. (2007) menyatakan bahwa kenaikan tinggi muka air laut pada saat masa transisi antara El Niño dan La Niña, serta La Niña disebabkan karena *trade wind* di Samudera Pasifik menguat dan membawa masa air dari Pasifik Timur di sekitar Peru ke daerah Perairan Indonesia, yang ditandai dengan perpindahan kolam air hangat (*warm pool*) dari Pasifik Tengah ke Laut Indonesia. Hal ini, menyebabkan naiknya gradien tinggi muka air laut, sehingga tinggi muka air laut di Laut Indonesia, 1 m lebih tinggi dibandingkan dengan tinggi muka air laut di sekitar Peru. Meskipun, angin lokal cenderung angin baratan karena turunnya tekanan udara di Darwin dan Perairan Indonesia yang berusaha menurunkan tinggi muka laut di Perairan Indonesia.



Gambar 4.14 Time series altimeter ADT/TML dari tahun 1993 sampai 2008. TML turun sampai 20cm pada periode El Niño kuat, dan naik 20cm pada periode La Niña kuat

4.3.3 ENSO dan Gelombang Ekstrim

Gelombang ekstrim merupakan salah satu dampak terjadinya iklim ekstrim. Perubahan iklim global memicu tidak stabilnya cuaca di Indonesia. Secara umum distribusi rata-rata tinggi gelombang tahunan di Perairan Indonesia terlihat seperti pada Gambar 4.15a, yang bervariasi antara 0.6 m sampai 2.4 m. Sementara itu, tinggi gelombang maksimum pada saat terjadinya gelombang ekstrim akibat meningkatnya tekanan angin (*wind forcing*) terlihat seperti pada Gambar 4.16b. Sebagai tambahan, distribusi spasial tinggi gelombang rata-rata di Samudera Hindia terlihat lebih tinggi dibandingkan dengan tinggi gelombang rata-rata di Samudera Pasifik Utara Pulau Papua, meskipun tinggi gelombang ekstrim di Samudera Pasifik 1 m sampai 2 m lebih tinggi dibandingkan dengan tinggi gelombang ekstrim di Samudera Hindia.



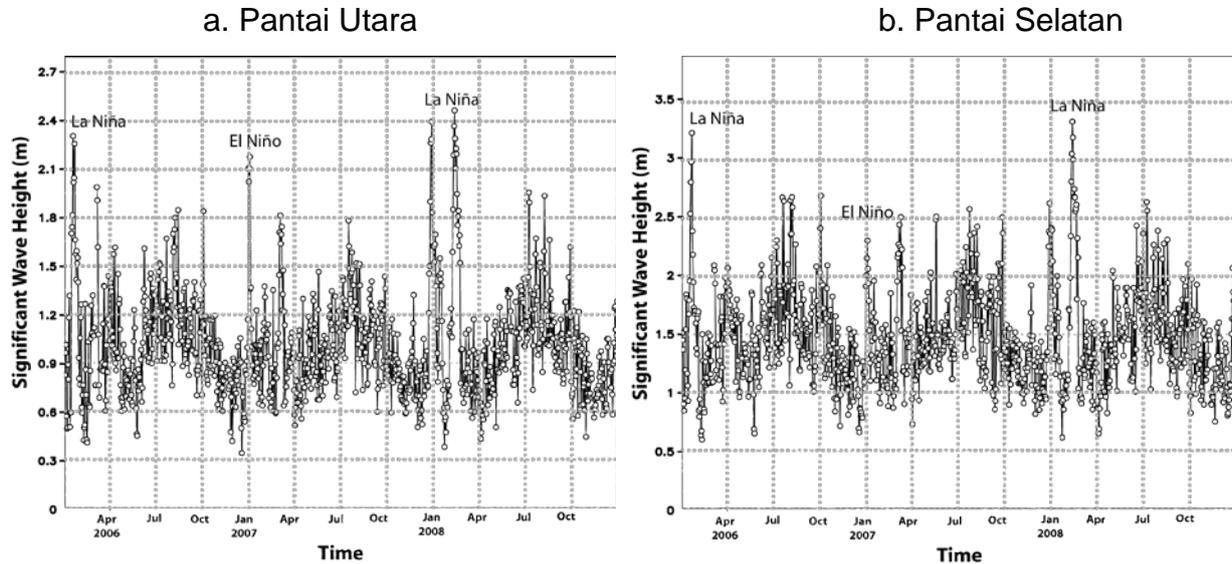
Gambar 4.15 Tinggi gelombang a. rata-rata dan b. maksimum yang diolah dari data altimeter *significant wave height* dari tahun 2006 sampai 2008

Gambar 4.16 menunjukkan data *time-series* tinggi gelombang di pantai Utara dan Selatan Pulau Lombok, dari tanggal 1 Januari 2006 sampai 31 Desember 2008. Rata-rata tinggi gelombang di pantai Selatan Pulau Lombok, 50 cm lebih tinggi dibanding dengan tinggi gelombang di pantai Utara Pulau Lombok, dengan rata-rata tinggi gelombang tahunan berkisar antara 1.6 m sampai 1.8 m dan 1.2 m sampai 1.4 m, masing-masing di pantai Selatan dan pantai Utara Pulau Lombok.

Gambar 4.16 juga menunjukkan bahwa iklim ekstrim seperti La Niña dan El Niño mengakibatkan terjadinya gelombang pasang dengan variasi antara 2.1 m sampai 2.5 m di pantai Utara dan 3 m sampai 3.5 m di pantai Selatan Pulau Lombok, meskipun El Niño (tanggal 1 Januari 2007) tidak menimbulkan dampak yang signifikan terhadap tinggi gelombang di pantai Selatan.

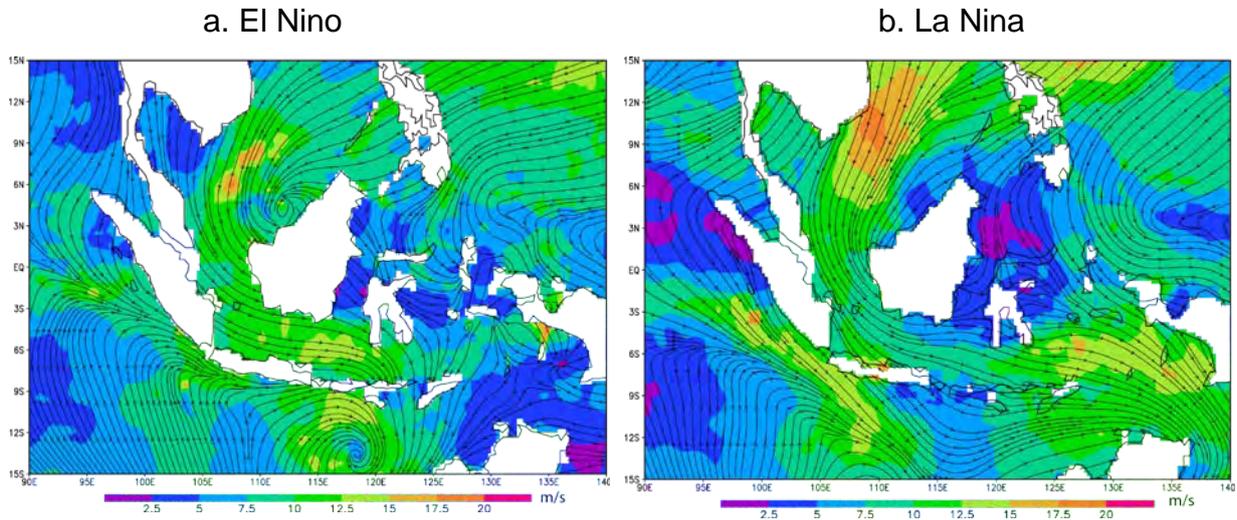
Pada waktu El Niño, tekanan udara di Darwin menurun menyebabkan terjadinya penurunan kecepatan angin Baratan, tetapi seringkali terjadi *wind burst*, yaitu tingginya kecepatan angin Barat sesaat karena SPL di Indonesia rendah dan tidak stabil. Meskipun, fenomena *wind burst* biasanya terjadi di laut bebas dan jarang terjadi di laut tertutup seperti di Laut Jawa (Gambar 4-18a). Anomali pola angin dengan terbentuknya 2 pusaran angin di sebelah Barat Kalimantan dan Australia, mengakibatkan kecepatan angin Barat di Laut Jawa mendekati 20 m/s, yang menyebabkan naiknya tinggi gelombang di pantai Utara Pulau Lombok. Rentang

(*fetching*) gelombang di pantai Selatan Pulau Lombok lebih pendek dibandingkan dengan rentang gelombang di Laut Jawa mungkin menjadi penyebab rendahnya kenaikan tinggi gelombang di pantai Selatan Pulau Lombok pada tanggal 1 Januari 2007.



Gambar 4.16 Tinggi gelombang harian di a. pantai Utara dan b. pantai Selatan Pulau Lombok dari Januari 2006 sampai Desember 2008

Pada periode La Niña, meskipun kecepatan angin di sekitar Pulau Lombok sedang sampai rendah (sekitar 8 m/s, Gambar 4.17b), tetapi propagasi gelombang Kelvin dari Samudera Hindia membuat naiknya tinggi gelombang di pantai Selatan Pulau Lombok mencapai 3 m. Sementara itu tinggi gelombang di pantai Utara Pulau Lombok juga mengalami kenaikan sebesar 1 m menjadi 2.5 m dari gelombang tertinggi tahunan sebesar 1.5 m. Kenaikan tinggi gelombang ini disebabkan propagasi gelombang dari Laut Jawa yang dangkal, sehingga kenaikannya hanya mencapai 1 m. Sebagai tambahan, tingginya gelombang laut pada fase El Nino dan dan La Nina akan mempertinggi intensitas erosi dan abrasi, dengan tingkat kerusakan yang tinggi pula. Pada akhirnya, dengan intensitas El Nino dan La Nina yang semakin tinggi, dapat mengakibatkan tingkat perubahan garis pantai yang semakin tinggi pula, meskipun tingkat kenaikan TML hanya 1 cm/tahun.

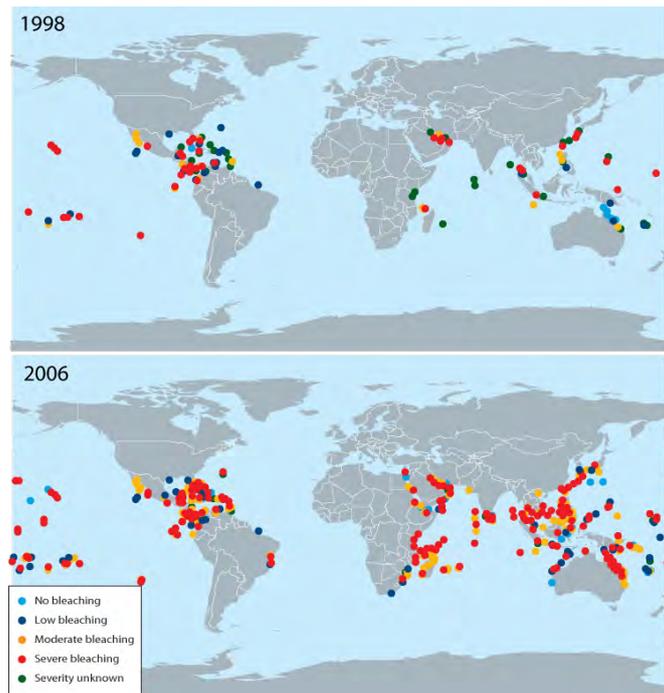


Gambar 4.17 Pola angin pada fase a. El Nino (1 Januari 2007) dan b. La Nina (1 Januari 2008)

4.3.4 ENSO dan *Coral Bleaching*

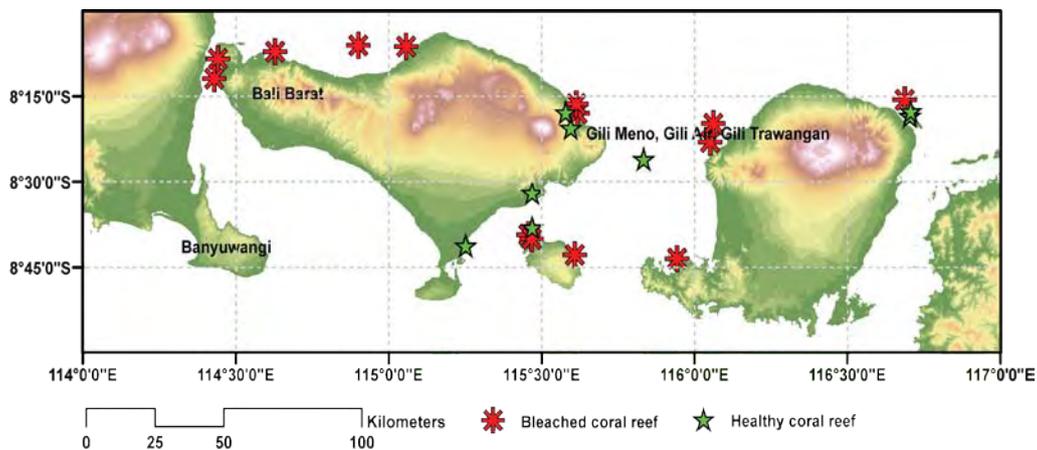
Coral reef yang biasa disebut terumbu karang sangat rentan terhadap perubahan suhu yang sangat drastis. Secara umum terumbu karang dapat hidup dengan baik pada suhu antara 26°C sampai 30°C. Kenaikan suhu laut antara 1°C sampai 2°C dari rata-rata tahunan dapat menjadi pemicu terjadinya pemutihan terumbu karang (*coral bleaching*) (Hoegh-Guldberg, 1999, Coles and Brown, 2003). Kenaikan suhu laut yang tinggi dapat menyebabkan pemutihan terumbu karang dalam waktu singkat, antara 2 sampai 3 minggu. Sedangkan penurunan suhu laut membutuhkan waktu yang lebih lama untuk menjadikan terumbu karang *bleaching*.

Disamping kenaikan suhu laut, terumbu karang juga rentan terhadap intensitas sinar matahari. Pada kondisi angin yang tenang, dan langit cerah, penetrasi sinar matahari sampai kedalaman 100 m, pemanasan laut menjadi intensif, dan memicu terjadinya pemutihan terumbu karang. Tingkat kerusakan terumbu karang secara global akibat naiknya suhu laut pada waktu La Niña tahun 1998/1999 dan 2006/2007 dapat dilihat pada Gambar 4.18. Tingkat kerusakan terumbu karang tahun 1998 merupakan tingkat kerusakan tertinggi dengan area yang luas. Setelah 1998, tingkat kerusakannya lebih rendah, tetapi dengan frekuensi yang lebih tinggi, sehingga menyebabkan penambahan lokasi pemutihan terumbu karang (Marshall and Schuttenberg, 2006).



Gambar 4.18 Lokasi pemutihan terumbu karang karena pengaruh kenaikan suhu laut dari tahun 1998 sampai tahun 2006 (Marshall and Schuttenberg, 2006)

Sementara itu peta kondisi terumbu karang di Pulau Lombok dan sekitarnya berdasarkan data yang diperoleh dari *basereef.org*, yang di tunjukkan pada Gambar 4.19, mengindikasikan bahwa kerusakan terumbu karang secara *masivve* sudah terjadi di perairan Pulau Lombok dan sekitarnya, dengan intensitas tertinggi terjadi di sekitar Gili Terawangan.



Gambar 4.19 Peta kerusakan dan pemutihan terumbu karang berdasarkan data dari Basereef.org

Dalam penanganan pemutihan terumbu karang diperlukan monitoring yang berkelanjutan untuk menghindari terjadinya pemutihan terumbu karang secara *masivve* karena terlambatnya *treatment*, dapat dilakukan dengan pemantaun yang berkelanjutan menggunakan data harian dari NOAA *Coral Reef Watch*, maupun menggunakan citra MODIS/Terra maupun MODIS/Aqua.

4.3.5 ENSO, Suhu Permukaan Laut dan Konsentrasi Klorofil-a

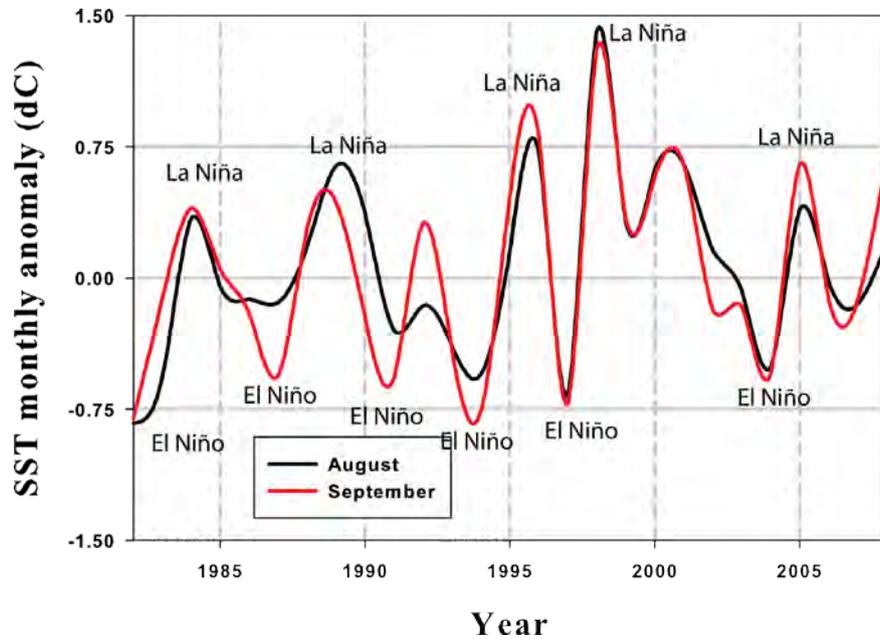
Perpindahan *warm-pool* sebagai salah satu indikator fenomena beberapa tahunan, El Niño dan La Niña, membawa dampak terhadap pola SPL di Perairan Indonesia. Dari data klimatologis (BAB 3), diketahui bahwa pada bulan Agustus sampai Oktober saat monsun Timur, konsentrasi klorofil-a di pantai Selatan Pulau Lombok mengalami kenaikan mendekati 0.4 mg/ akibat adanya *upwelling*, karena propagasi angin Timuran. Sementara itu SPL menunjukkan titik terendah tahunan antara 26°C sampai 27°C.

Secara umum daerah tangkapan ikan (*fishing ground*) dipengaruhi oleh SPL dan konsentrasi klorofil-a. Pada saat SPL rendah dan konsentrasi klorofil-a meninggi karena adanya *upwelling* yang membawa nutrient dari laut dalam (100 m sampai 200 m) yang bersuhu lebih rendah ke permukaan oleh *Ekman Pumping* akibat gaya coriolis dan angin Timuran, maka potensi perikanan daerah tersebut meninggi. Proses *upwelling* akan semakin intensif pada saat terjadinya *extreme events* El Niño.

El Niño dan La Niña sebagai salah satu fenomena global mempengaruhi proses *upwelling* dan *downwelling*, yang pada akhirnya akan berpengaruh terhadap perubahan dan perpindahan daerah tangkapan ikan. Gambar 4.20 menunjukkan SPL anomali pada bulan Agustus dan September dari tahun 1980 sampai 2008. Berdasarkan pola SPL bulan Agustus dan September dari tahun 1980 sampai 2008, dapat disimpulkan bahwa terjadi penurunan produksi perikanan tangkap pada waktu La Niña dan kenaikan hasil perikanan tangkap pada periode El Niño.

Distribusi spasial klorofil-a ditunjukkan dalam Gambar 4.21, pada waktu normal (klimatologi), El Niño (September 1997) dan La Niña (September 2008). Pada kondisi normal klorofil-a di pantai Selatan Pulau Lombok mencapai 0.4 mg/. Kenaikan konsentrasi klorofil-a terjadi pada periode El Niño mencapai 3 mg/ sebagai dampak dari menguatnya angin Timuran karena naiknya tekanan udara di Darwin dan Perairan Indonesia. Penguatan angin Timuran menyebabkan terjadinya penguatan *Ekman Pumping* dan *upwelling* di pantai Selatan Pulau Jawa, Bali, Lombok dan sebagian Sumatera menjadi lebih intensif (September 1997).

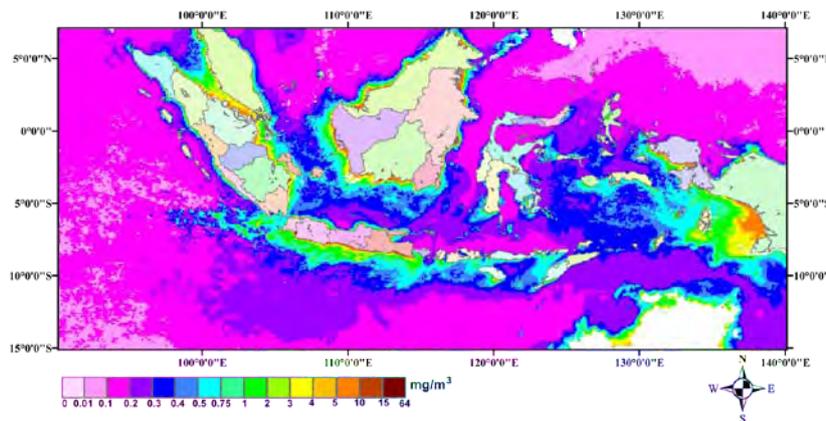
Pada periode El Niño, berdasarkan sebaran klorofil-a, daerah tangkapan ikan tersebar sepanjang pantai Selatan Pulau Jawa, Bali, Lombok, dan sebagian Sumatera. Sebaliknya, pada periode La Niña, tekanan udara di Darwin menurun, menyebabkan angin Timuran saat monsun Timur melemah. Proses *upwelling* tidak berjalan dengan baik, sehingga menyebabkan rendahnya kedalaman *mixing layer*, nutrient berkurang, dan perkembangan *phytoplankton* rendah seperti pada Gambar 4.21b. Hal ini menyebabkan terjadinya penurunan hasil perikanan tangkap, disamping disebabkan juga karena pengaruh naiknya SPL pada periode ini. Sebagai tambahan, daerah tangkapan ikan dengan potensi yang masih baik adalah daerah perairan disekitar Pulau Sumbawa, Timor dan pantai Selatan Pulau Jawa, dengan konsentrasi klorofil-a yang masih tinggi.



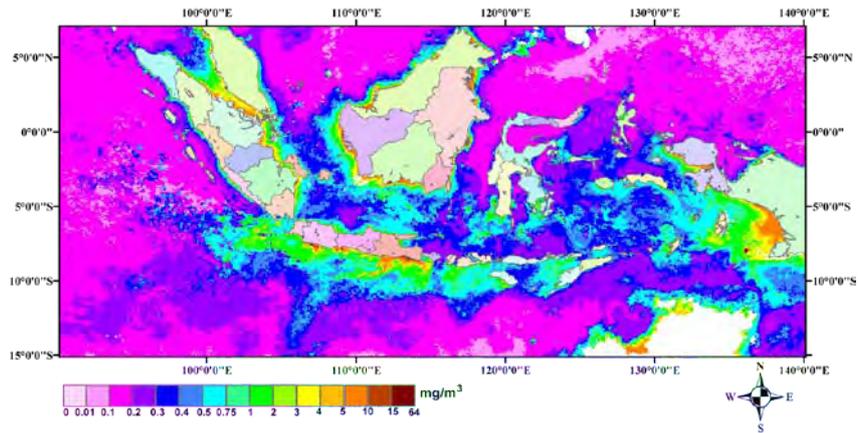
Gambar 4.20 SPL anomali bulan Agustus dan September dari tahun 1980 sampai 2008, dengan kenaikan SPL sebesar 0.75°C pada periode La Niña, dan penurunan sebesar 0.75°C pada periode El Niño

Berdasarkan hubungan antara ENSO, konsentrasi klorofil-a dan SPL, maka dapat disimpulkan, dengan semakin intensifnya ENSO yang makin meningkatkan konsentrasi nutrien akibat *upwelling*, mungkin masih memberikan dampak terhadap ikan pelagik lokal baik kecil dan sedang, meskipun suhu laut rata-rata akan meningkat (lihat sub-bab 4.1). Sedangkan ikan pelagik sedang sampai besar, berpotensi migrasi ke daerah dengan suhu laut lebih rendah (Hobdey et al, 2006).

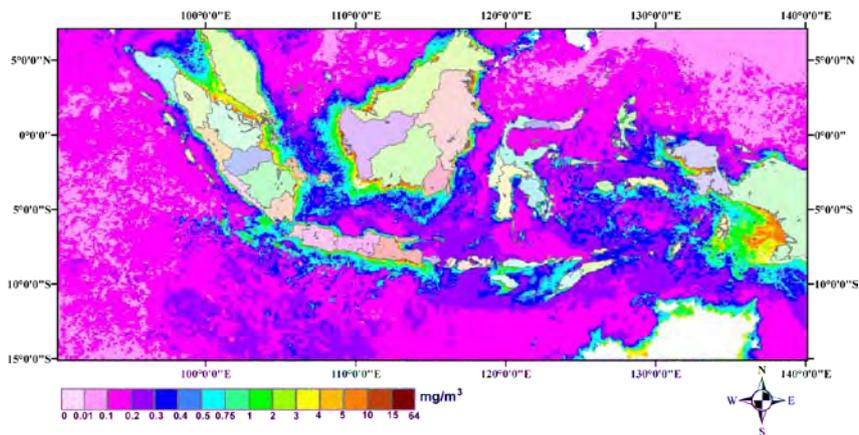
a. September



b. September 1997



c. September 2008



Gambar 4.21 Distribusi spasial klorofil-a pada bulan September pada kondisi normal, El Niño dan La Niña

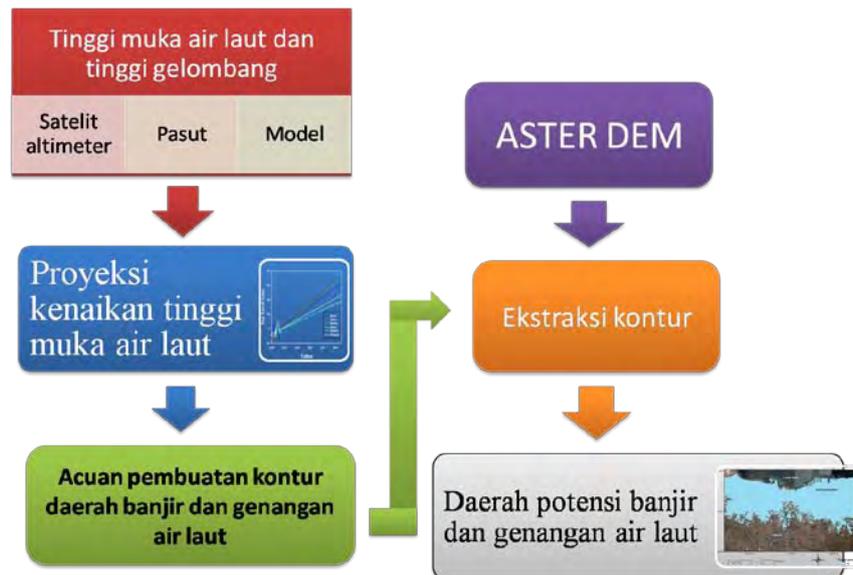
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil analisis dan pembahasan dampak pemanasan global terhadap tinggi muka laut (TML), SPL dan iklim ekstrim yang terdiri dari El Nino dan La Nina, dapat disimpulkan bahwa:

1. Kenaikan SPL di pantai Utara Pulau Lombok dan Sumbawa lebih besar dibandingkan kenaikan SPL di pantai Selatan Pulau Lombok dan Pulau Sumbawa. Kenaikan SPL di pantai Utara mencapai 1,2°C/abad, dan kenaikan SPL di pantai Selatan hanya berkisar antara 0,2°C/abad sampai 0,4°C/abad. Perbedaan tingkat kenaikan SPL antara pantai Utara dan Selatan ini disebabkan oleh perbedaan kedalaman, dan kondisi topografi. Pantai Utara berbatasan dengan Laut Jawa yang dangkal, sehingga *mixing layer* terbentuk dengan sempurna, dengan fluktuasi antara SPL tertinggi dan terendah tahunan tidak terlalu besar. Kenaikan SPL berdasarkan data model *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Special Report on Emission Scenario (SRES)* berkisar antara 0,3 °C/abad sampai 2,1°C/abad. Hasil estimasi model, relatif sesuai dengan estimasi berdasarkan data observasi, meskipun SPL hasil estimasi model pada tahun 2100, cenderung lebih tinggi $\pm 1^{\circ}\text{C}$, dibandingkan hasil estimasi dengan data observasi.
2. Hasil analisis dengan menggunakan data historis pasang surut (pasut), dan altimeter menunjukkan tingkat kenaikan sebesar 3,5 mm/tahun sampai dengan 8,0 mm/tahun, masing-masing di pantai Utara dan Selatan Pulau Lombok. Data hasil model berdasarkan skenario *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Special Report on Emission Scenario (SRES)* menunjukkan bahwa kenaikan TML akan bervariasi dari 4 mm/tahun sampai 8 mm/tahun sampai tahun 2100.
3. Berdasarkan hasil penelitian sejak tahun 2006, dengan memasukkan perubahan massa es dinamis dari mencairnya es di Greenland dan Antartika, didapatkan bahwa tingkat kenaikan TML mencapai 184 cm pada tahun 2100. Sementara itu TML pada tahun 2030 naik sebesar 32 cm dan naik 132 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 iklim ekstrim seperti La Nina dan El Nino.
4. Hasil analisis 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.
 5. Pada saat terjadi El Niño, TML akan terdepresi sebesar 20 cm dibawah normal, dan pada periode La Niña akan terelevasi sebesar 10 cm sampai 20cm. Hal ini berpengaruh terhadap risiko erosi, abrasi dan genangan air laut, terutama pada saat terjadi La Niña, dengan intensitas hujan yang lebih tinggi.
 6. Rata-rata tinggi gelombang tahunan berkisar antara 1.6 m sampai 1.8 m dan 1.2 m sampai 1.4 m, masing-masing di pantai Selatan dan pantai Utara Pulau Lombok. La Niña dan El Niño mengakibatkan terjadinya gelombang pasang dengan variasi antara 2.1m sampai 2.5m di pantai Utara dan 3m sampai 3.5m di pantai Selatan Pulau Lombok, meskipun El Niño tidak menimbulkan dampak yang signifikan terhadap tinggi gelombang di pantai Selatan.
 7. Secara umum daerah tangkapan ikan (*fishing ground*) dipengaruhi oleh SPL dan konsentrasi klorofil-a. Pada saat SPL rendah dan konsentrasi klorofil-a meninggi karena adanya *upwelling* yang membawa nutrient dari laut dalam (100 m sampai 200 m) yang bersuhu lebih rendah ke permukaan oleh *Ekman Pumping* akibat gaya coriolis dan angin Timuran, maka potensi perikanan daerah tersebut meninggi. Proses *upwelling* akan semakin intensif pada saat terjadinya *extreme events* El Niño. Pada kondisi normal klorofil-a di pantai Selatan Pulau Lombok mencapai 0.4 mg/. Kenaikan konsentrasi klorofil-a terjadi pada periode El Niño yang mencapai 3 mg/.
 8. *Coral reef* yang biasa disebut terumbu karang sangat rentan terhadap perubahan suhu yang sangat drastis. Secara umum terumbu karang dapat hidup dengan baik pada suhu antara 26°C sampai 30°C. Kenaikan suhu laut antara 1°C sampai 2°C dari rata-rata tahunan dapat menjadi pemicu terjadinya pemutihan terumbu karang (*coral bleaching*). Dengan tingkat kerusakan terumbu karang tahun 1998 merupakan tingkat kerusakan tertinggi dengan area yang luas. Setelah 1998, tingkat kerusakannya lebih rendah, tetapi dengan frekuensi yang lebih tinggi, sehingga menyebabkan penambahan lokasi pemutihan terumbu karang.

Salah satu contoh penggunaan data hasil analisis kenaikan SLR adalah peta rendaman, disamping hasil analisis tinggi gelombang maksimum, tinggi pasang surut, dan penurunan muka tanah. Sebagai contoh diagram alir pembuatan peta rendaman dengan menggunakan data ASTER DEM (*Digital Elevation Model*) dengan resolusi 30m, dapat dilihat pada Gambar 5.1. Untuk analisis daerah rendaman secara detil, diperlukan data DEM dengan akurasi dan resolusi spasial tinggi, serta data tata guna lahan presisi tinggi.



Gambar 5.1 Diagram alir penentuan daerah genangan akibat kenaikan TML

Meskipun terdapat perbedaan hasil analisis antara hasil kenaikan TML dengan data observasi, altimeter dan model, tetapi kenaikan TML adalah suatu keniscayaan. Perbedaan hasil proyeksi menunjukkan ketidakpastian tingkat kenaikan TML pada tahun 2100, dengan rentang antara 40 cm sampai 150 cm.

Pengaruh pemanasan global dan perubahan iklim di sektor kelautan harus dilakukan dengan penguatan riset dan monitoring yang terpadu tidak hanya terbatas pada aspek fisis, tetapi juga pada spesies serta ekosistem laut dan pantai. Berdasarkan pada tingginya ketidakpastian dampak perubahan iklim di sektor kelautan, penggunaan model hanya memungkinkan dilakukan untuk analisis dampak perubahan iklim jangka pendek dan menengah. Penggunaan model yang terintegrasi antara aspek fisis, biologi dan ekosistem seperti ROMS (*Regional Ocean modeling System*) mungkin merupakan salah satu metode untuk analisis dampak

perubahan iklim terhadap aspek fisik laut yang meliputi TML, gelombang, pola arus, suhu dan salinitas, transport massa air dan sedimen serta aspek *biogeochemical* seperti karbon dan nitrogen fluks.

DAFTAR PUSTAKA

- AVISO, 2009, SSALTO/DUACS User Handbook: (M)SLA and M(ADT) Near-Real Time and Delayed Time Products, CLS-DOS-NT-06.034, Version 1, Revision 10,
- Bamber J.L., R.L. Layberry, and S.P. Gogenini, 2001, A new ice thickness and bedrock data set for the Greenland ice sheet, *JGR Atmospheres*, 106, D24: 33773-33780.
- Bindoff, N.L., Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller, 2007: Observations: Oceanic climate change and sea level. 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*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 385-432.
- Coles, S. L., and B.E. Brown, 2003, Coral bleaching—capacity for acclimatization and adaptation, *J. Adv. Mar. Bio.*, Vol. 86, pp. 183-223.
- Folland, C.K., N.A. Rayner, S.J. Brown, T.M. Smith, S.S.P. Shen, D.E. Parker, I. Macadam, P.D. Jones, R.N. Jones, N. Nicholls and D.M.H. Sexton (2001). "Global temperature change and its uncertainties since 1861". *Geophysical Research Letters* 28: 2621-2624.
- Hansen, J., Mki. Sato, R. Ruedy, K. Lo, D.W. Lea, and M. Medina-Elizade, 2006, Global temperature change. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **103**, 14288-14293.
- Hobday, A.J., Okey, T.A., Poloczanska, E.S., Kunz, T.J. & Richardson, A.J. , 2006, Impacts of climate change on Australian marine life: Part A. Executive Summary. Report to the Australian Greenhouse Office, Canberra, Australia.
- Hoegh-Guldberg, O., 1999, Climate change: coral bleaching and the future of the world's coral reefs, *J. Mar. and Fresh. Res.*, Vol. 50, pp. 839-866.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2007, Climate Change 2007 - The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the IPCC. Cambridge, *Cambridge University Press*.
- Knutti, Reto and T. F. Stocker, 2000, Influence of the Thermohaline Circulation on Projected Sea Level Rise, *Journal of Climate* 13, 12: 1997-2001.
- Lythe, B. Matthew, D. G. Vaughan and the BEDMAP Consortium, 2001, BEDMAP: A new ice thickness and subglacial topographic model of Antarctica, *J. Geo. Res.* 106, B6: 11335–11351.

- Marshall, P., and H. Shuttenberg, 2006, A Reefs Manager's Guide to Coral Bleaching, Great Barrier Reef Marine Park Authority, 1-166 pp.
- Meehl, G. A., Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, and H.L. Miller 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*, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, 748-845.
- Rahmstorf, S., 2007: A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise. *Science*, 315, 368-370.
- Rayner, N. A., D. E. Parker, E. B. Horton, C. K. Folland, L. V. Alexander, and D. P. Rowell, 2003, Global analyses of sea surface temperature, sea ice, and night marine air temperature since the late nineteenth century, *J. Geophys. Res.*, VOL. 108, NO. D14, 4407.
- Reynolds, R. W. and T. M. Smith, 1994, Improved global sea surface temperature analyses using optimum interpolation. *J. Climate*, 7, 929-948.
- Ridley, J.K., P. Huybrechts, J.M. Gregory, and J.A. Lowe, 2005: Elimination of the Greenland ice sheet in a high CO₂ climate. *Journal of Climate*, Vol 18, 3409-3427.
- Rignot, Eric and P. Kanagaratnam, 2006, Changes in the Velocity Structure of the Greenland Ice Sheet, *Science*, 311, 5763: 986-990.
- Steffen, K., P. U. Clark., J. G. Cogley, D. Holland, S. Marshall, E. Rignot, and R. Thomas, 2009, Rapid Changes in Glaciers and Ice Sheets and their Impacts on Sea Level in: *Abrupt Climate Change*, Final Report, Synthesis and Assessment Product 3.4, U. S. Geological Survey.
- Sofian, I, 2007, Simulation of The java Sea using an Oceanic General Circulation Model, *J. Geomatika*, Vol. 13 No. 2, 1-14.
- Timmermann, A., M. Latif, A. Bacher, J. Oberhuber, E. Roeckner, 1999, Increased El-Niño, *Nature*, 398, 694-696.
- Timmermann, A., 2001, Changes of ENSO stability due to Greenhouse Warming, *Geophysical Research Letters*, 28, 8: 2064-2066.
- Torrence, C. and G. P. Compo., 1999, A Practical Guide to Wavelet Analysis, *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79, 1:61-78.
- UNEP/GRID-Arendal, 2007, Global Outlook for Ice and Snow, UNEP