



**KEMENTERIAN RISET, TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
PROGRAM PASCASARJANA**

Jalan Padang Selasa Nomor 524, Bukit Besar Palembang Kode Pos 30139

Telepon (0711) 352132, 354222 Faksimili (0711) 317202, 320310

Homepage: www.pps.unsri.ac.id Email: info@pps.unsri.ac.id

KEPUTUSAN

DIREKTUR PROGRAM PASCASARJANA UNIVERSITAS SRIWIJAYA

Nomor : 288 /UN9.2/DT/2019

tentang

**PANITIA PROMOSI GELAR DOKTOR MAHASISWA
PADA PROGRAM DOKTOR (S3) ILMU LINGKUNGAN
PROGRAM PASCASARJANA UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

DIREKTUR PROGRAM PASCASARJANA UNIVERSITAS SRIWIJAYA

- Menimbang** : a. bahwa sehubungan dengan surat Ketua Program Doktor (S3) Ilmu Lingkungan Program Pascasarjana Universitas Sriwijaya nomor: 176/UN9.2.2/KM/2019 tanggal 4 Juli 2019 tentang permohonan izin pelaksanaan ujian akhir disertai terbuka dari pemberitahuan SK, dinyatakan bahwa **Sdr. Putri Adia Utari, NIM 20013681621021** telah memenuhi syarat akademik untuk menyelesaikan studinya;
- b. bahwa mahasiswa Pendidikan Doktor (S3) Ilmu Lingkungan Program Pascasarjana Universitas Sriwijaya yang akan menyelesaikan studinya harus menempuh promosi gelar Doktor;
- c. bahwa untuk ujian yang dimaksud pada butir b perlu ditetapkan dan diangkat panitia promosi gelar Doktor mahasiswa dimaksud;
- d. bahwa sehubungan dgn butir a, b dan c di atas perlu diterbitkan keputusan sbg pedoman & landasan hukumnya.
- Mengingat** : 1. Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 20 Tahun 2003 tentang Sistem Pendidikan Nasional;
2. Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 12 Tahun 2012 tentang Pendidikan Tinggi;
3. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 4 Tahun 2014 tentang Penyelenggaraan Pendidikan Tinggi dan Pengelolaan Perguruan Tinggi;
4. Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 8 Tahun 2012 tentang Kerangka Kualifikasi Nasional Indonesia;
5. Keputusan Menteri Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia Nomor 44 Tahun 2015 tentang Standar Nasional Pendidikan Tinggi;
6. Keputusan Menteri Riset, Teknologi dan Pendidikan Tinggi Republik Indonesia Nomor 334/M/KP/XI/2015 tentang Pemberhentian dan Pengangkatan Rektor Universitas Sriwijaya;
7. Surat Dirjen Dikti Nomor 720/D/T/2007 tentang Ijin Penyelenggaraan Program Studi Ilmu Lingkungan (S3) pada Universitas Sriwijaya;
8. Keputusan Rektor Unsri Nomor 0760/UN9/KP/2016, tentang Pemberhentian dan Pengangkatan Direktur Program Pascasarjana Universitas Sriwijaya Masa Tugas Tahun 2016-2020.

MEMUTUSKAN

- Menetapkan** : **SUSUNAN PANITIA PROMOSI GELAR DOKTOR MAHASISWA PROGRAM DOKTOR (S3) ILMU LINGKUNGAN PROGRAM PASCASARJANA UNIVERSITAS SRIWIJAYA**

- Pertama** : Menunjuk panitia promosi gelar Doktor Program Studi Doktor (S3) Ilmu Lingkungan dgn personalianya sbg berikut:
- Pengarah** : Prof. Dr. Ir. Amin Rejo, M.P.
Penanggung Jawab : Ir. Sabaruddin, M.Sc., Ph.D.
Ketua : Prof. Dr. Ir. Nurhayati, M.Si.
Promotor : Prof. Dr. Iskhaq Iskandar, M.Sc.
Co-Promotor I : Dr. Dedi Setiabudidaya, M.Sc.
Co-Promotor II : M. Yusup Nur Khakim, S.Si., M.Si., Ph.D.Eng.
Anggota : 1. Dr. Ir. Siti Masreah Bernas, M.Sc.
2. Dr. Ir. M. Faizal, DEA.
3. Dr. Moh. Rasyid Ridho, M.Si.
4. Dr. Ir. Restu Juniah, MT.
5. Dr. Zazili Hanafiah, M.Sc.
6. Dr. Budhi Kuswan Susilo, ST., MT.
7. Dr.-Ing. Widodo Setiyo Pranowo, M.Si. (Pusat Riset Kelautan, Badan Riset dan SDM, Kementerian Kelautan dan Perikanan).

untuk menguji mahasiswa

Nama : Putri Adia Utari

NIM : 20013681621021

Judul Disertasi : **Dinamika dan Termodinamika Sirkulasi Laut dan Atmosfer di Wilayah Tropis Samudra India.**

- Kedua** : Segala biaya yang timbul sebagai akibat dari diterbitkannya Surat Keputusan ini dibebankan pada anggaran yang tersedia pada Program Pascasarjana Universitas Sriwijaya;

- Ketiga** : Keputusan ini berlaku sejak tanggal ditetapkan, dengan ketentuan bahwa segala sesuatu akan diubah dan/atau diperbaiki sebagaimana mestinya apabila terdapat kekeliruan dalam keputusan ini.

Ditetapkan di : Palembang
pada Tanggal : 7 Juli 2019
Direktur

Prof. Dr. Ir. Amin Rejo, M.P.
NIP.19610114 199001 1 001

Tembusan :

1. Rektor (sebagai laporan)
2. Wakil 1 & Wakil 2
3. Ketua Program Doktor (S3) Ilmu Lingkungan
4. Dosen Penguji
5. Mahasiswa Ybs.

DISERTASI

**DINAMIKA DAN TERMODINAMIKA SIRKULASI
LAUT DAN ATMOSFER DI WILAYAH TROPIS
SAMUDERA INDIA UNTUK KEBERLANJUTAN
EKOSISTEM PERAIRAN**



**PUTRI ADIA UTARI
20013681621021**

**PROGRAM STUDI DOKTOR ILMU LINGKUNGAN
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS SRIWIJAYA
2019**

HALAMAN PENGESAHAN

**DINAMIKA DAN TERMODINAMIKA SIRKULASI LAUT
DAN ATMOSFER DI KAWASAN TROPIS SAMUDERA INDIA
UNTUK KEBERLANJUTAN EKOSISTEM PERAIRAN**

DISERTASI

Diajukan Untuk Melengkapi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Doktor Ilmu Lingkungan
Universitas Sriwijaya

Oleh:

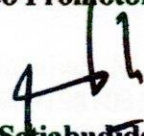
**PUTRI ADIA UTARI
NIM.20013621621021**

Palembang, 16 Juli 2019

Promotor


**Prof. Dr. Iskhaq Iskandar, M.Sc
NIP. 197210041997021001**

Co Promotor I


**Dr. Dedi Setiabuddaya, M.Sc.
NIP. 196011101986021001**

Co Promotor II


**M. Yusup Nur Khakim, Ph.D.
NIP. 197203041999031002**


Mengetahui
Direktur Program Pascasarjana

**Prof. Dr. Ir. Amin Rejo, M.P.
NIP. 196101141990011001**

HALAMAN PERSETUJUAN

Karya tulis ilmiah berupa Disertasi ini dengan judul “Dinamika dan Termodinamika Sirkulasi Laut dan Atmosfer Di Kawasan Tropis Samudera India” telah dipertahankan di hadapan Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah Program Pascasarjana Universitas Sriwijaya pada tanggal 16 Juli 2019.
Palembang, 16 Juli 2019

Tim Penguji Karya Tulis Ilmiah berupa Disertasi

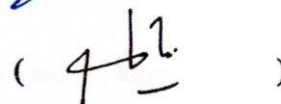
Ketua:

1. Prof. Dr. Iskhaq Iskandar, M.Sc
NIP. 197210041997021001

()

Anggota:

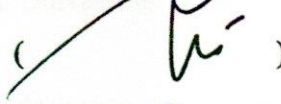
1. Dr. Dedi Setiabudidaya, M.Sc.
NIP. 196011101986021001

()


2. M. Yusup Nur Khakim, Ph.D.
NIP. 197203041999031002

()

3. Dr. Ir. Restu Juniah, M.T.
NIP. 196706271994022001

()

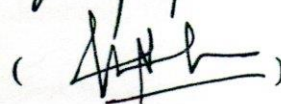
4. Dr. Ir. H. M. Faizal, DEA.
NIP. 195805141984031001

()

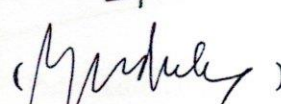
5. Dr. Moh. Rasyid Ridho, M.Si.
NIP. 196905011995031002

()

6. Dr. Ir. Siti Masreah Bernas, M.Sc
NIP. 195612301985032001

()

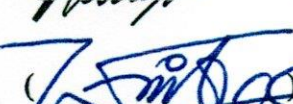
7. Dr. Budhi Kuswan Susilo, S.T., M.T.
NIP. 197111101999031005

()

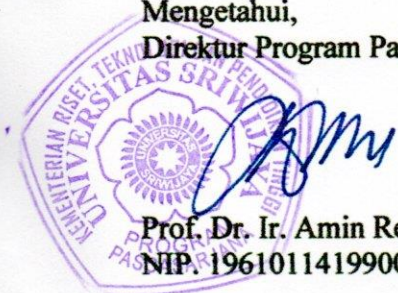
8. Dr. Zazili Hanafiah, M.Sc.
NIP. 195909091987031004

()

9. Dr. Ing. Widodo Setiyo Pranowo, M.Si
NIP. 197509052002121003

()

Mengetahui,
Direktur Program Pascasarjana



Prof. Dr. Ir. Amin Rejo, M.P.
NIP. 196101141990011001

Ketua Program Studi
Ilmu Lingkungan

()

Prof. Dr. Ir. Nurhayati, M.Si.
NIP. 196202021991032001

DAFTAR ISI

	Halaman
HALAMAN PENGESAHAN.....	ii
PRAKATA.....	iii
DAFTAR SINGKATAN.....	v
RINGKASAN	vi
SUMMARY	viii
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR TABEL	xviii
DAFTAR PERSAMAAN	xviii
DAFTAR PUBLIKASI DAN SEMINAR	xx
BAB I PENDAHULUAN.....	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Manfaat Penelitian	5
1.4.1 Ilmu Pengetahuan	5
1.4.2 Kebijakan Adaptasi dan Mitigasi Perubahan Iklim	6
1.5 Kebaruan Penelitian	6
1.6 Kerangka Pikir Penelitian.....	11
1.7 Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian.....	12
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	14
2.1 Kondisi Geografis Samudera India.....	14
2.2 Harmonisasi Lingkungan dan Keberlanjutan Pengelolaan Wilayah Pesisir	16
2.3 Kondisi Lautan dan Atmosfer	19
2.4 Sirkulasi Arus	21
2.5 <i>Indian Ocean Dipole (IOD)</i>	22
2.6 <i>Dipole Mode Index (DMI)</i>	24
2.7 Keseimbangan Bahang	25
2.8 Kemutakhiran “ <i>State Of The Art Penelitian</i> ”	29
BAB III METODE PENELITIAN	31
3.1 Jenis Penelitian.....	31
3.2 Lokasi Penelitian dan Waktu Pelaksanaan	33
3.3 Tahapan Penelitian	35
3.3.1 Tahapan Penelitian I.....	35
A. Pengumpulan Data	35

B. Proses Data	36
C. Analisis Data	37
3.3.2 Tahapan Penelitian II	38
A. Pengumpulan Data	38
B. Proses Data	39
C. Analisis Data	40
3.3.3 Tahapan Penelitian III	41
A. Pengumpulan Data	41
B. Proses Data	43
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	44
4.1. Karakteristik IOD positif 2006 dan IOD Negatif 2010.....	44
4.1.1 Karakteristik IOD Positif 2006	44
4.1.2 Karakteristik IOD Negatif 2010	46
4.2. Karakteristik Kesetimbangan Bahang Saat Kejadian IOD Positif 2015.....	51
4.3. Karakteristik Arus pantai selatan Jawa.....	59
BAB V KESIMPULAN & SARAN	78
5.1 Kesimpulan	78
5.2. Saran	79
DAFTAR PUSTAKA.....	80

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1.1 Kerangka pikir penelitian	11
Gambar 2.1 Daerah Kajian Samudera India.....	14
Gambar 2.2 Batimetri Samudera India.....	15
Gambar 2.3 State of the art penelitian.....	30
Gambar 2.4 Komponen Lingkungan Hidup.....	17
Gambar 2.5 Pola sirkulasi angin musiman di kawasan ekuator Samudera India	21
Gambar 2.6 Pola Arus Wyrтки selama musim transisi I (Mei) dan musim transisi II (November).....	22
Gambar 2.7 Skema fenomena IOD positif dan IOD negatif.....	23
Gambar 2.8 Perhitungan Dipole Mode Index, anomali rerata suhu di bagian barat (box-A) dan anomali rerata suhu di bagian timur (box-B).....	24
Gambar 2.9 Dipole Mode Index (<i>DMI</i>) selama periode Januari 2001 – Maret 2010, c) Dipole Mode Index (<i>DMI</i>) selama periode Januari 2011 – Maret 2017	25
Gambar 2.10 Spektrum Gelombang Elektromagnetik	26
Gambar 2.11 Spektral energi radiasi matahari yang dipancarkan benda hitam dan yang diterima di muka bumi.....	29
Gambar 2.12 Spektral energi radiasi matahari yang sampai ke permukaan bumi.	28
Gambar 3.1 Diagram tahapan penelitian.....	32
Gambar 3.2 Lokasi Penelitian yang mengindikasikan perbedaan temperatur yang ditunjukkan oleh box A (50°-70°BT dan 10°LS - 10°LU) dan box B (90°-110°BT dan 10°LS - 0°LU).....	33
Gambar 3.3 Diagram alir pengolahan data penelitian tahap I.....	37
Gambar 3.4 Diagram alir pengolahan data penelitian tahap II.....	40
Gambar 4. 1 (a) Indeks DMI selama kejadian IOD negatif sepanjang bulan Januari – Desember 2006 (b) Anomali arus permukaan pada 80,5°BT dan 90°BT.	45

Halaman

Gambar 4.2 (a) Nilai DMI selama evolusi kejadian IOD negatif sepanjang bulan Januari – Desember 2010 (b) Anomali arus permukaan pada 80,5°BT dan 90°BT	46
Gambar 4.3 Arus zonal bawah permukaan pada koordinat a). 80,5°BT dan b). 90°BT di tahun 2006.	47
Gambar 4.4 Arus zonal bawah permukaan pada koordinat a). 80,5°BT dan b). 90°BT di tahun 2010.	48
Gambar 4.5 Diagram hovmouller dari a) anomali angin permukaan, b) anomali SSH dan c) anomali arus permukaan rata-rata antara 5°LS-5°LU sepanjang ekuator selama tahun 2006. Kontur biru (merah) adalah untuk anomali ke arah timur (barat).	48
Gambar 4.6 Diagram hovmouller yang sama dengan Gambar 4.5 yang membedakan hanya periode evolusi IOD negatif di tahun 2010. Kontur biru (merah) adalah untuk anomali timur (barat).	50
Gambar 4.7 Indeks DMI ditunjukkan dengan perbedaan temperatur antara anomali SPL di kawasan ekuator bagian barat (10°LS–10°LU, 50°–70°BT) dan kawasan ekuator bagian timur (0°–10°LS, 90°–110°BT)	51
Gambar 4.8 Anomali SPL sepanjang bulan Januari – Desember 2015.....	52
Gambar 4.9 Anomali sirkulasi Walker rata-rata antara 5°LS - 5°LU sepanjang bulan Januari – Desember 2015 pada level ketinggian yang berbeda.	54
Gambar 4.10 Evolusi spasial dan temporal anomali kedalaman isothermal 20°C (D20–kontur) dan arus dekat permukaan (vektor) sepanjang bulan Juni – November 2015. Garis hitam menunjukkan kontur bernilai 0 pada D20.....	55
Gambar 4.11 Deret waktu DMI dan <i>Subsurface</i> DMI (SDMI).....	56
Gambar 4.12 Komponen neraca bahang sepanjang bulan Januari – Desember 2015.	57
Gambar 4.13 Komponen bahang atmosfersepanjang bulan Januari – Desember 2015.....	57

Halaman

Gambar 4.14 Komponen bahang atmosfer sepanjang bulan Januari – Desember 2015.....	57
Gambar 4.15 Rangkaian waktu arus zonal dekat-permukaan dari OSCAR dan angin sepanjang pantai di selatan Jawa (cm/s^1), (b) profil kedalaman terhadap waktu dari arus zonal yang diamati dari ADCP yang tertambat di selatan Jawa. Arus timur (barat) diarsir oleh warna kemerahan (kebiruan) (cm/s). Nilai nol ditandai oleh kontur hitam. (c) - (d) sama seperti pada (a) - (b) kecuali untuk komponen meridional.....	61
Gambar 4.16 Spektrum arus dari (a) zonal, dan (b) arus meridional diamati pada $106,75^\circ \text{ BT}$, $8,5^\circ \text{ S}$ di Selatan Jawa.....	62
Gambar 4.17 Sama dengan Gambar 4.14 kecuali untuk arus zonal yang diamati dan angin zonal pada (a) - (b) $80,5^\circ \text{ E}$, dan (c) - (d) 90° E di ekuator.	63
Gambar 4.18 Korelasi rerata arus zonal lapisan atas (kedalaman 100 m) yang diamati pada $106,75^\circ \text{ E}$, $8,5^\circ \text{ S}$ di Selatan Jawa dan yang diamati pada $80,5^\circ \text{ E}$, 0° S (merah) dan 90° E , 0° S (hitam). Garis putus-putus horisontal menunjukkan tingkat kepercayaan 95%.	64
Gambar 4.19 Korelasi antara arus zonal rata-rata lapisan atas (kedalaman 100 m) yang diamati pada $106,75^\circ \text{ BT}$, $8,5^\circ \text{ S}$ di selatan Jawa berkorelasi dengan (a) - (d) TPL (kontur) dan angin permukaan (vektor), (e) - (h) arus dekat permukaan dari OSCAR. Hanya korelasi di atas tingkat kepercayaan 95% yang ditampilkan.....	65
Gambar 4.20 Representasi skematis dari arus yang teridentifikasi (mis. Arus Pesisir Jawa Selatan dan Arus Ekuator Selatan) dan Arus Lintas Indonesia di Laut Indonesia. Lokasi tambatan ADCP di sepanjang ekuator ($80,5$ dan 90° E) dan di selatan Jawa ($106,75^\circ \text{ E}$, $8,5^\circ \text{ S}$) ditandai oleh bintang hijau, dan stasiun pasang surut di 5 lokasi di pusat Samudra Hindia dan sepanjang pantai Sumatera, Jawa dan Bali ditunjukkan oleh lingkaran merah.	66

Halaman

- Gambar 4.21** Data anomali permukaan laut harian diamati oleh stasiun pasang surut di tengah Samudra India dan di sepanjang pantai Sumatera, Jawa, dan Bali.....67
- Gambar 4.22** Korelasi dari anomali permukaan laut harian yang diamati antara dua pasang stasiun. Time-lag positif menunjukkan bahwa variabilitas di stasiun hulu (barat) merambat ke stasiun hilir (timur).68
- Gambar 4.23** Anomali bulanan konsentrasi klorofil-a dari data SeaWiFS (mg/m^3) di sepanjang pantai Selatan Jawa dan Sumatera untuk periode Juli hingga Desember 2006 (a – f). Kotak-kotak yang ditunjukkan pada (a) adalah wilayah di (A) Selat Bali, (B) Cilacap dan (C) dan Selat Sunda.69
- Gambar 4.24** Plot waktu anomali dari a) Klorofil-a konsentrasi (mg / m^3), b) suhu permukaan laut ($^{\circ}\text{C}$), c) tinggi permukaan laut (cm) dan d) angin (panah) ditumpangkan di atas kecepatan angin zona (ms^{-1}) ; diarsir) di sepanjang pantai selatan Jawa dan Sumatera selama Januari-Desember 2006. Lintasan bagian ditampilkan di panel bawah.....70
- Gambar 4.25** Keadaan lingkungan di wilayah ekuator Samudra Hindia bagian timur pada akhir 1997. (a) Lokasi Kepulauan Mentawai dan luasnya kematian karang tahun 1997 (naungan merah). (b) Peta anomali SST untuk November 1997, menunjukkan area *upwelling* air dingin. IGOSS (Integrated Global Ocean Services System) (c) TOMS (Total Ozone Mapping Spectrometer) citra satelit untuk tanggal 29 September 1997, menunjukkan perluasan asap api liar di Kepulauan Mentawai.....72
- Gambar 4.26** Anomali bulanan tekanan angin QuikSCAT (vektor, N/m^2) dan curah hujan TRMM (teduh, mm/hari) untuk (a) April, (b) Juli, (c) Oktober, dan (d) Desember 2006.74
- Gambar 4.27** Anomali SPL bulanan ($^{\circ}\text{C}$) dari (kiri) model dan (kanan) TRMM *Microwave Imager* untuk (a, b) Juli, (c, d) September, dan (e, f) Oktober 2006.75

Halaman

Gambar 4.28 (a) Arus Wyrтки selama tahun 2006. Arus zonal (diarsir) dan anomali arus zonal (kontur, pada interval 0,25 m/s) rata-rata lebih dari 1°LU – 1°LS untuk level model pertama (2,5 m) ditunjukkan. (b) Anomali bulanan dari permukaan laut altimeter (cm), (c) kedalaman termoklin (m), (d) konsentrasi klorofil SeaWiFS (mg / m^3), dan (e) salinitas (psu) untuk Oktober 2006. Kedalaman termoklin (ditentukan sebagai kedalaman isothermal 20°C) dan salinitas berasal dari model. Skala warna untuk konsentrasi klorofil tidak seragam.....76

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1.1. Penelitian yang telah dikaji	8
Tabel 3.1. Jadwal Pelaksanaan Penelitian	34
Tabel 3.3. Deskripsi data penelitian tahap II	39
Tabel 3.4. Deskripsi data penelitian tahap III	41

DAFTAR PERSAMAAN

	Halaman
2.1 Pergeseran Wien	21
2.2 Radiasi bahang.....	28
3.1 Klimatologi	28
3.2 Anomali	28
3.3 Fluks bahang.....	41
3.4 Neraca bahang.....	41

DAFTAR PUBLIKASI DAN SEMINAR

Published

1. **Utari, P.A., D. Setiabudidaya, M. Y. N. Khakim, I. Iskandar, (2018),**
“Response of near-surface currents in the Indian Ocean to the anomalous atmospheric condition in 2015”, IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 149, conference 1. (**Scopus Q3**)
2. **Utari, P.A., D. Setiabudidaya, M. Y. N. Khakim, I. Iskandar, (2018),**
“Dynamics of the South Java Coastal Current revealed by RAMA observing network”. Terrestrial, Atmospheric and Oceanic Sciences Journal. DOI: 10.3319/TAO.2018.12.14.01. (**Scopus Q3**)

Accepted

3. **Utari, P.A., D. Setiabudidaya, M. Y. N. Khakim, I. Iskandar, (2018),**
“Dynamics of 2015 Positive Indian Ocean Dipole”. Journal of Southern Hemisphere Earth Systems Sciences. (**Scopus Q3**)

Presenter

4. **Utari, P.A., D. Setiabudidaya, M. Y. N. Khakim, I. Iskandar, (2017),**
“Observed of Equatorial Currents in the Indian Ocean during Two Contrasting IOD Events: 2006 and 2010”. The 14th Annual Meeting Asia Oceania Geosciences Society (AOGS), 6-11 August 2017, Singapore.
5. **Utari, P.A., D. Setiabudidaya, M. Y. N. Khakim, I. Iskandar, (2018),**
“Response of near-surface currents in the Indian Ocean to the anomalous atmospheric condition in 2015”, The 4th International Symposium on LAPAN-IPB Satellite for Food Security and Environmental Monitoring, 9–11 Oktober 2017, Bogor, Indonesia.
6. **Utari, P.A., D. Setiabudidaya, M. Y. N. Khakim, I. Iskandar, (2018),**
“Subsurface IOD”. South China Sea Institute of Ocean
2018, Guangzhou, China.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Laut dan atmosfer merupakan komponen yang mempengaruhi iklim suatu wilayah dan berperan penting bagi kehidupan makhluk hidup. Perubahan komponen iklim memberikan dampak langsung maupun tidak langsung terhadap lingkungan. Perubahan komponen iklim juga menimbulkan dampak sosial, ekonomi, ekologi, lingkungan, dan terhadap keberlanjutan sumber daya alam (SDA) (Juniah *et al.*, 2018). Kematian terumbu karang di Mentawai pada tahun 1997 karena perubahan temperatur yang signifikan, yaitu sekitar -4°C (Abram *et al.*, 2003). Penurunan suhu permukaan laut (SPL) mempengaruhi pertumbuhan terumbu karang, merupakan dampak perubahan iklim terhadap lingkungan. Dampak yang ditimbulkan menunjukkan bahwa sirkulasi laut dan atmosfer di wilayah tropis Samudera India merupakan fenomena penting untuk dikaji dalam mengurangi pengaruh perubahan iklim.

Dinamika sirkulasi laut dan atmosfer di kawasan tropis Samudera India mulai mengalami perubahan yang signifikan sejak tahun 1960 (Timmermann *et al.*, 1998). Dampak perubahan iklim yang terjadi tidak terdistribusi secara merata ke seluruh bagian bumi lainnya. Akibat yang ditimbulkan berkaitan dengan perubahan distribusi sirkulasi laut dan atmosfer adalah suhu, volume air laut dan tinggi muka laut (Han *et al.*, 1999; Ajayamohan *et al.*, 2008). Indonesia merupakan wilayah yang mengalami dampak dari perubahan iklim (Yang, 2012). Perubahan suhu mengakibatkan semakin meluasnya bencana kekeringan di Nusa Tenggara (Supari, 2018). Dampak lain yang ditimbulkan juga ditunjukkan dengan kenaikan tinggi muka laut yang terjadi di wilayah Sumatera, Kalimantan dan Pulau Jawa (Saji *et al.*, 2003). Hoeg-gulderberg *et al.*, (2013) menyatakan bahwa kenaikan tinggi permukaan laut (TPL) merupakan bencana alam yang akan dihadapi Indonesia karena terjadi perubahan iklim.

Kondisi topografi Indonesia merupakan kawasan kepulauan yang diapit oleh dua samudera dan dua benua sehingga menjadi pusat aktivitas sirkulasi atmosfer dan sirkulasi laut global. Sistem sirkulasi Laut dan atmosfer yang mempengaruhi perubahan iklim yaitu Samudera Pasifik dengan fenomena ENSO

El-Niño Southern Oscillation (ENSO) dan Samudera India dengan fenomena IOD (*Indian Ocean Dipole*) (Netrananda Sahu, 2010) yang memberikan kontribusi besar terhadap perubahan iklim di Indonesia (Mankad *et al.*, 2014).

Fenomena IOD merupakan interaksi laut dan atmosfer dikawasan tropis Samudera India yang ditandai dengan perbedaan temperatur permukaan Samudera India bagian barat dan temperatur Samudera India bagian timur (Wang *et al.*, 2017). Fenomena IOD ditemukan oleh Saji dan Goswami pada tahun 1999 dengan menganalisis data observasi selama 40 tahun. Fenomena IOD merupakan penyimpangan iklim karena interaksi permukaan laut dan atmosfer di perairan Samudera India bagian barat ($10^{\circ}\text{LU}-10^{\circ}\text{LS}$; $60^{\circ}\text{BT}-80^{\circ}\text{BT}$) dan timur ($0^{\circ}-10^{\circ}\text{LS}$; $90^{\circ}\text{BT}-110^{\circ}\text{BT}$) (Saji *et al.*, 1999; Webster *et al.*, 1999; Murtugudde, McCreary dan Busalacchi, 2000). Fenomena IOD ditandai dengan anomali SPL di Samudera India diikuti oleh anomali angin dan tinggi muka laut (Murtugudde *et al.*, 2000). Beberapa proses yang berpotensi menimbulkan SPL meliputi perubahan pembentukan awan, penguapan, efek angin lokal, perubahan transport panas pada inter dan intra hemisfer. Efek variasi dari kehilangan panas bahang dari permukaan laut merupakan mekanisme yang penting dalam perubahan SPL (Carton *et al.*, 1996).

Anomali iklim yang disebabkan perbedaan SPL di kawasan Samudera India sudah banyak dikaji oleh para peneliti. Penelitian yang dilakukan oleh Saji (1999) menunjukkan variabilitas iklim tahunan berhubungan dengan fenomena IOD dimana anomali suhu permukaan laut diiringi dengan anomali angin dan hujan. Data angin permukaan, dan curah hujan diperlukan untuk menganalisis keberadaan fenomena IOD. Wilayah tropis di Samudera India pada tahun 1961 memiliki intensitas curah hujan tinggi, sementara di Indonesia mengalami kekeringan karena fenomena IOD. Angin permukaan, arus permukaan, arus perkedalaman, TPL, suhu perkedalaman, salinitas, fluks bahang dan variabel lainnya penting untuk dikaji karena berkaitan dengan Fenomena IOD. Suhu permukaan air laut (SPL) lebih tinggi di bagian barat Samudera India dan SPL dibagian timur Samudera India lebih rendah (Webster *et al.*, 1999).

Penelitian yang mengkaji variasi skala waktu musiman, tahunan dan antar musim dari arus Wyrтки masih belum banyak dikaji oleh para peneliti (Grotsky,

Carton dan Murtugudde, 2001; Nagura dan McPhaden, 2008; Chu, 2010). Penelitian yang dilakukan Yongliang *et al.*, (2014) mengkaji variasi antar musim dari arus Wyrтки terkait perubahan anomali angin pada tahun 2013. Arus permukaan ekuator di Samudera India umumnya berbalik arah empat kali dalam setahun (Han *et al.*, 1999; Schott dan McCreary, 2001). Arus Wyrтки yang kuat di arah timur karena tekanan angin baratan selama musim peralihan I dan musim peralihan II (O'brien dan Hurlburt, 1974; Schott dan McCreary, 2001).

Termodinamika laut merupakan kajian tentang perpindahan panas yang terjadi antara sistem dan lingkungan. Perpindahan panas yang terjadi karena angin (*thermohaline circulation*) menyebabkan massa air yang hangat dari daerah tropis bergeser ke daerah yang memiliki massa air lebih rendah. Peningkatan pemanasan Samudera India memiliki potensi melemahkan termal laut-darat, meredam sirkulasi musim panas dan mengurangi curah hujan di beberapa bagian Asia Selatan (Roxy *et al.*, 2015). Anomali salinitas berbanding lurus dengan anomali termal (Kido dan Tozuka, 2017), yang mempengaruhi evolusi SPL dalam mendorong sirkulasi termohalin melalui model lapisan campuran satu dimensi. Perpindahan kalor dan anomali salinitas berperan sangat penting dalam mengkaji termodinamika yang terjadi di Samudera India.

Penelitian yang telah dilakukan sebelumnya mengkaji dinamika dan termodinamika laut dan atmosfer secara terpisah. Penelitian sirkulasi laut dan atmosfer terkait kejadian IOD positif di tahun 2006 dan 2015 serta IOD negatif di tahun 2010 memiliki keunikan masing – masing untuk dikaji. Kemajuan ilmu pengetahuan, pengamatan dan komputerisasi memberikan pemahaman mendalam bagi masyarakat untuk memahami proses dan mekanisme sirkulasi terkait kejadian IOD melalui model iklim. Kejadian IOD positif pada tahun 2006 merupakan kejadian terbesar ketiga setelah tahun 1994 dan 1997 (Hori *et al.*, 2008). IOD positif tahun 2006 ditandai dengan penurunan SPL di wilayah timur berdasarkan nilai *Dipole Mode Index* (DMI) yang melebihi standar deviasinya ($>-2.5^{\circ}\text{C}$) tetapi, peningkatan SPL di wilayah barat hanya berkisar 0.5°C . Keunikan dari kejadian IOD positif tahun 2015 ditandai dengan peningkatan SPL di wilayah barat Samudera India 1.5°C . Kejadian IOD negatif pada tahun 2010 mengindikasikan variasi musiman yang terjadi selama bulan Agustus – Desember.

Variasi antar musiman dipengaruhi angin barat yang mendominasi di sepanjang ekuator sejak akhir bulan Juni hingga Desember 2010. Angin barat menyebabkan kawasan Samudera India bagian timur mengalami gelombang Kelvin *downwelling* (TPL positif) dan arus zonal ke arah timur. Penelitian sirkulasi laut dan atmosfer yang berkaitan dengan kejadian IOD di tahun 2006, 2010 dan 2015 penting untuk dikaji secara menyeluruh baik dari segi dinamika dan termodinamika. Fenomena IOD yang terbentuk dari sirkulasi laut dan atmosfer memberikan informasi tentang parameter fisik di laut dan atmosfer seperti angin, suhu, tinggi muka laut yang mempengaruhi variasi iklim di Indonesia. Perubahan pola variasi iklim yang dipengaruhi fenomena IOD dikaji dengan perhitungan klimatologi, anomali, dan kesetimbangan bahang yang bermanfaat bagi pengambil kebijakan dalam menghadapi perubahan iklim di Indonesia.

1.2 Perumusan Masalah

Fenomena IOD memiliki pengaruh terhadap perubahan pola iklim yang terjadi khususnya di kawasan Samudera India (Saji *et al.*, 1999 dan Cahyani, 2013). Pengkajian lebih lanjut perlu dilakukan di kawasan Samudera India dikarenakan terjadinya penurunan suhu permukaan laut di pantai barat Sumatera setelah El Nino melemah (Iizuka, Matsuura and Yamagata, 2000). Perbedaan SPL di antara perairan barat Samudera India dan perairan timur Samudera India disebabkan oleh pengaruh fenomena IOD.

Hasil penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa fenomena IOD biasa terjadi sebanyak dua periode dalam setahun yakni pada musim peralihan I (April – Mei) dan peralihan II (September – Oktober). Puncak dari fenomena IOD terjadi pada bulan Oktober dan berakhir sekitar November dan Desember. Periode IOD Positif terjadi setiap 4-5 tahun sekali sedangkan IOD negatif terjadi setiap 3 – 7 tahun sekali. Fenomena IOD mempengaruhi siklus musim hujan dan musim kemarau di Indonesia yang ditunjukkan dengan perpanjangan musim hujan dengan *westerly winds* yang mengandung banyak uap air atau perpanjangan musim kemarau dengan arah angin terbalik dari arah timur yang tidak mengandung uap air sekitar Oktober. Berdasarkan informasi tersebut ada beberapa permasalahan yang

perlu dikaji terkait dampak yang ditimbulkan oleh fenomena IOD. Permasalahan-permasalahan yang akan dikaji dalam penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana karakteristik arus ekuator Samudera India pada saat fenomena IOD yang berbeda khususnya IOD positif 2006 dan IOD negatif tahun 2010?
2. Bagaimana kesetimbangan bahang (*heat balance*) di wilayah tropis Samudera India pada saat kejadian IOD positif di bawah pengaruh *El Niño* yang kuat?
3. Bagaimana dinamika arus di wilayah pantai Selatan Jawa dan hubungannya dengan pembangkit angin di wilayah ekuator Samudera India?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan utama penelitian ini untuk melakukan kajian dinamika dan termodinamika sirkulasi laut dan atmosfer di wilayah tropis Samudera India pada skala antar-tahunan (*interannual timescale*). Secara khusus, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Mengkaji karakteristik arus ekuator Samudera India pada saat fenomena IOD yang berbeda, yaitu IOD positif tahun 2006 dan IOD negatif tahun 2010.
2. Melakukan analisis kesetimbangan bahang (*heat balance*) di wilayah tropis Samudera India pada saat kejadian IOD positif dengan memanfaatkan data ARGO *Floats* dan RAMA buoys yang dikombinasikan dengan data satelit
3. Melakukan kajian arus di wilayah pantai Selatan Jawa dan hubungannya dengan pembangkit angin di wilayah ekuator Samudera India.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dari kajian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi di bidang lingkungan yang terkait dengan fenomena IOD. Pola dinamika dan termodinamika sirkulasi laut dan atmosfer dapat menjadi masukan dan bahan studi lanjutan bagi pengambil kebijakan dan perguruan tinggi dalam mengambil langkah adaptasi dan mitigasi terhadap lingkungan pesisir pantai yang dipengaruhi fenomena IOD yang diuraikan dalam dua aspek sebagai berikut:

1.4.1 Ilmu Pengetahuan

Penelitian ini akan memberikan kontribusi mendasar pada pemahaman dinamika arus dan kesetimbangan bahang di ekuator Samudera Indian, khususnya

pada kejadian IOD positif dan IOD negatif. Pemahaman ini akan meningkatkan pengetahuan tentang prediksi anomali iklim yang berasal Samudera India khususnya dalam memvisualisasikannya kedalam pemrograman. Pemrograman yang digunakan dalam memodelkan sirkulasi laut – atmosfer memberikan kemudahan bagi peneliti – peneliti untuk memahami sirkulasi tersebut. Hasil temuan tersebut akan memiliki potensi dipublikasikan dalam jurnal internasional bereputasi (terindeks *Scopus/Thomson Reuters-ISI*).

1.4.2 Kebijakan Adaptasi dan Mitigasi Perubahan Iklim

Fenomena anomali iklim yang berasal dari Samudera India (IOD) memiliki dampak yang signifikan terhadap pola distribusi curah hujan di daratan yang mengelilinginya. Oleh karena itu, kemampuan memahami hubungan antara indikator-indikator anomali iklim di Samudera India dan dinamika oseanografi fisis yang menjadi dasar akan memberikan sumbangan yang cukup besar dalam upaya mitigasi dan adaptasi dampak perubahan iklim. Hasil kajian ilmiah ini akan memberikan informasi penting bagi pengambil kebijakan dan keputusan untuk efisiensi program mitigasi dan adaptasi terhadap perubahan iklim dalam kerangka adaptasi terhadap pemanasan global.

1.5 Kebaruan Penelitian

Penelitian tentang interaksi antara laut dan atmosfer telah banyak dilakukan oleh para peneliti terdahulu yang ditampilkan pada Tabel 1.1. Penelitian terdahulu fokus pada dinamika laut, dinamika atmosfer dan termodinamika laut dan atmosfer secara terpisah. Oleh karena itu, pada penelitian melakukan kajian mengenai laut dan atmosfer secara menyeluruh baik dari segi dinamika dan termodinamika. Penelitian ini akan mengkaji sirkulasi laut dan atmosfer di kawasan tropis Samudera India yang akan dikaitkan dengan fenomena IOD. Data parameter fisis di laut dan atmosfer seperti angin, suhu, tinggi muka laut dapat dilihat evolusi dan dampak dari fenomena IOD yang mempengaruhi variasi iklim di Indonesia. Evolusi dari fenomena IOD ini akan dikaji melalui perhitungan klimatologi, anomali, dan kesetimbangan bahang bagi para pengambil kebijakan dalam menghadapi perubahan iklim di Indonesia.

Penelitian terdahulu sudah melakukan kajian laut – atmosfer secara terpisah di kawasan tropis Samudera India terkait kejadian IOD. Namun, penelitian yang terkait kejadian IOD belum banyak dikaji secara menyeluruh melainkan hanya pada pola dinamika laut atau dinamika atmosfer saja. Penggabungan dinamika laut – atmosfer mampu menghasilkan gambaran jelas terkait dengan evolusi kejadian IOD yang menjadi nilai kebaruan dari penelitian disertasi ini, yakni:

- a. Ditemukan karakteristik arus perkedalaman yang berkaitan dengan IOD positif pada tahun 2006 dan IOD negatif pada tahun 2010.
- b. Ditemukan karakteristik kesetimbangan bahang di wilayah tropis Samudera India pada saat kejadian IOD positif di bawah pengaruh *El Niño* yang kuat di Samudera Pasifik
- c. Ditemukan karakteristik arus pantai Selatan Jawa yang untuk pertama kali dilakukan observasi menggunakan peralatan *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP).