

PEMODELAN INTERAKSI LAUT-ATMOSFER DAN PROSES MIKROMETEOROLOGI DI SELAT SUNDA SERTA IMPLIKASINYA TERHADAP DINAMIKA ARUS REGIONAL

EKO SUPRIYADI



PROGRAM STUDI KLIMATOLOGI TERAPAN
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PERNYATAAN MENGENAI DISERTASI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa disertasi dengan judul “Pemodelan Interaksi Laut-Atmosfer dan Proses Mikrometeorologi di Selat Sunda serta Implikasinya terhadap Dinamika Arus Regional” adalah karya saya dengan arahan dari dosen pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir disertasi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, Juli 2026

Eko Supriyadi

G2601232010



RINGKASAN

EKO SUPRIYADI. Pemodelan Interaksi Laut-Atmosfer dan Proses Mikrometeorologi di Selat Sunda serta Implikasinya terhadap Dinamika Arus Regional. Dibimbing oleh TANIA JUNE, AGUS SALEH ATMADIPOERA, dan ANDRI RAMDHANI.

Selat Sunda merupakan perairan strategis yang menghubungkan Laut Jawa dengan Samudera Hindia, menjadikannya bagian penting dari sistem iklim regional dan global. Dinamika di wilayah ini sangat kompleks akibat interaksi laut-atmosfer yang dipengaruhi oleh fenomena seperti *Indian Ocean Dipole* (IOD), sistem monsun, serta arus laut utama yaitu *South Java Current* (SJC) dan *Sunda Shelf Throughflow* (SSTF). Berdasarkan kompleksitas tersebut, disertasi ini merumuskan empat (4) pertanyaan penelitian: (1) Bagaimana peran interaksi dinamis atmosfer-lautan di Selat Sunda?; (2) Bagaimana model kopling arus-gelombang beresolusi tinggi menjelaskan interaksi timbal baliknya?; (3) Bagaimana peran flux momentum terhadap flux energi memengaruhi *skin* SST?; dan (4) Bagaimana karakteristik dinamika arus SJC dan SSTF?

Untuk menjawab pertanyaan tersebut, penelitian ini menggunakan pemodelan numerik terkopel beresolusi tinggi (spasial 1 km, temporal 1 jam) dengan sistem *Coupled Ocean Atmosphere Wave Sediment Transport* (COAWST). Sistem ini mengintegrasikan model arus *Regional Ocean Model Systems* (ROMS) dan model gelombang *Simulating Wave Nearshore* (SWAN). Data pemaksaan meliputi HYCOM untuk kondisi laut, ERA5 untuk atmosfer, batimetri dari *Badan Informasi Geospasial* (BIG), dan data pasang surut TPXO9. Validasi model dilakukan menggunakan data *High Frequency Radar* (HFR) dan satelit altimetri. Untuk kajian interaksi laut-atmosfer, parameter luaran model diekstraksi untuk menghitung lapisan *cool skin* (ΔT_c) dan *warm layer* (ΔT_w). Metode regresi *least square* digunakan untuk membangun skema koreksi empiris guna mengubah *bulk* SST menjadi estimasi *skin* SST yang akurat. Sementara itu, untuk analisis dinamika arus, komponen arus ditransformasikan menjadi *Along-Strait Current* (ASC) dan *Cross-Strait Current* (CSC) guna menghitung *Volume Transport* (VT). Analisis variabilitas musiman dan koherensi antara SJC dan SSTF dikaji menggunakan analisis spektral *Continuous Wavelet Transform* (CWT) dan *Cross Power Spectral Density* (CPSD). Penjalaran Gelombang Kelvin pesisir dideteksi menggunakan diagram Hovmöller dari data *Sea Level Anomaly* (SLA) yang telah disaring dengan *Low Pass Filter* (LPF).

Penelitian tahap pertama berfokus pada pengaruh fenomena iklim global seperti IOD, ITCZ, dan Monsun terhadap Selat Sunda. Dengan menggunakan analisis statistik deskriptif terhadap data observasi dan *re*-analisis (CMEMS, OISST, CMAP, dan NCEP), penelitian ini menemukan bahwa Selat Sunda merespons kuat kejadian IOD positif, seperti pada Oktober 2023 yang ditandai pendinginan SST ($-2,28^\circ\text{C}$) dan defisit curah hujan ($-5,60$ mm/hari). Temuan baru menunjukkan bahwa Selat Sunda bukan zona pasif, melainkan zona transisi dengan rezim iklimnya

sendiri yang lebih basah sepanjang tahun karena pengaruh orografis lokal, serta memiliki fluktuasi angin musiman yang ekstrem dibandingkan perairan sekitarnya.

Penelitian tahap kedua mengkaji mekanika fisis interaksi arus-gelombang di Selat Sunda menggunakan model COAWST. Hasil simulasi menunjukkan variabilitas spasial kuat dalam keseimbangan momentum. Di Samudera Hindia (perairan-dalam), dinamika didominasi oleh gaya pusaran (*vortex force*), sementara di perairan transisi Selat Sunda, dinamika didominasi oleh gradien tekanan dan gaya Coriolis. Kebaruan riset ini adalah bukti kuantitatif bahwa interaksi kopel arus-gelombang mampu mereduksi energi gelombang rata-rata hingga 8,44 J/m²/Hz/deg. Ditemukan pula bahwa gradien tekanan terbesar dipicu oleh mekanisme *wave set-up* dan *set-down*.

Penelitian tahap ketiga mengestimasi *skin* SST yang presisi, parameter krusial dalam keseimbangan fluks energi laut-atmosfer. Dengan menghitung *cool skin* dan *warm layer* dari luaran model, ditemukan bahwa *cool skin* memberikan kontribusi pendinginan persisten rata-rata -0,2°C dengan ketebalan lapisan ~55µm. Parameter gabungan (*skin-bulk*) menunjukkan ketergantungan non-linear yang kuat terhadap kecepatan angin. Temuan baru dalam studi ini adalah formulasi skema koreksi empiris baru untuk *skin* SST yang spesifik berlaku di perairan tropis Indonesia. Skema ini menghasilkan korelasi tinggi (hingga 0,88 di Laut Jawa) dan mampu menghilangkan bias *bulk* SST terhadap *skin* SST secara hampir sempurna, sehingga meningkatkan akurasi estimasi fluks energi.

Terakhir, penelitian tahap keempat menganalisis interaksi dua sistem arus utama di Selat Sunda, SJC dan SSTF. Analisis menunjukkan bahwa secara rata-rata tahunan, sirkulasi Selat Sunda didominasi oleh transpor *netto* massa air yang mengarah ke Samudera Hindia dengan nilai VT ASC sebesar -0,48 Sv. Kebaruan studi ini adalah pembuktian adanya interaksi yang koheren antara SJC dan SSTF pada periode semidiurnal (12,41 jam), di mana fase SJC mendahului SSTF sekitar 2,96 jam. Selain itu, terdeteksi rambatan Gelombang Kelvin pesisir mode baroklinik kedua (kecepatan fase 1,13–1,67 m/s) yang berasal dari Samudera Hindia ekuator dan berperan dalam memodulasi kekuatan sirkulasi SJC lokal.

Secara keseluruhan, disertasi ini menyajikan sintesis komprehensif tentang interaksi fisika atmosfer dan lautan di Selat Sunda. Analisis ini dibangun secara runut mulai dari (1) pengungkapan sensitivitas iklim regional terhadap anomali skala cekungan (IOD), (2) pembuktian mekanika modulasi perpindahan momentum melalui kopling arus-gelombang resolusi tinggi, (3) penemuan skema koreksi empiris baru untuk menghitung pertukaran fluks energi panas secara presisi di antarmuka laut-atmosfer, hingga (4) pemahaman mendalam tentang sirkulasi massa air tiga dimensi dan interaksi koheren sistem arus yang dimodulasi oleh penjalaran gelombang ekuator jarak jauh.

Kata kunci: neraca energi, *skin sst*, *south java current*, *sunda shelf throughflow*, propagation gelombang Kelvin.



SUMMARY

EKO SUPRIYADI. Modelling of Air-Sea Interactions and Micrometeorological Processes in the Sunda Strait and their Implications for Regional Current Dynamics. Supervised by TANIA JUNE, AGUS SALEH ATMADIPOERA, and ANDRI RAMDHANI.

The Sunda Strait is a strategically vital marine connecting the Java Sea with the Indian Ocean, establishing it as a key component of regional and global climate systems. Its dynamics are exceptionally complex, driven by ocean-atmosphere interactions influenced by phenomena such as the Indian Ocean Dipole (IOD), the monsoon system, and major currents including the South Java Current (SJC) and the Sunda Shelf Throughflow (SSTF). Given this complexity, this dissertation formulates four (4) principal research questions: (1) What is the role of dynamic atmosphere-ocean interactions in the Sunda Strait?; (2) How can a high-resolution coupled current-wave model elucidate their bidirectional interactions?; (3) What is the role of momentum flux in influencing energy fluxes that affect the skin SST?; and (4) What are the dynamic characteristics of the SJC and SSTF currents?

To address these questions, this research employs high-resolution (1 km spatial, 1-hour temporal) coupled numerical modeling using the Coupled Ocean-Atmosphere-Wave-Sediment Transport (COAWST) system. This system integrates the Regional Ocean Modeling System (ROMS) for currents and Simulating Waves Nearshore (SWAN) for waves. Forcing data include HYCOM for ocean initial and boundary conditions, ERA5 for atmospheric forcing, bathymetry from the Geospatial Information Agency (BIG), and TPXO9 tidal constituents. Model validation is conducted using High-Frequency Radar (HFR) and satellite altimetry data. For the air-sea interaction study, model output parameters are extracted to compute the cool skin (ΔT_c) and warm layer (ΔT_w). Least squares fit regression method is subsequently applied to develop an empirical correction scheme to accurately convert bulk SST into estimated skin SST. Concurrently, for current dynamics analysis, current components are transformed into Along-Strait Current (ASC) and Cross-Strait Current (CSC) to compute Volume Transport (VT). Seasonal variability and coherence between the SJC and SSTF are investigated using spectral analyses, namely Continuous Wavelet Transform (CWT) and Cross Power Spectral Density (CPSD). Coastal Kelvin wave propagation is detected using Hovmöller diagrams of Sea Level Anomaly (SLA) data filtered with a Low-Pass Filter (LPF).

The first phase of the research focuses on the influence of global climate phenomena, such as the IOD, ITCZ, and Monsoon, on the Sunda Strait. Employing descriptive statistical analysis of observational and reanalysis datasets (CMEMS, OISST, CMAP, and NCEP), this study finds that the Sunda Strait responds strongly to positive IOD events, exemplified by the October 2023 event characterized by SST cooling ($-2,28^\circ\text{C}$) and rainfall deficit ($-5,60 \text{ mm/day}$). A novel finding reveals that the Sunda Strait is not a passive zone, but rather a transitional zone with its own



distinct climatic regime, being perennially wetter due to local orographic influences and exhibiting extreme seasonal wind fluctuations compared to surrounding waters.

The second phase investigates the physical mechanics of current-wave interaction in the Sunda Strait using the COAWST model. Simulation results reveal strong spatial variability in the momentum balance. In the deep-water Indian Ocean, dynamics are dominated by vortex forces, whereas in the transitional waters of the Sunda Strait, dynamics are dominated by pressure gradients and the Coriolis force. The novelty of this research lies in the quantitative evidence that coupled current-wave interaction can reduce mean wave energy by up to 8,44 J/m²/Hz/deg. It is also found that the largest pressure gradient contribution is driven by wave set-up and set-down mechanisms.

The third phase aims to estimate precise skin SST, a crucial parameter in the air-sea energy flux balance. By computing the cool skin and warm layer from model output, it is found that the cool skin provides a persistent average cooling contribution of -0,2°C over a layer thickness of ~55µm. The combined (skin-bulk) parameter exhibits a strong non-linear dependence on wind speed. A novel contribution of this study is the formulation of a new empirical correction scheme for skin SST specifically applicable to Indonesian tropical waters. This scheme yields high correlation coefficients (up to 0,88 in the Java Sea) and successfully eliminates almost all bias between bulk SST and estimated skin SST, thereby enhancing the accuracy of energy flux estimates.

Finally, the fourth phase analyzes the interaction of the two major current systems in the Sunda Strait, the SJC and SSTF. The analysis reveals that, on an annual average, the strait's circulation is dominated by a net volume transport directed towards the Indian Ocean, with an ASC VT value of -0,48 Sv. The novelty of this study is the demonstration of coherent interaction between the SJC and SSTF precisely at the semidiurnal tidal period (12,41 hours), where the SJC phase leads the SSTF by approximately 2,96 hours. Furthermore, it detects the propagation of coastal Kelvin waves corresponding to the second baroclinic mode (with phase speeds of 1,13–1,67 m/s), originating from the equatorial Indian Ocean and playing a significant role in modulating the strength of the local SJC circulation.

In conclusion, this dissertation presents a comprehensive synthesis of the physical atmosphere-ocean interactions in the Sunda Strait. This analysis is constructed sequentially, encompassing: (1) revealing the region's climate sensitivity to basin-scale anomalies (IOD); (2) demonstrating the mechanics of momentum modulation through high-resolution current-wave coupling; (3) presenting a novel empirical correction scheme for accurately calculating heat energy flux exchange at the air-sea interface; and (4) providing an in-depth understanding of the three-dimensional water mass circulation and the coherent interaction of current systems modulated by remote equatorial wave propagation.

Keywords: balance energy, skin SST, south java current, sunda shelf throughflow, Kelvin wave propagation.



Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

© Hak Cipta milik IPB, tahun 2026
Hak Cipta dilindungi Undang-Undang

Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan atau menyebutkan sumbernya. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik, atau tinjauan suatu masalah, dan pengutipan tersebut tidak merugikan kepentingan IPB.

Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apa pun tanpa izin IPB.

PEMODELAN INTERAKSI LAUT-ATMOSFER DAN PROSES MIKROMETEOROLOGI DI SELAT SUNDA SERTA IMPLIKASINYA TERHADAP DINAMIKA ARUS REGIONAL

EKO SUPRIYADI

Disertasi
sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Doktor pada
Program Studi Klimatologi Terapan

**PROGRAM STUDI KLIMATOLOGI TERAPAN
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2026**



@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang

1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
 - a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
 - b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Penguji Luar Komisi Pembimbing pada Ujian Tertutup Disertasi:

- 1 Prof. Dr. Indra Jaya, M.Sc. (Departemen ITK, FPIK IPB University)
- 2 Dr. Dwiyoga Nugroho, S.T., M.T. (Pusat Riset Oseanografi, BRIN)

Promotor Luar Komisi Pembimbing pada Sidang Promosi Terbuka Disertasi:

- 1 Dr. Akhmad Faqih, S.Si (Wakil Dekan FMIPA IPB University)
- 2 Dr. Tri Handoko Seto, S.Si. M.Sc (Deputi Bidang Modifikasi Cuaca, BMKG)

Judul Disertasi : Pemodelan Interaksi Laut-Atmosfer dan Proses
Mikrometeorologi di Selat Sunda serta Implikasinya
terhadap Dinamika Arus Regional

Nama : Eko Supriyadi
NIM : G2601232010

Disetujui oleh

Pembimbing 1:
Prof. Dr. Ir. Tania June, M.Sc.



Pembimbing 2:
Prof. Dr. Ir. Agus Saleh Atmadipoera, D.E.S.S.



Pembimbing 3:
Dr. Andri Ramdhani

A handwritten signature in blue ink, reading "Ramdhani", written over a horizontal line.

Diketahui oleh

Ketua Program Studi:
Prof. Dr. Ir. Tania June, M.Sc.
NIP. 196306281988032001



Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu
Pengetahuan Alam
Dr. Berry Juliandi, S.Si., M.Si.
NIP. 197807232007011001



Tanggal Ujian Tertutup : 26 Mei 2026
Tanggal Sidang Promosi : 29 Juni 2026

Tanggal Lulus :

Hak cipta milik IPB University

IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.



PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah *subhanaahu wa ta'ala* atas segala karunia-Nya sehingga karya ilmiah ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam penelitian yang dilaksanakan sejak Februari 2024 sampai September 2025 ini ialah interaksi atmosfer dan lautan dengan judul “Pemodelan Interaksi Laut-Atmosfer dan Proses Mikrometeorologi di Selat Sunda serta Implikasinya terhadap Dinamika Arus Regional”.

Terima kasih penulis ucapkan kepada para pembimbing, Prof. Dr. Ir. Tania June, M.Sc; Prof. Dr. Ir. Agus Saleh Atmadipoera, D.E.S.S; dan Dr. Andri Ramdhani yang telah membimbing dan banyak memberi saran. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada penguji luar komisi pembimbing dalam ujian kualifikasi lisan Prof. Dr. Ing. Widodo Setiyo Pranowo, S.T., M.Si dan Dr. Eng. Aditya Rakhmat Kartadikaria, S.Si., M.Eng, Penguji luar komisi pembimbing pada sidang tertutup Prof. Dr. Indra Jaya, M.Sc. serta Dr. Dwiyo Nugroho, S.T, M.T. serta penguji luar pada sidang promosi doktoral Dr. Akhmad Faqih, S.Si dan Dr. Tri Handoko Seto, S.Si, M.Sc. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Program Studi Klimatologi Terapan, IPB University yang telah memberikan kesempatan menempuh pendidikan secara paripurna dari S1 hingga S3. Tidak lupa kami ucapkan terimakasih kepada Randi Firdaus (*Tohoku University*) yang membantu penulis memberikan akses referensi terbaru terkait tema riset. Pusat Pendidikan dan Pelatihan BMKG yang telah memberikan kesempatan beasiswa doktoral dalam skema Tugas Belajar. Pusat Meteorologi Maritim BMKG yang telah memberikan kesempatan riset. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada Ayah, Ibu, Istri, dan anak-anakku (Lukman, Maryam, dan Fatimah) yang telah memberikan dukungan, doa, dan kasih sayangnya hingga dapat menyelesaikan studi doktoral.

Semoga karya ilmiah ini bermanfaat bagi pihak yang membutuhkan dan bagi kemajuan ilmu pengetahuan.

Bogor, Juli 2026

Eko Supriyadi

DAFTAR ISI

DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR GAMBAR	xiii
I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan	5
1.4 Manfaat	5
1.5 Kerangka Pemikiran	6
1.6 Kebaruan (<i>Novelty</i>)	7
II TINJAUAN PUSTAKA	10
2.1 Persamaan gerak model ROMS	10
2.2 Persamaan gerak model SWAN	11
2.3 Interaksi arus dan gelombang	12
2.4 Topografi Selat Sunda	14
2.5 <i>Skin SST</i>	15
2.6 <i>South Java Current (SJC)</i> dan <i>Sunda Shelf Throughflow (SSTF)</i>	16
III METODE	18
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian	18
3.2 Alat dan Bahan	18
3.3 Prosedur Kerja	18
IV KLIMATOLOGI DAN OSEANOGRAFI SAMUDERA HINDIA TROPIS	
BAGIAN TENGGARA: STUDI KASUS SELAT SUNDA	23
4.1 Pendahuluan	23
4.2 Metode	25
4.3 Hasil dan Pembahasan	29
4.4 Simpulan dan Saran	50
V INTERAKSI ARUS DAN GELOMBANG DI SELAT SUNDA DAN PERAIRAN SEKITARNYA	51
5.1 Pendahuluan	51
5.2 Metode	54
5.3 Hasil dan Pembahasan	63
5.4 Simpulan dan Saran	84
VI. PEMODELAN <i>COOL SKIN</i> DAN <i>WARM LAYER</i> DI SELAT SUNDA	85
6.1 Pendahuluan	85
6.2 Metode	87
6.3 Hasil dan Pembahasan	91
6.4 Simpulan dan Saran	110
VII. INTERAKSI DINAMIKA <i>SOUTH JAVA CURRENT (SJC)</i> DAN <i>SUNDA SHELF THROUGHFLOW (SSTF)</i> DI SELAT SUNDA	111
7.1 Pendahuluan	111
7.2 Metode	113
7.3 Hasil dan Pembahasan	116
7.4 Simpulan dan Saran	132



VIII. PEMBAHASAN UMUM	133
8.1 Kondisi klimatologi dan oseanografi di Selat Sunda	133
8.2 Variabilitas spasial mekanisme interaksi arus-gelombang di Selat Sunda	134
8.3 Pengembangan parameterisasi empiris <i>skin</i> SST dan implikasinya terhadap fluks momentum serta energi dalam kaitannya terhadap interaksi arus-gelombang di Selat Sunda	136
8.4 Sintesis hidrodinamika Selat Sunda: Integrasi transpor volume, koherensi spektral, dan perambatan gelombang pesisir	139
8.5 Kontribusi penelitian terhadap perkembangan pemodelan laut dan operasional meteorologi maritim	142
IX. SIMPULAN DAN SARAN	144
9.1 Simpulan	144
9.2 Saran	145
DAFTAR PUSTAKA	146
LAMPIRAN	165
RIWAYAT HIDUP	181

DAFTAR TABEL

1	Cakupan global studi area	27
2	Parameter, periode dan sumber data yang digunakan dalam studi bab ini	27
3	Analisis statistika anomali SST WIOD dan EIOD periode Oktober 2023, serta klimatologi SST Selat Sunda periode 2016-2024.	33
4	Analisis statistika anomali curah hujan WIOD dan EIOD periode Oktober 2023, serta klimatologi curah hujan Selat Sunda periode 2016-2024.	33
5	Statistika deskriptif curah hujan area WIOD, EIOD, dan Selat Sunda menggunakan data CMAP periode 1979-2025 (Xie dan Arkin 1997).	37
6	Statistika deskriptif komponen u dan v angin permukaan area WIOD, EIOD, dan Selat Sunda menggunakan data NCEP periode 1979-2025.	40
7	Statistika deskriptif u dan v arus pada area WIOD, EIOD, dan Selat Sunda menggunakan data CMEMS periode 2022-2024.	44
8	Perbandingan statistika SWH dua skenario pada 4 altimeter	67
9	Selisih (Δ) skenario SSS dan KRS berdasarkan Gambar 25 dan 26	80
10	Model hubungan ΔT_c (y) sebagai U_{10} (x) pada 3 lokasi pada kondisi malam dan siang hari dan penilaian statistiknya. Tabel latar abu-abu menunjukkan r tertinggi.	98
11	Hubungan empiris ΔT_{cw} terhadap U_{10} malam dan siang hari di Selat Sunda	102
12	Data parameter atmosfer dan lautan yang digunakan dalam kopling ROMS dan SWAN	114
13	Penilaian statistika komponen ASC dan CSC HF Radar terhadap model kopling	118
14	Rataan komponen ASC dan CSC pada lokasi A1, A2, dan A3 seluruh kedalaman	123
15	Kecepatan peristiwa gelombang Kelvin yang memasuki A1 periode 2023 pada anomali positif (light gray) dan anomali negatif (bold gray)	129
16	Anomali positif dan negatif ASC lokasi A1. Waktu dalam UTC	130
17	Karakteristik interaksi arus-gelombang di Selat Sunda dan sekitarnya	135
18	Karakteristik pemodelan skin SST di Selat Sunda dan sekitarnya	137

DAFTAR GAMBAR

1	Sistematika kerangka pemikiran penelitian	7
2	Lingkup regional riset penelitian. (a) Perairan barat Indonesia sebagian di antaranya masuk sebagai area Eastern Indian Ocean Dipole (EIOD; kotak putus-putus) dengan area studi di Selat Sunda (kotak solid). (b) Selat Sunda sebagai penghubung Laut Jawa dan Samudera Hindia dalam domain rotasi sebesar 30° . (c) Cakupan	

global sistem iklim tropis pada Indo-Pasific (dibedakan oleh kotak berwarna) termasuk area Western Indian Ocean Dipole (WIOD). Domain Selat Sunda tersaji dalam kotak hitam berotasi. 26

- 3 Rataan bulanan parameter oseanografi yang dinyatakan dalam arus permukaan laut (a), SST (b), SSS (c), dan SSH (d). Rataan bulanan parameter atmosfer yang dinyatakan dalam kecepatan angin permukaan (e), Suhu udara (f), MSLP (g), dan curah Hujan (h). Rataan bulanan komponen radiasi sebagai flux net shortwave (i), flux net longwave (j), flux net sensible heat (k), dan flux net latent heat (l). Data olah menggunakan CMEMS (Ardhuin *et al.* 2010) periode 2006-2021 pada domain Selat Sunda (Gambar 2b). Bayangan kontur abu-abu menyatakan nilai 1 x standar deviasi dari rata-rata. 30
- 4 Representasi IPWP (kontur merah) dalam parameter SST menggunakan data OISST (Huang *et al.* 2021) periode 2020-2024 dengan kontur garis hitam pada nilai 28 °C (Deckker 2016) (a). Standar deviasi anomali SST (kontur biru) periode sama dengan kontur garis hitam pada nilai 1 °C. Selat Sunda ditandai dengan kotak kuning (b). 31
- 5 (a) Indeks IOD (Sumber: Australian Bureau of Meteorology, <http://www.bom.gov.au/climate/enso/indices.shtml>) dengan warna latar menyatakan kejadian El nino (merah), La nina (biru) dan tahun normal (putih) (Sumber: National Oceanic and Atmospheric Administration, <https://psl.noaa.gov/enso/mei/>). Positif IOD dan ekstrem positif IOD masing-masing ditandai dengan 1,5 σ (garis biru putus-putus) dan 3 σ (garis merah putus-putus). (b) Anomali SST pada kejadian ekstrem positif IOD (15-22 Oktober 2023) menggunakan data OISST periode 2016-2024 (Huang *et al.* 2021). (c) Anomali curah hujan pada kejadian ekstrem positif IOD (15 sampai 22 Oktober 2023) menggunakan data CMAP periode 2016-2024 (Xie dan Arkin 1997). Kotak putus-putus pada (b) dan (c) merupakan sektor barat dan timur IOD di Samudera Hindia. 32
- 6 Intertropical Convergence Zone (ITCZ) atau sabuk hujan tropis yang melintasi sepanjang equator bumi pada periode DJF (a, b) dan JJA (c, d). Kondisi ITCZ pada Perairan Indonesia periode DJF (b) dan JJA (d). Kontur kuning menyajikan nilai presipitasi 10 mm/hari. Domain rotasi putih menunjukkan area studi Selat Sunda. Data dari CMAP periode 1979-2025 (Xie dan Arkin 1997). 35
- 7 Boxplot curah hujan area WIOD, EIOD, dan Selat Sunda setiap musim menggunakan data CMAP periode 1979-2025 (Xie dan Arkin 1997). Garis putus-putus dan solid dalam kotak menyatakan mean dan median. Titik menyatakan data curah hujan dengan titik abu-abu menyatakan outliers. 36
- 8 Sistem Monsun Perairan Indonesia periode DJF (a) dan JJA (b) yang disajikan dengan vektor angin. Kontur arsir kebiruan menunjukkan intensitas rata-rata hujan dengan kontur kuning pada nilai 10 mm/hari.

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.

2. Dilarang mengumunkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

- Domain rotasi putih menunjukkan area studi Selat Sunda. Data vektor angin diakses melalui https://psl.noaa.gov/thredds/ncss/grid/Datasets/ncep.reanalysis2/Dailies/gaussian_grid/vwnd.10m.gauss.2010.nc/dataset.html (Kanamitsu *et al* 2002), sedangkan data hujan diakses melalui <https://psl.noaa.gov/thredds/ncss/grid/Datasets/cmap/enh/precip.mon.mean.nc/dataset.html> (Xie dan Arkin 1997). Kedua data menggunakan periode 1979-2025. 38
- 9 Boxplot komponen u dan v angin pada area WIOD, EIOD, dan Selat Sunda setiap musim menggunakan data NCEP periode 1979-2025 (Kanamitsu *et al.* 2002). 39
- 10 Sistem arus permukaan Samudera Hindia dan sekitarnya periode DJF (a) dan JJA (b) periode 2022-2024, Semakin panjang vector kecepatan arus semakin besar. Domain rotasi hitam menunjukkan area studi Selat Sunda, Data arus diakses melalui https://data.marine.copernicus.eu/product/GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024/download?dataset=cmems_mod_glo_phy_cur_anfc_0.083deg_P1M-m_202406 (E.U. Copernicus Marine Service Information (CMEMS). Marine Data Store (MDS) 2025). Keterangan: SCSWC (South China Sea Warm Current), VOC (Vietnam Ocean Current), SSTF (Sunda Shelf Throughflow), ITF (Indonesia Throughflow), NEC (North Equator Current), MC (Mindanao Current), NECC (North Equator Counter Current), NGCC (New Guinea Coastal Current); EICC (East India Coastal Current), SECC (South Equator Counter Current), SEC (South Equator Current), SC (Somali Current), NEMC (North East Madgaskar Current), SEMC (South East Madagaskar Current), dan AG (Agulhas Current). 42
- 11 Boxplot komponen u dan v arus pada area WIOD, EIOD, dan Selat Sunda setiap musim menggunakan data CMEMS periode 2022-2024 44
- 12 Peta batimetri Selat Sunda, ditunjukkan dengan garis putus-putus, dengan wilayah daratan berwarna abu-abu. (a) area studi yang ditandai dengan kotak merah di tiga lokasi: A1, A2, dan A3, yang masing-masing mewakili Samudra Hindia, Selat Sunda, dan Laut Jawa. Ditampilkan juga empat data altimetri yang di ko-lokasi secara temporal dari tahun 2023 untuk validasi SWH (lihat legenda untuk warna data; Ribal dan Young 2019). Setiap kotak merah berukuran 20 x 20 km; (b) Lokasi stasiun pengukuran HFR di Pelabuhan Merak cakupan area untuk pengukuran arus permukaan, dan ketersediaan data (dalam %) periode 1 Januari hingga 17 April 2024 untuk validasi arus permukaan disajikan sebagai kontur. 54
- 13 Strategi pemilihan waktu (dalam UTC) menjalankan skenario SSR, SSS, dan KRS dalam riset ini 59

- 14 Vector plot model arah dan kecepatan angin (cyan) terhadap observasi (magenta) di lokasi perairan A1 (a), A2 (b), dan A3 (c) periode 2023, Luaran model adalah serupa pada skenario SSR dan KRS. 63
- 15 Validasi komponen arus permukaan model terhadap data HFR, (a) Diagram Taylor untuk komponen ASC dan CSC dari skenario SSR (segitiga hitam) dan KRS (lingkaran hitam) untuk periode 1 Januari hingga 17 April 2024. Deret waktu komponen (b) ASC dan (c) CSC dari tanggal 1 hingga 31 Maret 2024, timeseries zonal (d), dan meridional (e) periode 1 Januari – 17 April 2024. 65
- 16 Cuplikan arus permukaan skenario KRS (green quiver) pada tanggal 28 Januari 2024 dan HFR (purple quiver). Shaded color menunjukkan perbedaan skenario KRS dengan HFR. 66
- 17 Validasi SWH yang diturunkan dari model terhadap data altimetri satelit. (a) Diagram Taylor untuk SWH dari skenario SSS (segitiga hitam) dan KRS (lingkaran hitam) untuk tahun 2023. Perbandingan deret waktu SWH yang dimodelkan terhadap data altimeter dari (b) CFOSAT, (c) CRYOSAT-2, (d) HY-2B, dan (e) SENTINEL. Sumbu x timeseries (b-e) menunjukkan waktu pengamatan altimeter, dengan titik-titik data untuk masing-masing satelit diplot sesuai dengan waktu akuisisi masing-masing. 67
- 18 Perbandingan tinggi SWH berbagai satelit altimeter terhadap dua skenario model periode 2023, (a) CFOSAT, (b) CRYOSAT, (c) HY2B, dan (d) SENTINEL. Perhatikan sumbu x pada a-d memiliki jarak waktu berbeda antar satelit. 68
- 19 Momentum komponen-x (panel atas) dan komponen-y (panel bawah) di tiga lokasi Selat Sunda Periode 2023 terhadap koordinat sigma (σ) 70
- 20 Profil resultan momentum komponen x/y di lokasi A1, A2, dan A3 (panel atas). Pressure gradient term pada komponen zeta, zqsp, zbeh, dan zetw (panel bawah). 71
- 21 Selisih skenario SSR dengan KRS komponen ASC dan WSWx pada musim DJF, MAM, JJA, SON periode 2023. Komponen ASC dan WSWx positif (negatif) mengarah ke timur (barat). Colorbar berbeda nilai pada dua komponen. 73
- 22 Selisih skenario SSR dengan KRS komponen CSC dan WSWy pada musim DJF, MAM, JJA, SON periode 2023. Komponen CSC dan WSWy positif (negatif) mengarah ke utara (selatan). Colorbar berbeda nilai pada dua komponen. 74
- 23 Timeseries SWH, ASC dan CSC di Lokasi A1, A2 dan A3. Garis biru mewakili skenario single (SSS dan SSR) sedangkan garis coklat mewakili skenario kopel (KRS). 75
- 24 Timeseries komponen VF (a), hjvf (b), vjvf (c), dan kvrf term (d) di Lokasi A1, A2, dan A3 yang diperoleh melalui Persamaan (31) dan (32). Perhatikan bahwa sumbu y memiliki besaran berbeda. 75
- 25 Spektral 2D gelombang skenario SSS. Lokasi A1, A2, dan A3 masing-masing diwakili oleh panel (a, d, g, dan j), (b, e, h, dan k), dan

- (c, f, i, dan k). Musim DJF, MAM, JJA, dan SON diwakili panel a-c, d-f, g-i, dan j-k. Panah merah dan hitam masing-masing menunjukkan arah dan kecepatan untuk arus dan angin permukaan. 78
- 26 Spektral 2D gelombang skenario KRS. Lokasi A1, A2, dan A3 masing-masing diwakili oleh panel (a, d, g, dan j), (b, e, h, dan k), dan (c, f, i, dan k). Musim DJF, MAM, JJA, dan SON diwakili panel a-c, d-f, g-i, dan j-k. Panah merah dan hitam masing-masing menunjukkan arah dan kecepatan untuk arus dan angin permukaan. 79
- 27 Spektral 1D pada scenario SSS dan KRS di lokasi A1-A3 81
- 28 Scatterplot selisih arah arus SSS dan gelombang KRS di A3 periode Juni-November 2023 (a); dan detail pada periode 25-29 Juli 2023 (b). Warna dalam bulatan menunjukkan selisih arah arus dan gelombang. 83
- 29 SST perairan Indonesia dan sekitarnya pada periode 2023 (Huang *et al*, 2021). Peta batimetri Selat Sunda dari *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO) ditandai dengan garis putus-putus dengan mengabaikan daratan sebagai warna abu-abu. Domain riset Selat Sunda ditandai dengan kotak merah pada 3 lokasi berbeda, yaitu A1, A2, dan A3 masing-masing mewakili Samudera Hindia, Selat Sunda, dan Perairan dalam Indonesia. Seluruh kotak merah berukuran 20x20 km. 87
- 30 Cuplikan timeseries flux panas bersih (Q_{net}) dan $f_s R_s$ (a), kedalaman skin SST (b), kecepatan gesek permukaan air laut (u^* ; c), dan koreksi cool skin (ΔT_c ; d) Selat Sunda 12-22 Juli 2023. Garis horizontal pada setiap panel menunjukkan rata-rata pada periode 2023. 92
- 31 (a) Validasi kopel gabungan T_b (titik hitam) dengan OISST (titik merah), (b) Deret waktu harian T_s (titik magenta) dan T_b (titik cyan), (c) Deret waktu per jam dari ΔT_c (titik biru) dan ΔT_w (titik coklat), (d) Deret waktu per jam dari ΔT_{cw} sebagai jumlah dari $\Delta T_c + \Delta T_w$, Semua deret waktu pada periode 2023. 94
- 32 Rataan diurnal R_{sw} (garis magenta) dan Q (garis hitam) Selat Sunda dioverlay terhadap gradien warna merepresentasikan U_{10} (a). Respon ΔT_c (b) dan $Q_{net} - f_s R_{sw}$ (c) terhadap U_{10} pada kondisi malam (cross sign) dan siang (plus sign). Seluruh gambar disajikan dengan errorbar 1x standard deviasi, Local Time (LT) adalah UTC+7. 95
- 33 Hubungan ΔT_c (y) sebagai U_{10} (x) di A1, A2, dan A3 Selat Sunda pada kondisi malam dan siang hari. Variabel persamaan a, b, dan c pada legenda disajikan pada Tabel 11. 97
- 34 Koreksi T_{cw} terhadap U_{10} (a), T_{cw} terhadap diurnal (b), dan variabilitas jam-an ΔT_{cw} , ΔT_{cww} , dan $\Delta T_{c wd}$ terhadap waktu (c) dengan nilai 1x standar deviasi dinyatakan oleh bar. 99
- 35 Scatterplot hubungan T_s dengan T_b , setelah dikoreksi terhadap kecepatan angin (a) dan variabilitas diurnal (b), Garis coklat menyatakan 1:1 100
- 36 Eksponensial plot ΔT_{cw} terhadap U_{10} antar model di 3 lokasi Selat Sunda pada kondisi malam dan siang hari. Colorbar dan garis kontur

masing-masing menyatakan persentase kerapatan data dan interval kerapatan data setiap 10%. 101

- 37 Boxplot T_s (a), U_{10} (b), R_{sw} (c), R_{lw} (d), R_{shf} (e), dan R_{lhf} (f) malam hari di tiga lokasi Selat Sunda. Median dan mean masing-masing ditandai dengan dotted dan solid line di dalam kotak. Data pengamatan dan outliers masing-masing ditandai dengan poin transparansi dan solid. 104
- 38 Serupa dengan Gambar 37 tetapi untuk siang hari 105
- 39 Skematik diagram T_s , U_{10} , dan komponen neraca energi permukaan laut (R_{sw} , R_{lw} , R_{shf} , dan R_{lhf}) pada malam dan siang hari di open water; perairan terbuka (a,b) dan closed water; perairan tertutup (c,d). 109
- 40 Arus lintas laut Jawa-Samudera Hindia melalui jalur Selat Sunda (kotak magenta). Studi area ditandai dengan kotak magenta pada sites A1, A2, dan A3 yang masing-masing mewakili Samudera Hindia, Selat Sunda, dan Laut Jawa. Setiap kotak berukuran 20x20 km. Estimasi VT dan karakteristik arus tiga perairan masing-masing dilakukan pada transek garis biru serta garis merah dan hijau. 115
- 41 (a) Diagram Taylor komponen ASC (titik hitam) dan CSC (segitiga hitam) CMEMS dengan model kopling periode 2023, (b) *timeseries* perbandingan komponen ASC HF Radar (garis biru) dengan model kopling (garis merah), (b) *timeseries* perbandingan komponen CSC HF Radar (garis biru) dengan model kopling (garis merah). HF radar yang digunakan merupakan periode 1 Januari-17 April 2024. 117
- 42 Profil arus permukaan 1 m, 200 m, dan 1000 m pada musim DJF, MAM, JJA, dan SON pada Periode 2023 di Selat Sunda 119
- 43 Magnitude ASC (a) dan CSC (b) dari transek biru Gambar 1 sesuai level kedalaman. Nilai rata-rata VT positif (negatif) menyatakan arah arus mengarah dari Indian Ocean (Java Sea) ke Java Sea (Indian Ocean) yang masing-masing dinyatakan oleh VT_{IJ} dan VT_{JI} . Garis hitam tebal dalam kontur adalah 0 m/s. Garis merah putus-putus berada pada $\xi_{\rho} = 100$ atau 105,71 °BT digunakan untuk melihat deret waktu VT periode 2023. 120
- 44 Magnitude ASC dan CSC (a dan b) dan estimasi VT ASC dan VT CSC (b dan d) harian pada $\xi_{\rho} = 100$. Garis hitam tebal dalam kontur adalah 0 m/s. Nilai VT positif (negatif) menyatakan arah arus mengarah dari Indian Ocean (Java Sea) ke Java Sea (Indian Ocean), Sumbu x menyatakan bulan. 122
- 45 Profil vertikal mean (a-c) dan standar deviasi (d-f) komponen arus pada lokasi A1 (a, d), A2 (b, e), dan A3 (c, f) 123
- 46 Diagram Hovmöller ASC (a) and CSC (b) pada transek merah Gambar 40 di $\eta_{\rho} = 114$ periode 2023. Garis hitam *solid* dalam kontur adalah 0 m/s. Garis putih menyatakan ketiadaan data akibat keberadaan pulau-pulau kecil di Selat Sunda. Rataan *timeseries* ASC (c) dan CSC (d) dengan cuplikan longitude terpilih pada 104 °BT, 105,8 °BT, dan 107 °BT (garis merah putus-putus). 125

- 47 Kontur CWT yang bersesuaian dengan rata-rata maksimum atau minimum dari Gambar 46, yaitu (a) 104 °BT, (b) 105,8 °BT, dan (c) 107 °BT di Selat Sunda. 126
- 48 (a) CPSD SJC (garis merah) dan SSTF (garis biru), (b) koherensi, dan (c) beda fase antar dua arus. Angka biru pada grafik spektral biru panel a menyatakan skala periode saat energi spektral maksimum yang selanjutnya dicari nilai koherensi dan beda fase bersesuaian pada panel b dan c yang ditandai dengan simbol bintang dan angka dengan panah. Garis Hitam menunjukkan puncak energi pada SJC dan SSTF. 127
- 49 (a) Lintasan yang digunakan untuk mendeteksi gelombang Kelvin bermula dari sisi kiri Samudera Hindia (60° BT, equator) hingga sisi kanan Nusa Tenggara Timur (125,21° BT; -8,58° LS) periode 2023. (b) Hovmöller SLA yang bersesuaian dengan lintasan (a). Garis biru dan magenta masing-masing menunjukkan positif (P) dan negatif (N) anomali SLA dengan merah bulat dan hijau bulat masing-masing menyatakan awal dan akhir anomali. Garis hitam menunjukkan posisi A1 Selat Sunda di Samudera Hindia. 128
- 50 *Timeseries* komponen ASC dan CSC tiga lokasi model kopling yang sudah dilakukan perhitungan arus residu dan LPF. Titik hitam pada sumbu y menyatakan batas komponen arus positif dan negatif. 130
- 51 Resultan arus permukaan kejadian anomali positif dan negatif SLA 131
- 52 Mekanisme interaksi atmosfer, arus, dan gelombang di Selat Sunda. Simbol dan singkatan dalam gambar merujuk pada teks 139
- 53 Skematik hubungan IOD positif dan negatif terhadap SJC dan SSTF. Kontur anomali SST pada peta bersumber dari OISST (Huang *et al.* 2021). Skenario IOD negatif (a) dan positif (b) masing-masing terjadi pada periode 1-8 Januari dan 15-22 Oktober 2023. 141

DAFTAR LAMPIRAN

- 1 Perbandingan studi disertasi ini dengan penelitian terdahulu berdasarkan Bab disertasi 166
- 2 Spherical Coordinate Remapping Interpolation Package yang digunakan dalam riset ini 174
- 3 Model Coupling Toolkit yang digunakan dalam riset ini 175
- 4 `cppdefs.h` pada model single. Untuk model kopel lihat petunjuk di bawah secara lengkap 176
- 5 `input_roms_disertasi_2022_2024` (karena keterbatasan halaman, versi lengkap silahkan mengacu pada <https://doi.org/10.5281/zenodo.15107182>) 179
- 6 `input_swan_disertasi_2022_2024` (karena keterbatasan halaman, versi lengkap silahkan mengacu pada <https://doi.org/10.5281/zenodo.15107182>) 180