

APLIKASI MODEL NUMERIK TIGA DIMENSI UNTUK SIMULASI HIDRODINAMIKA LAUT

PROPOSAL DISERTASI

Diajukan untuk melengkapi tugas-tugas dan
memenuhi syarat-syarat guna pelaksanaan penelitian Disertasi

Oleh:

MUH. NUR HIDAYAT

2209300070026



**PROGRAM STUDI DOKTOR MATEMATIKA DAN APLIKASI SAINS
PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS SYIAH KUALA
DARUSSALAM, BANDA ACEH
JUNI, 2023**

LEMBAR PENGESAHAN

Judul Disertasi : Aplikasi Model Numerik Tiga Dimensi untuk Simulasi
Hidrodinamika Laut
Nama Mahasiswa : Muh. Nur Hidayat
NPM : 2209300070026
Program Studi : Doktor Matematika dan Aplikasi Sains

Menyetujui
Komisi Pembimbing,
Promotor

Prof. Dr. Ir. Syamsul Rizal
NIP. 196101221987031003

Ko-Promotor I,

Ko-Promotor II,

Prof. Dr. Marwan Ramli, S.Si.,M.Si.
NIP. 197111251999031003

Prof. Dr. Muchlisin Z.A, S.Pi.,M.Sc.
NIP. 197109111999031003

Mengetahui

Ketua Program Studi
Doktor Matematika dan Aplikasi Sains,

Direktur Program Pascasarjana
Universitas Syiah Kuala,

Prof. Dr.rer.nat. Rinaldi Idroes, S.Si.
NIP. 196808251994031003

Prof. Dr. Ir. Darusman, M.Sc.
NIP. 196210091987021001

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan nikmat karunia-Nya sehingga proposal penelitian yang berjudul **Aplikasi Model Numerik Tiga Dimensi untuk Simulasi Hidrodinamika Laut** dapat terselesaikan dengan baik. Penelitian ini dilakukan untuk memenuhi salah satu syarat dalam memperoleh gelar Doktor pada Program Studi Doktor Matematika dan Aplikasi Sains, Universitas Syiah Kuala.

Penyusunan proposal penelitian ini tidak dapat selesai tanpa bantuan dari tim pembimbing. Oleh karena itu, ucapan terima kasih disampaikan kepada pihak-pihak tersebut.

Proposal penelitian ini tidak luput dari segala kekurangan, baik dalam hal penulisan maupun pembahasan dari topik penelitian. Oleh sebab itu, diperlukan saran demi penyusunan penelitian yang lebih baik. Semoga penelitian dapat memberi manfaat bagi pembaca untuk melaksanakan penelitian selanjutnya.

Banda Aceh, 15 Juni 2023

Penulis

RINGKASAN

Penelitian ini membahas tentang *Indian Ocean Dipole* (IOD), yang merupakan perbedaan temperatur permukaan laut antara Samudera Hindia bagian barat tropis dan Samudera Hindia bagian timur tropis. IOD memiliki peran penting dalam sistem iklim global dan dampaknya terhadap musim hujan, pertanian, dan perikanan di wilayah tersebut. Karena meningkatnya emisi gas rumah kaca antropogenik, penelitian ini bertujuan untuk memodelkan parameter oseanografi dan meteorologi yang menggerakkan IOD untuk memahami hubungan antara IOD dan perubahan iklim. Penelitian ini menggunakan aplikasi pemodelan laut untuk menganalisis interaksi antara parameter oseanografi seperti arus laut, temperatur laut, salinitas, MLD, Chl-a, fluks air tawar, dan fluks panas bersih, serta parameter meteorologi seperti laju presipitasi dan tekanan angin. Tujuannya adalah untuk memberikan wawasan tentang mekanisme yang mendorong IOD dan potensi responsnya terhadap perubahan iklim. Penelitian ini diharapkan dapat berkontribusi pada pemahaman kita tentang interaksi kompleks antara laut dan atmosfer di wilayah Samudera Hindia.

DAFTAR ISI

	Halaman
KATA PENGANTAR	iii
RINGKASAN	iv
DAFTAR ISI	v
DAFTAR TABEL	vi
DAFTAR GAMBAR	vii
DAFTAR LAMPIRAN	viii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Urgensi Penelitian.....	3
1.5 Manfaat Penelitian	5
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Penelitian Terkait IOD	6
2.2 Model Numerik dan Parameter	10
2.2.1 Arus Laut, Temperatur Laut, dan Salinitas	10
2.2.2 Klorofil-a dan Kedalaman Lapisan Campuran	12
2.2.3 Fluks Panas Bersih dan Fluks Air Tawar	13
2.2.4 Laju Presipitasi dan Tekanan Angin	14
2.3 Peta Jalan Penelitian	15
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	16
3.1 Domain dan Data Penelitian	16
3.1.1 Domain Penelitian	16
3.1.2 Data Penelitian.....	16
3.1.3 Pengumpulan Data	17
3.2 Analisis Data	18
3.2.1 Model Musiman	18
3.2.2 Analisis Korelasi.....	19
3.2.3 Analisis Regresi	21
3.3 Prosedur Penelitian.....	23
BAB IV BIAYA DAN JADWAL PENELITIAN	25
4.1 Biaya Penelitian	25
4.2 Jadwal Penelitian	26
DAFTAR PUSTAKA	27
LAMPIRAN-LAMPIRAN	35

DAFTAR TABEL

		Halaman
Tabel 1.1	Jenis luaran dan indikator capaian tiap tahun	5
Tabel 3.1	Rangkuman data penelitian.....	17
Tabel 4.1	Ringkasan anggaran biaya penelitian	25
Tabel 4.2	Ringkasan jadwal pelaksanaan penelitian	26

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 2.1 <i>Road Map</i> Penelitian	15
Gambar 3.1 Peta batimetri Samudera Hindia, diperoleh dari SRTM30+ (Becker <i>et al.</i> , 2009). Warna dalam peta menunjukkan kedalaman 0-5000 m sedangkan pulau digambarkan tanpa warna.	17
Gambar 3.2 Ilustrasi persamaan model musiman.	19
Gambar 3.3 Diagram alir penelitian	24

DAFTAR LAMPIRAN

	Halaman
Lampiran 1. Kode Skrip untuk Mengunduh Data.....	35
Lampiran 2. Justifikasi Anggaran Penelitian.....	37
Lampiran 3. Dukungan Sarana dan Prasarana Penelitian	38
Lampiran 4. Surat Pernyataan Mahasiswa	39

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Samudera Hindia merupakan salah satu dari tiga samudera terbesar di dunia, dengan volume lautan mencapai sekitar 19.8% dari total volume lautan di seluruh dunia (Eakins dan Sharman, 2010). Karena wilayahnya yang sangat luas, Samudera Hindia memiliki peran penting dalam sistem iklim global dan oleh karena itu sangat penting untuk dapat memprediksi perubahan yang terjadi di dalamnya.

IOD atau *Indian Ocean Dipole* merupakan interaksi anomali antara laut dan atmosfer, yang melibatkan osilasi yang tidak teratur dari temperature permukaan laut (SST) di Samudera Hindia tropis. IOD adalah perbedaan SST antara Samudera Hindia bagian barat tropis (50° E- 70° E, 10° S- 10° N) dan Samudera Hindia bagian timur tropis (90° E- 110° E, 10° S- 0° N) (Shunmugapandi *et al.*, 2022; Thushara dan Vinayachandran, 2020; Sattar dan Cheung, 2019). Kekuatan IOD diukur berdasarkan *Dipole Mode Index* (DMI) (Saji *et al.*, 1999). Kekuatan dan frekuensi peristiwa IOD telah terbukti memiliki dampak signifikan pada iklim musim hujan (Qiu *et al.*, 2014), pertanian (Q. Zhang *et al.*, 2016), dan perikanan (Lan *et al.*, 2013) di wilayah tersebut. Dengan peningkatan emisi gas rumah kaca antropogenik (dihasilkan oleh aktivitas manusia), kekhawatiran tentang dampak potensial perubahan iklim pada IOD dan pola iklim yang terkait semakin meningkat.

Untuk lebih memahami hubungan antara IOD dan perubahan iklim, sangat penting untuk memodelkan parameter oseanografi dan meteorologi yang menggerakkan IOD. Penelitian ini akan menggunakan aplikasi pemodelan laut untuk mempelajari keterkaitan antara IOD, parameter oseanografi seperti arus laut, temperatur laut, salinitas, MLD, Chl-a, fluks air tawar, dan fluks panas bersih, dan parameter meteorologi seperti tekanan angin dan laju presipitasi. Dengan menganalisis interaksi antara parameter-parameter ini, penelitian ini bertujuan untuk memberikan wawasan tentang mekanisme yang mendorong IOD dan potensi responsnya terhadap perubahan iklim.

Penggunaan aplikasi pemodelan laut semakin penting dalam studi perubahan

iklim, karena memungkinkan para peneliti untuk mensimulasikan dan memprediksi perilaku parameter oseanografi dan meteorologi dari waktu ke waktu. Studi tentang pemodelan laut berkaitan dengan pembentukan model dan sifat-sifat sistem di dalamnya. Dalam praktiknya, pembentukan model ini memanfaatkan model numerik dan program komputasi dengan tujuan untuk mengatasi keterbatasan data observasi (*in situ*), juga untuk alasan efektifitas serta efisiensi biaya dan waktu yang digunakan. Penelitian sebelumnya mengembangkan model numerik dengan menggunakan persamaan Navier-Stokes untuk memodelkan sirkulasi arus laut dan menganalisis variabel hidrodinamika laut lainnya. Sebagai contoh, simulasi arus laut di perairan Indonesia akibat gaya pembangkit angin menggunakan model persamaan Navier-Stokes 2 dimensi (Rizal *et al.*, 2018; Ikhwan *et al.*, 2019; Haditiar *et al.*, 2019). Dalam penelitian lain, model persamaan Navier-Stokes 3 dimensi digunakan untuk mengkaji sirkulasi arus pasang surut baroklinik M2 dan hidrodinamika laut yang berasal dari fenomena El Nino (Rizal *et al.*, 2010; Haditiar *et al.*, 2020; Ikhwan *et al.*, 2021).

Model-model ini dapat digunakan untuk mempelajari dampak perubahan iklim pada laut dan ekosistem yang terkait, serta untuk mengembangkan strategi mitigasi dan adaptasi terhadap perubahan tersebut. Dalam penelitian ini, model laut akan digunakan secara jangka panjang untuk mempelajari IOD, yang diharapkan dapat berkontribusi pada pemahaman kita tentang interaksi kompleks antara laut dan atmosfer di wilayah Samudera Hindia.

1.2. Rumusan Masalah

Secara keseluruhan, masalah utama dari penelitian ini adalah menyelidiki hubungan antara IOD, parameter oseanografi seperti arus laut, temperatur laut, salinitas, MLD, Chl-a, fluks air tawar, dan fluks panas bersih serta parameter meteorologi seperti, laju presipitasi dan tekanan angin dengan menggunakan aplikasi pemodelan laut, serta mengevaluasi dampak potensial perubahan pada IOD dan pola iklim yang terkait. Dengan memahami mekanisme yang mendorong IOD dan dampaknya terhadap perubahan iklim, penelitian ini diharapkan akan memberikan kontribusi pada ilmu pengetahuan, yaitu pemahaman tentang interaksi kompleks antara laut dan atmosfer serta memberikan strategi untuk mitigasi dan adaptasi terhadap dampak perubahan iklim di wilayah

Samudera Hindia.

1.3. Tujuan Penelitian

Tujuan umum dari penelitian ini adalah menyelidiki hubungan antara IOD, parameter oseanografi, dan parameter meteorologi serta dampaknya terhadap ekosistem laut dengan cara menjawab beberapa tujuan khusus berikut.

- Menentukan kekuatan dan arah dari hubungan klorofil-a, temperatur permukaan laut, dan salinitas permukaan laut dengan berfokus pada pola dan variasi mereka selama kejadian monsun.
- Menentukan ketebalan MLD dan hubungannya terhadap parameter meteorologi (temperature udara, kelembaban spesifik, laju konvektif presipitasi, tekanan permukaan laut, dan tekanan angin).
- Menentukan pengaruh konsentrasi klorofil-a terhadap ketinggian permukaan laut, arus pasang surut, dan .
- Menentukan
- Menentukan pola periodik yang didasarkan pada kejadian monsun serta mengukur kekuatan dan arah dari hubungan IOD, parameter oseanografi (arus laut, temperatur laut, salinitas, MLD, Chl-a, fluks air tawar, dan fluks panas bersih), dan parameter meteorologi (laju presipitasi dan tekanan angin).
- Menginvestigasi hubungan antara IOD dengan kelimpahan dan distribusi populasi ikan.

1.4. Urgensi Penelitian

Samudera Hindia merupakan rumah bagi populasi biota laut yang besar dan semakin bertumbuh, di mana banyak dari mereka bergantung pada sumber daya maritimnya. IOD telah terbukti memiliki dampak signifikan pada keanekaragaman hayati laut, perikanan, dan masyarakat pesisir, terutama selama peristiwa ekstrem seperti kekeringan (Pan *et al.*, 2018) dan siklon (Wahiduzzaman *et al.*, 2022). Frekuensi dan

intensitas peristiwa ini semakin meningkat dari hari ke hari karena pengaruh perubahan iklim. Oleh karena itu, penting untuk memahami mekanisme yang mendorong variasi IOD agar dapat mengembangkan strategi adaptasi dan mitigasi yang efektif.

Selain itu, Samudera Hindia adalah pemain utama dalam sistem iklim global, dengan keterkaitan yang kuat dengan Samudera Pasifik dan Samudera Atlantik. Perubahan di Samudera Hindia dapat memiliki dampak signifikan pada pola iklim global, terutama melalui pengaruhnya pada sistem musim hujan yang menyediakan air dan makanan bagi miliaran orang di Asia dan Afrika. Oleh karena itu, memahami interaksi kompleks antara IOD dan parameter-parameter oseanografi dan meteorologi lainnya sangat penting untuk proyeksi dan pengembangan model iklim.

Wilayah Samudera Hindia saat ini mengalami perubahan lingkungan yang cepat akibat aktivitas manusia dan perubahan iklim. Perubahan ini mempengaruhi sifat fisik dan kimia laut, seperti temperatur laut, salinitas, dan ketersediaan nutrisi, yang pada gilirannya mempengaruhi siklus biogeokimia dan ekosistem. IOD adalah salah satu penggerak utama dari perubahan ini, dan memahami korelasinya dengan parameter lain sangat penting untuk memprediksi dan mengurangi dampaknya pada wilayah Samudera Hindia.

Di wilayah Indonesia sendiri, tercatat bahwa peristiwa IOD pada tahun 2019 merupakan peristiwa IOD terkuat dan terparah semenjak tahun 1980. Hal ini berdasarkan data observasi satelit dan *in situ* (yaitu, kapal dan pelampung) OISSTv2 (Reynolds *et al.*, 2002). Peristiwa ini telah menyebabkan kerugian sosial ekonomi yang besar, termasuk kekeringan parah yang berlangsung lama di Indonesia dan curah hujan tinggi di Afrika timur selama musim hujan yang singkat (Lu dan Ren, 2020).

Secara keseluruhan, penelitian tentang korelasi antara IOD dan berbagai parameter oseanografi dan meteorologi sangat mendesak untuk dilakukan karena dampak signifikan dari parameter-parameter ini pada wilayah Samudera Hindia, pola iklim global, dan kesejahteraan jutaan orang. Karena perubahan iklim terus mengubah sifat fisik dan kimia laut, memahami korelasi ini kritis untuk mengembangkan strategi adaptasi dan mitigasi yang efektif.

1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dan kebaruan penelitian tentang IOD terletak pada potensi untuk lebih memahami interaksi kompleks antara berbagai parameter oseanografi dan meteorologi serta dampaknya terhadap wilayah Samudera Hindia. Meskipun beberapa penelitian telah meneliti korelasi antara IOD dengan berbagai parameter oseanografi dan meteorologi, masih banyak yang harus dipelajari tentang mekanisme yang mendorong hubungan ini. Selain itu, karena perubahan iklim terus mengubah sifat fisik dan kimia Samudera Hindia, semakin penting untuk memahami bagaimana perubahan ini akan memengaruhi IOD dan sistem ekologi, sosial, dan ekonomi yang terkait.

Secara khusus, manfaat dari penelitian ini adalah

- Memperoleh peta IOD, arus laut, temperatur laut, salinitas, MLD, Chl-a, fluks air tawar, fluks panas bersih, laju presipitasi, dan tekanan angin di Samudera Hindia.
- Peta dan hasil analisis model musiman untuk parameter oseanografi seperti arus laut, temperatur laut, salinitas, MLD, Chl-a, fluks air tawar, dan fluks panas bersih serta parameter meteorologi, laju presipitasi, dan tekanan angin di Samudera Hindia.
- Hasil analisis korelasi untuk mengukur kekuatan dan arah dari hubungan antara IOD dengan parameter-parameter oseanografi dan meteorologi.

Adapun target jenis luaran dari penelitian ini dapat dilihat dalam Tabel 1.1

Tabel 1.1. Jenis luaran dan indikator capaian tiap tahun

No	Jenis Luaran	Indikator Capaian		
		TS1	TS+1	TS+2
1	Artikel ilmiah dimuat di jurnal indeks bereputasi (JIB) internasional		2 draft/ submitted	2 reviewed/ accepted
2	Artikel ilmiah dimuat di prosiding internasional		1 draft/ submitted	1 reviewed/ accepted
3	Disertasi			1

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1. Penelitian Terkait IOD

Hasil analisis data observasi selama 40 tahun (1958-1997) menunjukkan fenomena mode dipol di Samudera Hindia. Pola variasi internal dengan anomali *sea surface temperature* (SST) rendah di sekitar Sumatra dan tinggi di sebelah barat Samudera Hindia, disertai dengan angin dan presipitasi. Keterkaitan spasial-temporal antara SST dan angin kuat melalui medan presipitasi dan dinamika laut. Proses interaksi udara-laut ini unik dan terbukti independen dari fenomena osilasi selatan El Nino (ENSO). Penemuan mode dipol ini menjelaskan sekitar 12% variasi SST di Samudera Hindia, yang juga menyebabkan curah hujan yang parah di Afrika timur dan kekeringan di Indonesia selama tahun-tahun aktifnya (Saji *et al.*, 1999).

Liu *et al.* (2023) menunjukkan anomali salinitas positif yang signifikan di lapisan atas Samudera Hindia tropis pusat selama periode tertentu. Pada tahun 2010 dan 2016, pengaruh La Nina dan IOD negatif (nIOD) menyebabkan anomali salinitas positif di Samudera Hindia timur akibat adanya angin barat yang kuat dan arus zona positif. Chu *et al.* (2022) mempelajari dinamika variasi antartahunan arus khatulistiwa di Samudera Hindia dan mengukur efek dari mode iklim ENSO dan IOD pada arus. Xing *et al.* (2022) mengeksplorasi respons arus laut khatulistiwa selama fase puncak IOD, yang memberikan umpan balik positif laut yang mendukung puncak IOD. L. Zhang dan Han (2021) meneliti tentang Atlantic Nino dan dampaknya pada iklim regional dan global. Mereka menemukan bahwa curah hujan yang meningkat di sebelah barat Samudera Hindia tropis selama IOD positif (pIOD) melemahkan pertukaran angin timur di atas Samudera Atlantik tropis dan menyebabkan anomali hangat di wilayah pusat dan timur khatulistiwa Atlantik sehingga memicu Atlantik Nino.

Polonsky dan Torbinsky (2021) mengkaji fitur pembentukan lapisan kritis di zona ekuator-tropika Samudera Hindia, dan bagaimana hal tersebut terkait dengan terbentuknya IOD. Valsala *et al.* (2020) meneliti dampak IOD pada siklus karbon di atas laut dan variasinya di Samudera Hindia, dengan menggunakan pengamatan biogeo kimia dan model sirkulasi biogeo kimia laut global. Mereka menemukan bahwa

IOD menyebabkan variasi signifikan dalam pengeluaran CO₂ dari laut ke udara di wilayah tenggara tropika Samudera Hindia karena dinamika *upwelling* dan anomali yang bergerak ke barat. Y. Zhang *et al.* (2020) membedakan IOD dari pola tripole baru yang baru saja ditemukan, yang memiliki *sea surface temperature anomalies* (SSTA) positif (negatif) di atas wilayah tengah tropika (tenggara dan barat) Samudera Hindia. Studi-studi ini membantu untuk memahami interaksi kompleks antara arus laut, kondisi atmosfer, dan variabilitas iklim di Samudera Hindia.

Terkait dengan SST dan *sea surface salinity* (SSS), Akhil *et al.* (2023) menemukan bahwa penyebaran permukaan laut di bagian tenggara Laut Arab (SEAS) selama musim dingin dipicu oleh adveksi horizontal air tawar *Bay of Bengal* (BoB) oleh sirkulasi siklonik di sekitar India selama musim gugur, dan IOD menjadi penggerak utama dari variasi antartahunan SSS di SEAS selama musim dingin. Namun, dampak penyebaran SEAS musim dingin terhadap SST lokal dan awal musim hujan berikutnya lemah. Genda *et al.* (2022) menemukan bahwa sebelum pertengahan 1950-an, SST bervariasi dengan IOD, sedangkan ENSO juga mempengaruhi variasi SST setelah pertengahan 1950-an. Variasi SSS tidak menunjukkan hubungan dengan faktor-faktor iklim, mengindikasikan bahwa faktor-faktor pengontrol utama SST dan SSS harus dipertimbangkan secara terpisah. Sun *et al.* (2022) meneliti respons asimetris SSS yang signifikan terhadap dua kejadian pIOD dan nIOD di selatan Samudera Hindia tropis. Beberapa studi lain juga menyoroti pentingnya IOD dalam menggerakkan variasi antartahunan SSS, seperti penelitian oleh Rathore *et al.* (2020) yang menggunakan komposit musiman selama peristiwa ENSO/IOD untuk memahami variasi dalam transportasi kelembaban dan curah hujan di atas Australia, serta asosiasi mereka dengan variasi SSS. Studi lainnya oleh Sun *et al.* (2019) dan Q. Zhang *et al.* (2016) mengidentifikasi mode dipol salinitas di Samudera Hindia tropis, yang disebut S-IOD, pola variasi SSS antartahunan dengan anomali salinitas rendah di bagian tengah khatulistiwa dan salinitas tinggi di sebelah tenggara Samudera Hindia tropis.

Selain itu, terdapat penelitian tentang dampak IOD pada kedalaman lapisan campuran (MLD) di Samudera Hindia, seperti penelitian oleh Sadhukhan *et al.* (2021) yang menemukan bahwa peristiwa nIOD berasosiasi dengan MLD yang lebih dalam di BoB sedangkan pIOD menyebabkan MLD yang lebih dangkal. Korelasi parsial

menunjukkan bahwa fluks panas bersih (NHF) adalah kontributor utama pendalaman MLD di atas BoB utara, sedangkan tekanan angin mengontrol pendalaman di atas BoB selatan. Z. Zhang *et al.* (2022) menunjukkan bahwa selama nIOD, MLD menurun karena daerah anomali evaporasi minus presipitasi negatif. Sebaliknya, selama pIOD, MLD meningkat karena daerah anomali evaporasi minus presipitasi positif.

Sun *et al.* (2019) menyelidiki variasi SSS dan hubungannya dengan dinamika laut di Samudera Hindia tropis selatan barat (SWTIO) terkait dengan peristiwa IOD negatif tahun 2010. Mereka menemukan bahwa sirkulasi laut di Samudera Hindia selatan tropis berkontribusi secara signifikan terhadap anomali SSS selama evolusi peristiwa IOD negatif. Kenaikan gelombang Rossby membuat kedalaman termoklin dan MLD dangkal, membawa air subpermukaan berkepadatan tinggi ke lapisan permukaan dan mendinginkan SST, yang lebih menekan presipitasi lokal untuk memberikan umpan balik positif bagi peningkatan SSS. Dandapat *et al.* (2021) menemukan bahwa MLD dangkal selama pIOD pada tahun 2006, sedangkan MLD rata-rata lebih dalam (sekitar 50 m) selama nIOD pada tahun 2010. Fluks panas bersih positif pada antarmuka udara-laut juga memainkan peran dominan dalam pendangkalan MLD pada tahun pIOD, karena radiasi gelombang pendek meningkat dan melebihi efek pendinginan fluks panas laten (LHF) selama periode ini.

Sari *et al.* (2020) menemukan bahwa selama peristiwa pIOD kanonik, konsentrasi chl-a yang tinggi diamati di sekitar Selat Sunda dan sepanjang pantai ujung barat Pulau Jawa di sekitar wilayah Cilacap. Namun, selama peristiwa pIOD Modoki, konsentrasi chl-a lebih tinggi dan lebih terdistribusi luas. Hal ini disebabkan oleh peristiwa *upwelling* yang relatif lemah selama peristiwa pIOD Modoki, yang dikombinasikan dengan ketebalan lapisan penghalang yang tipis dan lapisan campuran yang dalam, sehingga memberikan kondisi yang menguntungkan untuk peningkatan konsentrasi chl-a di wilayah Samudera Hindia tropis tenggara. Sementara itu, *upwelling* yang kuat selama peristiwa pIOD kanonik mencegah peningkatan konsentrasi chl-a karena ditunjukkan oleh kedalaman lapisan isothermal yang dangkal yang dikombinasikan dengan ketebalan lapisan penghalang yang tebal dan lapisan campuran yang dangkal. Di sisi lain, Devi dan Sarangi (2017) menemukan bahwa pIOD menyebabkan konsentrasi chl-a yang rendah ($<2 \text{ mg/m}^3$) dan produktivitas primer yang rendah di Laut Arab (AS). El Nino

menyebabkan proses *downwelling*, yang mengakibatkan konsentrasi chl-a rendah ($<1 \text{ mg/m}^3$) di BoB dan AS. La Nina menyebabkan proses *upwelling*, dan menghasilkan konsentrasi chl-a yang tinggi ($>2,0 \text{ mg/m}^3$) di BoB dan AS.

Mandal *et al.* (2022) dan Simanjuntak dan Lin (2022) membahas pengaruh ENSO dan IOD pada variasi chl-a di pesisir selatan Jawa dan pantai selatan Pulau Sunda Kecil (LSI) dan menemukan bahwa chl-a yang intens diamati selama tahun-tahun pIOD, sedangkan konsentrasi chl-a paling sedikit diamati selama tahun-tahun nIOD, sementara Luang-on *et al.* (2022) menunjukkan bahwa konsentrasi chl-a di Teluk Thailand bagian atas (uGoT) terkait dengan ENSO, bukan IOD. Pada musim SWM, anomali chl-a berkorelasi dengan curah hujan dan debit sungai selama La Nina/El Nino. Pada musim NEM, anomali chl-a berkorelasi dengan debit sungai dan angin selama La Nina/El Nino. Sedangkan pada musim NOM, anomali chl-a berkorelasi dengan kecepatan angin dan curah hujan tinggi selama El Nino.

Setiawan *et al.* (2020) meneliti hubungan antara konsentrasi chl-a, SST, dan tekanan angin permukaan laut di Laut Halmahera (HS) yang dipengaruhi oleh Monsun Australia-Indonesia (AIM), ENSO, dan IOD. Pada skala waktu antar tahunan, tekanan permukaan laut dan tekanan angin koheren dengan fase ENSO dan IOD, dan selama peristiwa El Nino dan pIOD (La Nina dan peristiwa nIOD), tekanan permukaan laut dan tekanan angin sangat meningkat (menurun) di HS. Hal ini mendukung peningkatan (pengurangan) konsentrasi chl-a di wilayah tersebut. Penelitian ini menunjukkan bahwa tekanan permukaan laut dan tekanan angin sangat penting dalam menentukan konsentrasi chl-a di HS.

Alsayed *et al.* (2023) menunjukkan bahwa pertukaran air antara Teluk Arab (AG) dan Samudera Hindia melalui Selat Hormuz dapat memainkan peran utama dalam variabilitas musiman kandungan panas laut (OHC) di AG. IOD diketahui memengaruhi sirkulasi dan variabilitas Laut Arab, yang berdekatan dengan AG, dan dapat mempengaruhi fluks panas dan air tawar (FWF) di wilayah tersebut. Alam *et al.* (2021) menyelidiki variabilitas fluks panas laten (LE) dan sensibel (H) antartahunan di Samudera Hindia utara pada musim panas dan menemukan bahwa perubahan posisi dan tekanan *South Asia Low* (SAL) dapat menyebabkan perubahan angin permukaan Samudera Hindia utara, kelembaban, dan suhu, yang pada gilirannya mempengaruhi fluks panas

udara-laut.

Secara keseluruhan, dari penelitian-penelitian yang telah disebutkan diatas, kebaruan penelitian tentang IOD terletak pada potensi untuk lebih memahami interaksi yang kompleks antara berbagai parameter dan dampaknya terhadap kawasan Samudera Hindia. Menyelidiki pengaruh skala spasial dan temporal yang berbeda pada korelasi IOD, termasuk perbedaan regional dan tren jangka panjang juga merupakan kebaruan dalam penelitian ini. Sementara beberapa penelitian telah meneliti korelasi antara IOD dan berbagai parameter oseanografi seperti arus laut, temperatur laut, salinitas, MLD, Chl-a, fluks air tawar, dan fluks panas serta parameter meteorologi seperti laju precipitasi, dan tekanan angin masih banyak yang harus dipelajari tentang mekanisme yang mendorong hubungan ini.

2.2. Model Numerik dan Parameter

Dalam subbab ini, akan dibahas mengenai persamaan untuk parameter dan deskripsi tentang model numerik yang digunakan dalam penelitian ini.

2.2.1. Arus Laut, Temperatur Laut, dan Salinitas

Model sirkulasi laut atau *Ocean General Circulation Models* (OGCM) menggunakan persamaan Navier-Stokes untuk memodelkan fenomena fisis yang terjadi di lautan. Lautan adalah fluida yang dapat dijelaskan dengan baik dengan pendekatan persamaan-persamaan primitif, yaitu persamaan Navier-Stokes serta persamaan keadaan nonlinier yang menggabungkan dua parameter (temperatur dan salinitas) dengan kecepatan fluida, dan mempertimbangkan beberapa asumsi dan hipotesis (Gurvan *et al.*, 2022).

Beberapa asumsi yang digunakan dalam persamaan Navier-Stokes diantaranya asumsi Boussinesq, asumsi hidrostatik, dan asumsi tak termampatkan (*incompressibility*). Misalkan ρ sebagai densitas in situ, T sebagai temperatur potensial, S sebagai salinitas, p sebagai tekanan, z sebagai koordinat vertikal, dan g sebagai percepatan gravitasi. Asumsi yang digunakan dalam persamaan Navier-Stokes dapat dituliskan sebagai berikut.

Asumsi Boussinesq

$$\rho = \rho(T, S, p). \quad (2.1)$$

Berdasarkan asumsi Boussinesq, pengaruh variasi densitas terhadap sistem diabaikan kecuali kontribusinya terhadap gaya apung.

Asumsi hidrostatik

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g. \quad (2.2)$$

Berdasarkan asumsi hidrostatik, persamaan momentum vertikal direduksi menjadi persamaan kesetimbangan antara parameter gradien tekanan vertikal dan gaya apung.

Asumsi tak termampatkan

$$\nabla \cdot U = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0. \quad (2.3)$$

Berdasarkan asumsi tak termampatkan, persamaan 3-D divergensi untuk vektor kecepatan $U = (u, v, w)$ (dalam koordinat kartesius (x, y, z)) dianggap sama dengan 0.

Selanjutnya misalkan $U = U_h + wk$ (h adalah notasi vektor horizontal lokal di atas bidang (i, j)). Persamaan vektor invarian (invarian di bawah transformasi koordinat sehingga dapat diterapkan secara seragam dalam sistem koordinat lengkung ortogonal mana pun) dari persamaan primitif dalam sistem vektor (i, j, k) dapat dituliskan dalam persamaan berikut (Gurvan *et al.*, 2022).

Persamaan kesetimbangan momentum

$$\frac{\partial U_h}{\partial t} = - \left[(\nabla \times U) \times U + \frac{1}{2} \nabla(U^2) \right]_h - f k \times U_h - \frac{1}{\rho_o} \nabla_h p + D^U + F^U. \quad (2.4)$$

Dalam Persamaan (2.4) di atas, suku $(\nabla \times U) \times U + \frac{1}{2} \nabla(U^2)$ dapat ditulis sebagai $U \cdot \nabla U$ dan merupakan suku percepatan konvektif dari persamaan momentum. Suku $\nabla_h p$ merupakan gradien tekanan, $f = 2\Omega \cdot k$ merupakan percepatan Coriolis (dengan Ω adalah vector kecepatan sudut bumi), D^U merupakan parameterisasi dari fisika skala kecil untuk momentum sedangkan F^U merupakan suku gaya permukaan untuk momentum.

Persamaan konservasi panas dan salinitas

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial t} &= -\nabla \cdot (T U) + D^T + F^T \\ \frac{\partial S}{\partial t} &= -\nabla \cdot (S U) + D^S + F^S,\end{aligned}\tag{2.5}$$

dengan operator ∇ sebagai vektor turunan yang diperumum dalam arah (i, j, k) , parameter D^T dan D^S merupakan parameterisasi dari fisika skala kecil untuk temperatur dan salinitas sedangkan parameter F^T dan F^S merupakan suku gaya permukaan untuk temperatur dan salinitas.

2.2.2. Klorofil-a dan Kedalaman Lapisan Campuran

Klorofil-a (chl-a) adalah pigmen fotosintetik utama yang ditemukan pada tanaman, alga, dan bakteri fotosintetik. Di laut, chl-a adalah pigmen yang paling banyak ditemukan pada fitoplankton (mikroorganisme fotosintetik yang membentuk dasar dari rantai makanan laut) dan memainkan peran penting dalam siklus karbon dan oksigen di laut, karena proses fotosintesis yang menghasilkan oksigen terjadi berkat keberadaan pigmen ini. Selain itu, chl-a juga digunakan sebagai indikator kualitas air laut, karena konsentrasinya dapat memberikan petunjuk tentang produktivitas biologis di perairan tersebut. Data chl-a yang digunakan dalam penelitian ini merupakan produk hasil dari model biogeo kimia PISCES (Aumont *et al.*, 2015) dan merupakan bagian dari model OGCM, NEMO.

Persamaan untuk biomassa chl-a (I^{chl}) (dimana I dapat berupa *Pytoplankton* (P) atau *Diatom* (D)) untuk kedua kelompok fitoplankton adalah diparameterisasi menggunakan model foto-adaptif Geider *et al.* (1997):

$$\begin{aligned}\frac{\partial I^{chl}}{\partial t} &= (1 - \delta^I)(12\theta_{min}^{chl} + (\theta_{max}^{chl,I} - \theta_{min}^{chl,I})\rho^{I^{chl}})\mu^I I - m^I \frac{I}{K_m + I} I^{chl} \\ &\quad - sh \times w^I I I^{chl} - \theta^{chl,I} g^Z(I) Z - \theta^{chl,I} g^M(I) M,\end{aligned}\tag{2.6}$$

dengan I adalah kelompok fitoplankton dan $\theta^{chl,I}$ adalah rasio klorofil-ke-karbon dari kelas fitoplankton yang dipertimbangkan, 12 mewakili massa molar karbon, $\rho^{I^{chl}}$ adalah rasio energi yang terasimilasi terhadap energi yang diserap.

Kedalaman lapisan campuran atau MLD dapat dihitung dengan menggunakan temperatur laut, salinitas, atau densitas laut. MLD yang dihitung dengan temperatur dapat ditemukan pada kedalaman laut dengan temperatur yang relatif konstan. Lapisan campuran terbentuk karena adanya pengaruh angin permukaan, gelombang, dan arus yang menyebabkan pencampuran air pada lapisan atas dan membagikan panas ke seluruh lapisan ini. Di bawah lapisan campuran terdapat perubahan temperatur yang cepat seiring dengan peningkatan kedalaman laut, lapisan ini dikenal sebagai termoklin. MLD dapat diestimasi dari kombinasi variabel ambang batas dari profil densitas dan profil temperatur laut 0.2°C (Pers. 2.7) (de Boyer Montegut *et al.*, 2004). Kriteria variabel dalam densitas sesuai dengan variasi temperatur lokal sebesar 0.2°C dari temperatur pada kedalaman 10 meter (Pers. 2.8). Hasil MLD akhir adalah nilai minimum dari MLD yang dihitung dari kriteria kepadatan dan MLD dari kriteria temperatur. Untuk kedua kriteria, kepadatan dan temperatur, hasil MLD menghasilkan interpolasi linear ke kedalaman di mana ambang batas tercapai.

$$MLD = \text{Kedalaman dimana } (\sigma_0 = \sigma_{0_{10m}} + \Delta\sigma_0) \quad (2.7)$$

$$MLD = \text{Kedalaman dimana } (T = T_{10m} + \Delta \pm 0.2^{\circ}\text{C}), \quad (2.8)$$

dengan $\Delta\sigma_0 = \sigma_0(\theta_{10m} - 0.2^{\circ}\text{C}, S_{10m}, P_0) - \sigma_0(\theta_{10m}, S_{10m}, P_0)$.

2.2.3. Fluks Panas Bersih dan Fluks Air Tawar

Fluks panas bersih atau *net heat flux* (NHF) adalah jumlah panas yang masuk atau keluar dari permukaan laut, yang disebabkan oleh perbedaan antara temperatur air laut dan temperatur udara di atasnya. Jika temperatur udara lebih tinggi dari temperatur air laut, maka NHF akan masuk ke laut. Sebaliknya, jika temperatur udara lebih rendah dari temperatur air laut, maka NHF akan keluar dari laut. NHF dapat dihitung sebagai jumlah dari komponen-komponen berikut (Tomita *et al.*, 2021):

$$NHF = SWR + LWR + LHF + SHF, \quad (2.9)$$

dengan $SWR=net\ shortwave\ radiation$, $LWR=net\ long\ wave\ radiation$, $LHF=surface\ latent\ heat\ flux$, dan $SHF=sensible\ heat\ flux$. Dalam penelitian ini, semua aliran panas diasumsikan positif ketika mereka mengarah ke atas, menjauhi permukaan laut ke atmosfer.

Fluks air tawar atau *freshwater flux* (FWF) adalah jumlah air tawar yang masuk atau keluar dari wilayah laut tertentu, termasuk curah hujan, aliran sungai, penguapan, dan es laut. Ketidakseimbangan antara air tawar masuk dan keluar dari wilayah laut dapat berdampak pada sirkulasi laut dan ketersediaan nutrisi bagi organisme laut. FWF dapat dihitung dengan cara sebagai berikut (Tomita *et al.*, 2019):

$$\begin{aligned} FWF &= EVAP - RAIN, \\ EVAP &= LHF/\rho L_e. \end{aligned} \tag{2.10}$$

dengan $EVAP$ =evaporasi dan $RAIN$ =curah hujan atau presipitasi di atas laut. Sedangkan ρ adalah densitas air laut dan L_e adalah vaporisasi panas laten dalam air yang didefinisikan sebagai fungsi dari SST.

2.2.4. Laju Presipitasi dan Tekanan Angin

Laju presipitasi merupakan tingkat curah hujan yang jatuh ke permukaan laut pada suatu wilayah tertentu. Hal ini dipengaruhi oleh faktor-faktor seperti SST, kelembaban udara, dan angin. Laju presipitasi di laut dapat berpengaruh pada ketersediaan air tawar, salinitas, serta pola sirkulasi dan transportasi massa air di dalam laut. Perhitungan laju presipitasi mengikuti Pers. 2.10.

Angin memainkan peran penting dalam mendorong arus permukaan dan juga dalam proses interaksi udara-laut. Sebagian besar proses interaksi udara-laut ditentukan dengan menggunakan tekanan angin (*wind stress*), suatu ukuran transfer momentum yang disebabkan oleh gerakan relatif antara laut dan atmosfer (Chacko *et al.*, 2022). Tekanan angin berdasarkan aerodinamis massal (*bulk-aerodynamic*) dirumuskan sebagai,

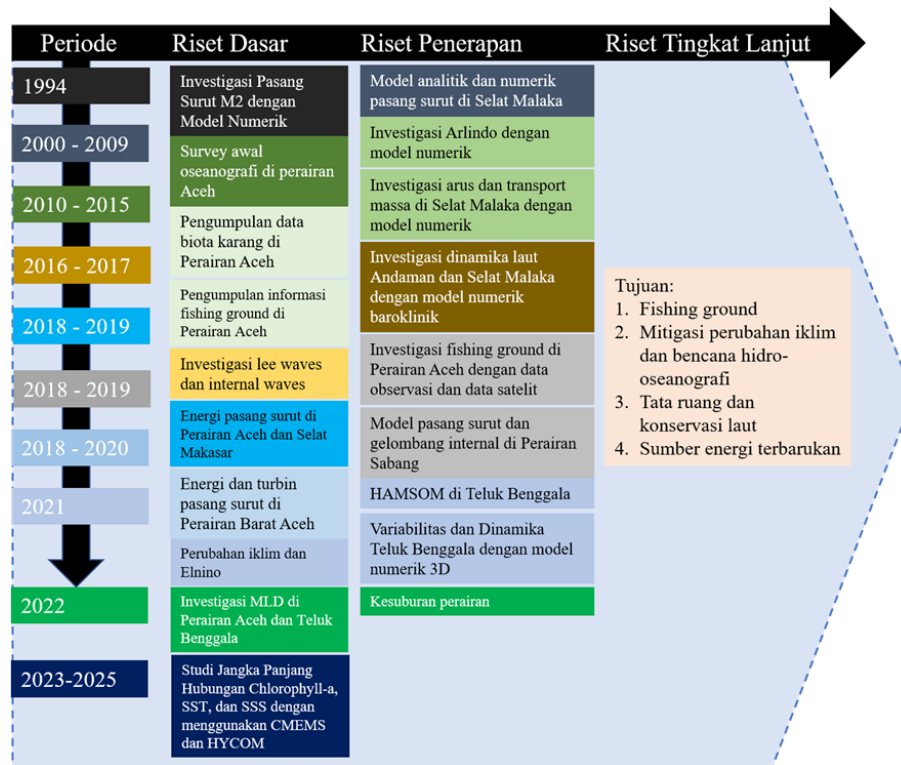
$$\tau = \rho_a C_d U_w^2 \tag{2.11}$$

dengan ρ_a adalah densitas udara ($1.225\text{kg}/\text{m}^3$), C_d koefisien seret (*dimensionless*)

($\approx 1.3 \times 10^{-3}$) dan U_w kecepatan angin.

2.3. Peta Jalan Penelitian

Road Map atau peta jalan penelitian ini dapat dilihat dalam Gambar 2.1



Gambar 2.1. *Road Map* Penelitian

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1. Domain dan Data Penelitian

3.1.1. Domain Penelitian

Penelitian ini mengkaji hubungan antara IOD, parameter oseanografi (arus laut, temperatur laut, salinitas, MLD, Chl-a, fluks air tawar, fluks panas bersih), dan parameter meteorologi (laju presipitasi dan tekanan angin) di Samudera Hindia dengan koordinat ($0^{\circ} - 24.6^{\circ}$ N) dan ($78.2^{\circ} - 105^{\circ}$ E) (lihat Gambar 3.1).

3.1.2. Data Penelitian

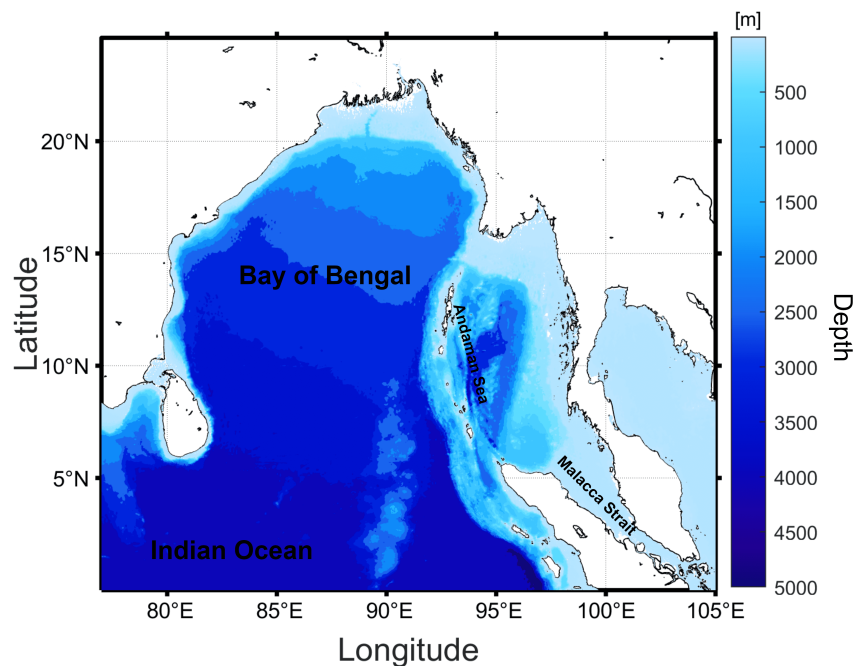
Beberapa data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data DMI, arus laut, temperatur laut, salinitas, MLD, Chl-a, fluks air tawar, fluks panas bersih, laju presipitasi, dan tekanan angin (lihat Tabel 3.1). Data DMI diperoleh dari *National Oceanic and Atmospheric Administration/Physical Sciences Laboratory* (NOAA/PSL) (Saji dan Yamagata, 2003) sedangkan data arus laut, temperatur laut, salinitas, MLD, dan Chl-a dapat diperoleh dari website penyedia data *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS) (Lellouche *et al.*, 2018) dan *HYbrid Coordinate Ocean Model* (HYCOM) (Chassignet *et al.*, 2007). Data lainnya adalah fluks air tawar, fluks panas bersih, laju presipitasi, dan tekanan angin yang bersumber dari *National Centers for Environmental Prediction and the National Center for Atmospheric Research reanalysis I* (NCEP/NCAR) (Kalnay *et al.*, 1996) dan J-OFURO3 yang merupakan generasi ketiga dari *Japanese ocean flux data set* yang menggunakan pengamatan penginderaan jarak jauh (Tomita *et al.*, 2019).

Tabel 3.1. Rangkuman data penelitian

No	Data	Periode	Sumber	Referensi
1	DMI	1994-2021	NOAA/PSL	(Saji dan Yamagata, 2003)
2	Arus laut	1994-2021	CMEMS/HYCOM	(Lellouche <i>et al.</i> , 2018; Chassignet <i>et al.</i> , 2007)
3	Temperatur laut	1994-2021	CMEMS/HYCOM	(Lellouche <i>et al.</i> , 2018; Chassignet <i>et al.</i> , 2007)
4	Salinitas	1994-2021	CMEMS/HYCOM	(Lellouche <i>et al.</i> , 2018; Chassignet <i>et al.</i> , 2007)
5	MLD	1994-2021	CMEMS	(Lellouche <i>et al.</i> , 2018)
6	Chl-a	1994-2021	CMEMS	(Lellouche <i>et al.</i> , 2018)
7	Fluks air tawar	1994-2017	J-OFURO3	(Tomita <i>et al.</i> , 2019)
8	Fluks panas bersih	1994-2017	J-OFURO3	(Tomita <i>et al.</i> , 2019)
9	Laju presipitasi	1994-2021	NCEP/NCAR	(Kalnay <i>et al.</i> , 1996)
10	tekanan angin	1994-2021	NCEP/NCAR	(Kalnay <i>et al.</i> , 1996)

3.1.3. Pengumpulan Data

Data dalam Tabel 3.1 merupakan data yang tersedia secara gratis dan bersifat terbuka. Data ini dapat diunduh secara langsung pada website penyedia data ataupun menggunakan kode skrip. Kode skrip yang digunakan untuk mengunduh data dengan bahasa *Shell script* (terminal Linux) dan Python disajikan dalam Lampiran 1.



Gambar 3.1. Peta batimetri Samudera Hindia, diperoleh dari SRTM30+ (Becker *et al.*, 2009). Warna dalam peta menunjukkan kedalaman 0-5000 m sedangkan pulau digambarkan tanpa warna.

3.2. Analisis Data

3.2.1. Model Musiman

Data jangka panjang dapat dianalisis dengan menggunakan analisis deret waktu, sebagai contoh analisis model musiman, yang bertujuan untuk menganalisis kemungkinan adanya pola musiman yang berulang dalam periode tertentu pada data tersebut. Monsun merupakan penyebab utama perubahan IOD, parameter oseanografi seperti arus laut, temperatur laut, salinitas, MLD, Chl-a, fluks air tawar, dan fluks panas bersih, serta parameter meteorologi seperti laju presipitasi dan angin. Penelitian ini akan menganalisis parameter-parameter tersebut dengan menggunakan model musiman yang didasarkan pada pola kejadian monsun. Model musiman ini digunakan untuk mengamati pola periodik dan memprediksi parameter-parameter berdasarkan keteraturan mereka. Dengan cara ini, akan diketahui apakah parameter yang diteliti mengikuti pola monsun yang terjadi, apakah terjadi pergeseran bulanan pada masing-masing parameter dalam model musiman yang dibangun, serta apakah parameter-parameter tersebut mengikuti pola monsun yang sama.

Beberapa penelitian yang menggunakan model musiman adalah Haridhi *et al.* (2016) yang meneliti tentang hubungan antara SST dan *net deployment* (ND) - penyebaran jaring nelayan pukat cincin tradisional. Ikhwan *et al.* (2022) dalam penelitiannya mengkaji tentang MLD di Laut Andaman (AS) menggunakan data SSS dari model 3-D *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS).

Setiap fungsi periodik dapat diuraikan menjadi penjumlahan gelombang sinus dan kosinus. Persamaan terkait hal ini disebut juga sebagai deret Fourier atau model Harmonik. Secara matematis hal ini dapat dituliskan sebagai (Goela *et al.*, 2016; Hyndman dan Athanasopoulos, 2018)

$$y = \alpha + \sum_{k=1}^N \left[\beta_k \sin\left(\frac{2\pi kt}{m}\right) + \gamma_k \cos\left(\frac{2\pi kt}{m}\right) \right] + \epsilon, \quad (3.1)$$

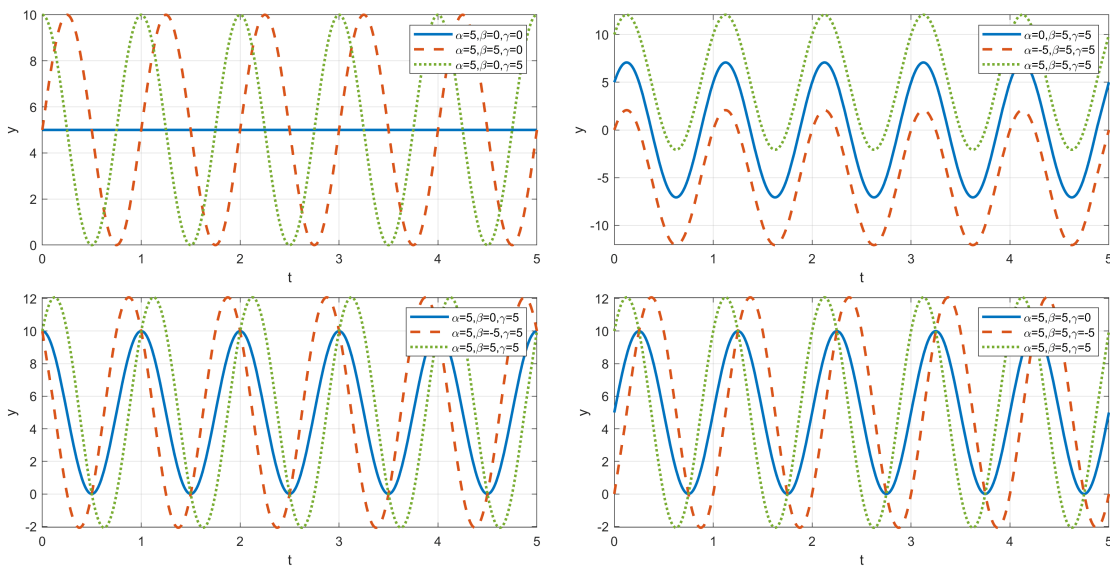
dengan $\alpha, \beta_k, \gamma_k, k$, dan m adalah konstanta pergeseran vertikal, koefisien komponen sinus, koefisien komponen kosinus, ordo atau frekuensi gelombang sinus dan kosinus, dan periode fungsi. Bentuk sederhana dari Pers. 3.1 dapat dituliskan sebagai persamaan

siklus musiman (Crawley, 2012)

$$y = \alpha + \beta \sin(2\pi t) + \gamma \cos(2\pi t) + \epsilon, \quad (3.2)$$

dengan α , β , dan γ adalah konstanta pergeseran vertikal, amplitudo dari gelombang sinus, dan amplitudo dari gelombang kosinus. Dalam persamaan ini, t adalah waktu dan ϵ adalah elemen residual yang mewakili komponen *white-noise* tidak beraturan dalam proses pengambilan data. Parameter-parameter yang tidak diketahui, yaitu α , β , dan γ , diperkirakan menggunakan metode kuadrat terkecil (*ordinary least squares*) (Goela *et al.*, 2016).

Gambar 3.2 merupakan ilustrasi persamaan 3.2 untuk nilai α , β dan γ yang berbeda. Nilai α yang berbeda mempengaruhi posisi kurva terhadap sumbu-y. Sedangkan nilai β dan γ yang berbeda mempengaruhi posisi kurva terhadap sumbu-x.



Gambar 3.2. Ilustrasi persamaan model musiman.

3.2.2. Analisis Korelasi

Analisis korelasi berfungsi sebagai alat eksplorasi data dan pembuatan hipotesis dalam menentukan hubungan antara parameter yang diteliti. Dalam penelitian ini, analisis korelasi digunakan untuk mengukur kekuatan (nilai koefisien korelasi) dan arah (positif/negatif) hubungan antara indeks IOD dengan parameter lainnya, serta untuk menentukan signifikansi koefisien korelasi tersebut.

Analisis korelasi mempelajari hubungan linier antara variabel/parameter yang diteliti. Jika terdapat hubungan antara dua karakteristik, langkah selanjutnya adalah mengevaluasi apakah variabel pertama dapat digunakan untuk memprediksi variabel kedua melalui analisis regresi. Kekuatan dari korelasi ditentukan berdasarkan koefisien korelasi (R), yang bervariasi antara -1 dan +1. Berdasarkan Schober *et al.* (2018), jika $R \in [0.00, 0.10]$ maka korelasi diabaikan. Jika $R \in [0.10, 0.39]$ maka korelasi lemah. Jika $R \in [0.40, 0.69]$ maka korelasi kuat. Jika $R \in [0.90, 1.00]$ maka korelasi sangat kuat. Sementara itu, arah dari korelasi dapat berupa korelasi positif atau korelasi negatif. Korelasi positif terjadi jika nilai variabel pertama berbanding lurus dengan variabel kedua. Sedangkan korelasi negatif terjadi jika nilai variabel pertama berbanding terbalik dengan variabel kedua. Persamaan koefisien korelasi dapat dituliskan sebagai berikut (Hidayat *et al.*, 2023; Haditjar *et al.*, 2020; Zhao *et al.*, 2022).

- Korelasi Pearson

$$R = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum (x_i - \bar{x})^2 \sum (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (3.3)$$

dengan x_i, y_i adalah variable yang digunakan untuk menghitung koefisien korelasi dengan i adalah indeks data. Sedangkan \bar{x} dan \bar{y} adalah rata-rata. Analisis korelasi Pearson merupakan korelasi linear antara variabel yang berukuran metrik.

- Korelasi Spearman

$$R_s = 1 - \frac{6 \cdot \sum d_i^2}{n \cdot (n^2 - 1)}, \quad (3.4)$$

dengan n adalah jumlah kasus dan d_i adalah perbedaan peringkat antara dua variabel. Korelasi Spearman adalah pendamping non-parametrik dari korelasi Pearson.

Untuk menggunakan korelasi Pearson, variabel harus terdistribusi secara normal dan harus terdapat hubungan linear antara variabel-variabel tersebut. Distribusi normal dapat diuji baik secara analitis maupun grafis dengan menggunakan plot QQ (*Quantile-Quantile plot*) sedangkan korelasi linear dapat diperiksa dengan menggunakan scatter plot. Jika kondisi-kondisi ini tidak terpenuhi, maka digunakan korelasi Spearman.

Signifikansi dari koefisien korelasi diuji dengan uji t dengan cara menguji apakah koefisien korelasi secara signifikan berbeda dari nol (uji bebas linier). Dalam hal

ini, hipotesis nol menyatakan tidak ada korelasi antara variabel yang dipertimbangkan, sementara hipotesis alternatif mengasumsikan adanya korelasi. Dengan tingkat signifikansi (α) pada 1% atau 5%, jika nilai $p < 5\%$, hipotesis nol ditolak dan hipotesis alternatif diterima yang berarti bahwa terdapat hubungan antara variabel dalam populasi. Persamaan untuk t-statistik dapat dituliskan sebagai

$$t = \frac{R\sqrt{n-2}}{1-R^2}. \quad (3.5)$$

dengan n ukuran sampel dan R korelasi yang ditentukan dalam sampel.

3.2.3. Analisis Regresi

Analisis regresi memungkinkan pemodelan hubungan antara variabel dependen dan satu atau lebih variabel independen. Dengan analisis regresi, dapat diketahui ukuran pengaruh satu atau lebih variabel terhadap variabel lain serta dapat memprediksi sebuah variabel berdasarkan satu atau lebih variabel lainnya. Hal ini karena analisis regresi memberikan informasi tentang bagaimana nilai variabel dependen berubah jika salah satu variabel independen diubah. Analisis regresi dibedakan sebagai berikut (Angelini, 2019).

- Regresi Linear Sederhana

$$y = a \cdot x + b \quad (3.6)$$

dengan y dan x adalah variabel dependen dan independen, b adalah konstanta titik potong sumbu- y , dan a adalah koefisien regresi yang mengukur pengaruh variabel independen (x) terhadap variabel dependen (y).

- Regresi Linier Berganda

$$y = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + \dots + a_k \cdot x_k + b, \quad (3.7)$$

dengan y dan x_1, x_2, \dots, x_k adalah variabel dependen dan independen, b adalah konstanta titik potong sumbu- y , dan a_1, a_2, \dots, a_k adalah koefisien regresi yang mengukur pengaruh variabel independen (x_1, x_2, \dots, x_k) terhadap variabel

dependen (y).

- Regresi Polinomial

$$y = a_0 + a_1 \cdot x + a_2 \cdot x^2 + \cdots + a_k \cdot x^k, \quad (3.8)$$

dengan y dan x adalah variabel dependen dan independen, k adalah derajat polinomial, dan a_1, a_2, \dots, a_k adalah koefisien regresi yang mengukur pengaruh variabel independen (x) terhadap variabel dependen (y).

Untuk mengevaluasi kualitas prediksi atau penjelasan model regresi terhadap variabel dependen, digunakan dua ukuran utama, yaitu koefisien determinasi R^2 dan kesalahan estimasi standar (*standard estimation error*). Koefisien determinasi R^2 menggambarkan proporsi varian yang dapat dijelaskan oleh variabel independen. Semakin tinggi nilai R^2 , semakin baik kualitas model regresi. Perhitungan R^2 melibatkan perbandingan antara variansi nilai perkiraan ($S_{\hat{y}}$) dan variansi nilai yang diamati (S_y),

$$R^2 = \frac{S_{\hat{y}}}{S_y}. \quad (3.9)$$

Koefisien determinasi R^2 dipengaruhi oleh jumlah variabel independen yang digunakan. Semakin banyak variabel independen yang termasuk dalam model regresi, semakin besar resolusi variansi R^2 . Untuk memperhitungkan hal ini, digunakan R^2 yang disesuaikan (*adjusted R^2*).

$$R_{adj}^2 = 1 - (1 - R^2) \cdot \frac{n - 1}{n - k - 1}. \quad (3.10)$$

dengan n adalah jumlah sampel dan k adalah jumlah variabel independen dalam model regresi. Kesalahan estimasi standar adalah simpangan baku dari kesalahan estimasi. Hal ini memberikan gambaran sejauh mana prediksi berbeda dari nilai yang sebenarnya. Secara grafis, kesalahan estimasi standar adalah penyebaran nilai yang diamati di sekitar garis regresi.

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - k - 1}}, \quad (3.11)$$

dengan y_i adalah nilai yang diamati, \hat{y}_i adalah nilai yang diprediksi dari model regresi,

n adalah jumlah sampel, dan k adalah jumlah variabel independen.

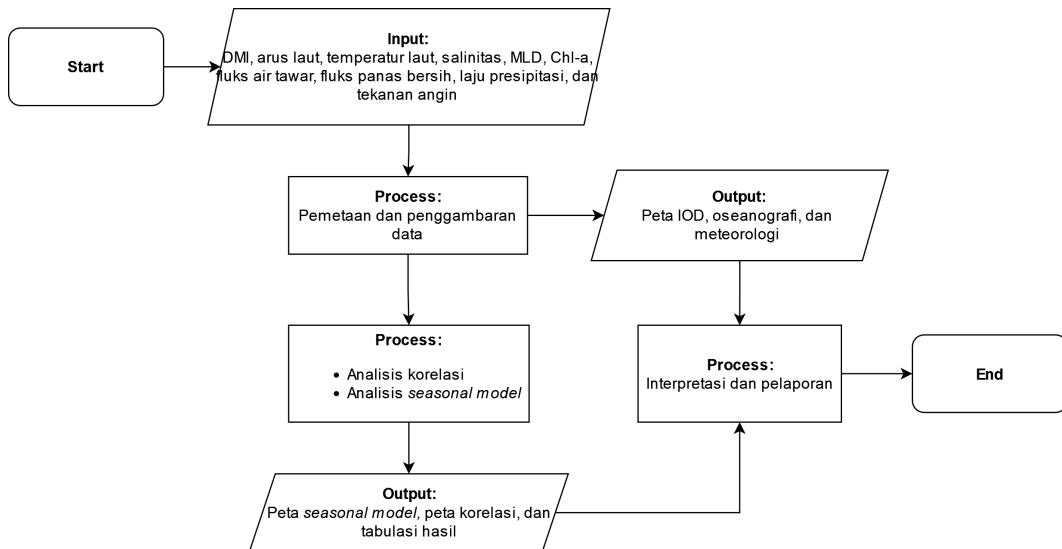
3.3. Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian mengikuti diagram alir pada Gambar 3.3 dan dapat dijelaskan sebagai berikut.

- **Start.** *Software* yang digunakan dalam penelitian ini adalah Matlab dan *R*.
- **Input.** Data penelitian diunduh terlebih dahulu. Adapun data yang digunakan adalah data DMI, arus laut, temperatur laut, salinitas, MLD, Chl-a, fluks air tawar, fluks panas bersih, laju presipitasi, dan tekanan angin.
- **Process.** Data kemudian diolah dengan cara melakukan pemetaan dan penggambaran data. Pada tahap ini akan dilakukan beberapa hal berikut.
 - Prapemrosesan data, yaitu mempersiapkan data sebelum dipetakan dan digambar.
 - Pemetaan data, yaitu proses memetakan atau menetapkan data dari satu format ke format lain atau dari satu lokasi ke lokasi lain dengan tujuan untuk memudahkan pengolahan data, sehingga dapat digunakan untuk tujuan analisis atau pelaporan.
 - Pembersihan data, yaitu proses mengidentifikasi, mengubah, atau menghapus data yang tidak akurat, tidak lengkap, atau tidak relevan dalam kumpulan data.
 - Penggambaran data, yaitu proses menyajikan data dalam bentuk visual, seperti grafik, diagram, atau peta dengan tujuan untuk memudahkan pemahaman dan analisis terhadap data yang kompleks dan memudahkan untuk melihat pola dan tren dari data yang disajikan.
- **Output.** Penggambaran data pada tahap sebelumnya menghasilkan peta IOD, oseanografi, dan meteorologi secara jangka panjang.
- **Process.** Dalam tahap ini akan dilakukan beberapa analisis data, diantaranya model musiman (*seasonal model*) untuk mengidentifikasi pola musiman dan

memprediksi parameter berdasarkan keteraturannya dan analisis korelasi untuk mengukur kekuatan dan arah hubungan antara IOD dengan parameter oseanografi dan meteorologi, serta untuk menentukan signifikansi koefisien korelasi tersebut.

- **Output.** Dari proses analisis data diperoleh peta seasonal model, peta korelasi, dan tabulasi hasil.
- **Process.** Hasil output dari peta-peta IOD, oseanografi, meteorologi, model musiman, korelasi, dan tabulasi kemudian diinterpretasikan dan dituliskan dalam laporan.
- **End.** Penelitian selesai.



Gambar 3.3. Diagram alir penelitian

BAB IV

BIAYA DAN JADWAL PENELITIAN

4.1. Biaya Penelitian

Ringkasan anggaran biaya penelitian selama 3 tahun dapat dilihat pada Tabel 4.1.

Tabel 4.1. Ringkasan anggaran biaya penelitian

No	Jenis Pengeluaran	Biaya yang diusulkan (Rp)
1	Honorarium untuk pelaksana, petugas laboratorium, pengumpul data, pengolah data, dan penganalisis data.	19.500.000
2	Pembelian bahan habis pakai untuk ATK, fotocopy, surat menyurat, penyusunan laporan, cetak, penjilidan, publikasi, pulsa, internet, dan bahan laboratorium.	71.400.000
3	Perjalanan untuk biaya survei/sampling data, seminar/workshop DN-LN, biaya akomodasi, konsumsi, perdiem/lumpsum, transport.	59.100.000
4	Sewa untuk peralatan/mesin/ruang laboratorium, kendaraan, dan peralatan penunjang penelitian lainnya.	0
Total		150.000.000

4.2. Jadwal Penelitian

Jadwal penelitian disusun berdasarkan lama studi yang telah ditempuh dan akan ditempuh. Penelitian diusulkan dalam tiga tahun, dengan rincian kegiatan sebagaimana tertera dalam Tabel 4.2.

Tabel 4.2. Ringkasan jadwal pelaksanaan penelitian

No	Kegiatan	Tahun I											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Studi literatur												
2	Penyusunan proposal												
3	Persiapan data model dan data observasi												
4	Pemrosesan data												
No	Kegiatan	Tahun II											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	Pemrosesan data lanjutan												
6	Hasil dan analisis												
7	Publikasi 1												
8	Studi literatur lanjutan												
9	Hasil dan analisis												
No	Kegiatan	Tahun III											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	Publikasi 2												
11	Studi literatur untuk penulisan disertasi												
12	Penyusunan disertasi												

DAFTAR PUSTAKA

- Akhil, V. P., Lengaigne, M., Krishnamohan, K. S., Keerthi, M. G., dan Vialard, J. (2023, apr). Southeastern Arabian Sea Salinity variability: mechanisms and influence on surface temperature. *Climate Dynamics*. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-023-06765-z> doi: 10.1007/s00382-023-06765-z
- Alam, M., Riaz, S. M., dan Iqbal, M. J. (2021, dec). The impact of trends in South Asia Low pressure center on North Indian Ocean air-sea heat fluxes. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 226, 105786. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364682621002364> doi: 10.1016/j.jastp.2021.105786
- Alsayed, A. Y., Alsaafani, M. A., Al-Subhi, A. M., Alraddadi, T. M., dan Taqi, A. M. (2023, feb). Seasonal Variability in Ocean Heat Content and Heat Flux in the Arabian Gulf. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(3), 532. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2077-1312/11/3/532> doi: 10.3390/jmse11030532
- Angelini, C. (2019). Regression analysis. In S. Ranganathan, M. Gribskov, K. Nakai, dan C. Sch  nbach (Eds.), *Encyclopedia of bioinformatics and computational biology* (p. 722-730). Oxford: Academic Press. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128096338203609> doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-809633-8.20360-9>
- Aumont, O., Eth  , C., Tagliabue, A., Bopp, L., dan Gehlen, M. (2015). Piscesv2: an ocean biogeochemical model for carbon and ecosystem studies. *Geoscientific Model Development*, 8(8), 2465–2513. Retrieved from <https://gmd.copernicus.org/articles/8/2465/2015/> doi: 10.5194/gmd-8-2465-2015
- Becker, J., Sandwell, D., Smith, W., Braud, J., Binder, B., Depner, J., ... others (2009). Global bathymetry and elevation data at 30 arc seconds resolution: Srtm30_plus. *Marine Geodesy*, 32(4), 355–371.
- Chacko, N., Ali, M. M., dan Bourassa, M. A. (2022, mar). Impact of Ocean Currents on Wind Stress in the Tropical Indian Ocean. *Remote Sensing*, 14(7), 1547. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2072-4292/14/7/1547> doi: 10.3390/rs14071547
- Chassignet, E. P., Hurlburt, H. E., Smedstad, O. M., Halliwell, G. R., Hogan, P. J., Wallcraft, A. J., ... Bleck, R. (2007, mar). The HYCOM (HYbrid Coordinate Ocean Model) data assimilative system. *Journal of Marine Systems*, 65(1-4), 60–83. Retrieved from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0924796306002855> doi: 10.1016/j.jmarsys.2005.09.016
- Chu, X., Han, W., Zhang, L., dan Chen, G. (2022, oct). Effects of climate modes on interannual variability of the equatorial currents in the Indian ocean. *Climate Dynamics*, 1–14. Retrieved from <https://link.springer.com/article/>

- 10.1007/s00382-022-06515-7 <https://link.springer.com/10.1007/s00382-022-06515-7> doi: 10.1007/s00382-022-06515-7
- Crawley, M. J. (2012). *The r book*. John Wiley & Sons.
- Dandapat, S., Chakraborty, A., Kuttippurath, J., Bhagawati, C., dan Sen, R. (2021, oct). A numerical study on the role of atmospheric forcing on mixed layer depth variability in the Bay of Bengal using a regional ocean model. *Ocean Dynamics*, 71(10), 963–979. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s10236-021-01475-8> https://www.researchgate.net/profile/Radharani-Sen/publication/354053744_A_numerical_study_on_the_role_of_atmospheric_forcing_on_mixed_layer_depth_variability_in_the_Bay_of_Bengal_using_a_region doi: 10.1007/s10236-021-01475-8
- de Boyer Montegut, C., Madec, G., Fischer, A. S., Lazar, A., dan Iudicone, D. (2004). Mixed layer depth over the global ocean: An examination of profile data and a profile-based climatology. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C12). Retrieved from <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2004JC002378> doi: <https://doi.org/10.1029/2004JC002378>
- Devi, K. N., dan Sarangi, R. K. (2017, oct). Time-series analysis of chlorophyll- a , sea surface temperature, and sea surface height anomalies during 2003-2014 with special reference to El Nino, La Nina , and Indian Ocean Dipole (IOD) Years. *International Journal of Remote Sensing*, 38(20), 5626–5639. Retrieved from <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2017.1343511> <https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/01431161.2017.1343511?needAccess=true&role=button> <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431161.2017.1343511> doi: 10.1080/01431161.2017.1343511
- Eakins, B., dan Sharman, G. (2010). *Volumes of the World's Oceans from ETOPO1 | NCEI*. Retrieved 2022-07-31, from https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/etopo1_ocean_volumes.html
- Geider, R., MacIntyre, H., dan Kana, T. (1997). Dynamic model of phytoplankton growth and acclimation: responses of the balanced growth rate and the chlorophyll a: carbon ratio to light, nutrient-limitation and temperature. *Marine Ecology Progress Series*, 148, 187–200.
- Genda, A., Ikehara, M., Suzuki, A., Hantoro, W. S., dan Inoue, M. (2022). Unique behavior of marine conditions in the Java Sea reconstructed from a 70 yr coral $\delta^{18}\text{O}$ and Sr/Ca record from the Seribu Islands, Indonesia. *GEOCHEMICAL JOURNAL*, 56(3), GJ22007. Retrieved from https://www.jstage.jst.go.jp/article/geochemj/56/3/56_GJ22007/_article/-char/ja https://www.jstage.jst.go.jp/article/geochemj/56/3/56_GJ22007/_pdf https://www.jstage.jst.go.jp/article/geochemj/56/3/56_GJ22007/_article doi: 10.2343/geochemj.GJ22007
- Goela, P. C., Cordeiro, C., Danchenko, S., Icely, J., Cristina, S., dan Newton, A. (2016). Time series analysis of data for sea surface temperature and upwelling

- components from the southwest coast of portugal. *Journal of Marine Systems*, 163, 12–22.
- Gurvan, M., Bourdallé-Badie, R., Chanut, J., Clementi, E., Coward, A., Ethé, C., ... Moulin, A. (2022, March). *Nemo ocean engine*. Zenodo. Retrieved from <https://doi.org/10.5281/zenodo.6334656> doi: 10.5281/zenodo.6334656
- Haditiar, Y., Putri, M. R., Ismail, N., Muchlisin, Z. A., Ikhwan, M., dan Rizal, S. (2020, sep). Numerical study of tides in the Malacca Strait with a 3-D model. *Helijon*, 6(9), e04828. Retrieved from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2405844020316716> doi: 10.1016/j.helijon.2020.e04828
- Haditiar, Y., Putri, M. R., Ismail, N., Muchlisin, Z. A., dan Rizal, S. (2019, nov). Numerical Simulation of Currents and Volume Transport in the Malacca Strait and Part of South China Sea. *Engineering Journal*, 23(6), 129–143. Retrieved from <https://www.engj.org/index.php/ej/article/view/3350/896> doi: 10.4186/ej.2019.23.6.129
- Haridhi, H. A., Nanda, M., Wilson, C. R., dan Rizal, S. (2016, nov). Preliminary study of the sea surface temperature (SST) at fishing ground locations based on the net deployment of traditional purse-seine boats in the northern waters of Aceh - A community-based data collection approach. *Regional Studies in Marine Science*, 8, 114–121. Retrieved from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352485516302146> doi: 10.1016/j.rsma.2016.10.002
- Hidayat, M., Wafdan, R., Ramli, M., Muchlisin, Z., dan Rizal, S. (2023). Relationship between chlorophyll-a, sea surface temperature, and sea surface salinity. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 9(3), 389–402.
- Hyndman, R. J., dan Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: principles and practice*. OTexts.
- Ikhwan, M., Haditiar, Y., Wafdan, R., Ramli, M., Muchlisin, Z. A., dan Rizal, S. (2022, feb). Seasonal variability of mixed layer depth in the Andaman Sea. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 1–10. Retrieved from <https://link.springer.com/10.1007/s13762-022-03976-5> doi: 10.1007/s13762-022-03976-5
- Ikhwan, M., Haditiar, Y., Wafdan, R., Setiawan, I., Marwan, Muchlisin, Z. A., dan Rizal, S. (2019, nov). Wind driven circulation in Makassar Strait during monsoon 2017. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 348(1), 012062. Retrieved from <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/348/1/012062> doi: 10.1088/1755-1315/348/1/012062
- Ikhwan, M., Wafdan, R., Haditiar, Y., Ramli, M., Muchlisin, Z. A., dan Rizal, S. (2021). Simulation and Analysis of Marine Hydrodynamics Based on the El Nino Scenario. *Global Journal of Environmental Science and Management*, 7(4), 543–554. Retrieved from https://www.gjesm.net/article_243711.html doi: <https://doi.org/10.22034/GJESM.2021.04.04>
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., ... Joseph, D. (1996, mar). The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3), 437–471. Re-

- trieved from [http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0477\(1996\)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0477(1996)077%3C0437:TNYRP%3E2.0.CO;2) doi: 10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2
- Lan, K.-W., Evans, K., dan Lee, M.-A. (2013, jul). Effects of climate variability on the distribution and fishing conditions of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the western Indian Ocean. *Climatic Change*, 119(1), 63–77. Retrieved from <http://link.springer.com/10.1007/s10584-012-0637-8> doi: 10.1007/s10584-012-0637-8
- Lellouche, J.-M., Greiner, E., Le Galloudec, O., Garric, G., Regnier, C., Drevillon, M., ... Le Traon, P.-Y. (2018, sep). Recent updates to the Copernicus Marine Service global ocean monitoring and forecasting real-time 1/12° high-resolution system. *Ocean Science*, 14(5), 1093–1126. Retrieved from <https://os.copernicus.org/articles/14/1093/2018/> doi: 10.5194/os-14-1093-2018
- Liu, J., Wang, D., Zu, T., Huang, K., dan Zhang, O. Y. W. (2023, apr). Either IOD leading or ENSO leading triggers extreme thermohaline events in the central tropical Indian Ocean. *Climate Dynamics*, 60(7-8), 2113–2129. Retrieved from <https://link.springer.com/10.1007/s00382-022-06413-y> doi: 10.1007/s00382-022-06413-y
- Lu, B., dan Ren, H.-L. (2020). What caused the extreme indian ocean dipole event in 2019? *Geophysical Research Letters*, 47(11), e2020GL087768. Retrieved from <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020GL087768> (e2020GL087768 2020GL087768) doi: <https://doi.org/10.1029/2020GL087768>
- Luang-on, J., Ishizaka, J., Buranapratheprat, A., Phaksopa, J., Goes, J. I., Kobayashi, H., ... Matsumura, S. (2022, aug). Seasonal and interannual variations of MODIS Aqua chlorophyll-a (2003-2017) in the Upper Gulf of Thailand influenced by Asian monsoons. *Journal of Oceanography*, 78(4), 209–228. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s10872-021-00625-2><https://link.springer.com/10.1007/s10872-021-00625-2> doi: 10.1007/s10872-021-00625-2
- Mandal, S., Susanto, R. D., dan Ramakrishnan, B. (2022, apr). On Investigating the Dynamical Factors Modulating Surface Chlorophyll-a Variability along the South Java Coast. *Remote Sensing*, 14(7), 1745. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1574444><https://www.mdpi.com/2072-4292/14/7/1745/pdf><https://www.mdpi.com/2072-4292/14/7/1745> doi: 10.3390/rs14071745
- Pan, X., Chin, M., Ichoku, C. M., dan Field, R. D. (2018, aug). Connecting Indonesian Fires and Drought With the Type of El Nino and Phase of the Indian Ocean Dipole During 1979-2016. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 123(15), 7974–7988. Retrieved from <http://doi.wiley.com/10.1029/2018JD028402> doi: 10.1029/2018JD028402
- Polonsky, A., dan Torbinsky, A. (2021, dec). The IOD-ENSO Interaction: The Role of the Indian Ocean Currents System. *Atmosphere*, 12(12), 1662. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2073-4433/12/12/1662/htm><https://www.mdpi.com/2073-4433/12/12/1662> doi: 10

- .3390/atmos12121662
- Qiu, Y., Cai, W., Guo, X., dan Ng, B. (2014, may). The asymmetric influence of the positive and negative IOD events on China's rainfall. *Scientific Reports*, 4(1), 4943. Retrieved from <https://www.nature.com/articles/srep04943> doi: 10.1038/srep04943
- Rathore, S., Bindoff, N. L., Ummenhofer, C. C., Phillips, H. E., dan Feng, M. (2020, aug). Near-Surface Salinity Reveals the Oceanic Sources of Moisture for Australian Precipitation through Atmospheric Moisture Transport. *Journal of Climate*, 33(15), 6707–6730. Retrieved from <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/33/15/jcliD190579.xml><http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/JCLI-D-19-0579.1> doi: 10.1175/JCLI-D-19-0579.1
- Reynolds, R. W., Rayner, N. A., Smith, T. M., Stokes, D. C., dan Wang, W. (2002). An improved in situ and satellite sst analysis for climate. *Journal of Climate*, 15(13), 1609 - 1625. Retrieved from https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/15/13/1520-0442_2002_015_1609_aiisas_2.0.co_2.xml doi: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2002\)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2002)015<1609:AIISAS>2.0.CO;2)
- Rizal, S., Setiawan, I., Boihaki, B., Haditjar, Y., Iskandar, T., dan Sugianto, S. (2018, dec). Simulation of current using a two-dimensional numerical model in the Aceh Barat Daya waters, Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 216(1), 012019. Retrieved from <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/216/1/012019> doi: 10.1088/1755-1315/216/1/012019
- Rizal, S., Setiawan, I., Wahid, M. A., dan Musman, M. (2010). Currents Simulation in the Malacca Straits by Using Three-Dimensional Numerical Model (Simulasi Arus di Selat Melaka Menggunakan Model Berangka Tiga Dimensi). *Sains Malaysiana*, 39(4), 519–524.
- Sadhukhan, B., Chakraborty, A., dan Kumar, A. (2021, mar). Role of external forcing on the seasonal and interannual variability of mixed layer depth over the Bay of Bengal using reanalysis datasets during 1980-2015. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 93, 101200. Retrieved from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0377026520301585> doi: 10.1016/j.dynatmoce.2020.101200
- Saji, N. H., Goswami, B. N., Vinayachandran, P. N., dan Yamagata, T. (1999, sep). A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 401(6751), 360–363. Retrieved from <https://www.nature.com/articles/43854><http://www.nature.com/articles/43854> doi: 10.1038/43854
- Saji, N. H., dan Yamagata, T. (2003). Structure of SST and surface wind variability during Indian Ocean Dipole mode events: COADS observations. *Journal of Climate*, 16(16), 2735–2751. Retrieved from https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/16/16/1520-0442_2003_016_2735_sosasw_2.0.co_2.xml doi: 10.1175/1520-0442(2003)016<2735:SOSASW>2.0.CO;2
- Sari, Q., Utari, P., Setiabudidaya, D., Yustian, I., Siswanto, E., dan Iskandar, I. (2020, jan). Surface chlorophyll-a variations in the Southeastern Tropical

- Indian Ocean during various types of the positive Indian Ocean Dipole events. *International Journal of Remote Sensing*, 41(1), 171–184. Retrieved from <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2019.1637962><https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431161.2019.1637962> doi: 10.1080/01431161.2019.1637962
- Sattar, A. M., dan Cheung, K. K. (2019, nov). Comparison between the active tropical cyclone seasons over the Arabian Sea and Bay of Bengal. *International Journal of Climatology*, 39(14), 5486–5502. Retrieved from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/joc.6167><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/joc.6167><https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/joc.6167> doi: 10.1002/JOC.6167
- Schober, P., Boer, C., dan Schwarte, L. A. (2018). Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. *Anesthesia & analgesia*, 126(5), 1763–1768.
- Setiawan, R. Y., Wirasatriya, A., Hernawan, U., Leung, S., dan Iskandar, I. (2020, jan). Spatio-temporal variability of surface chlorophyll-a in the Halmahera Sea and its relation to ENSO and the Indian Ocean Dipole. *International Journal of Remote Sensing*, 41(1), 284–299. Retrieved from <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/01431161.2019.1641244><https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01431161.2019.1641244> doi: 10.1080/01431161.2019.1641244
- Shunmugapandi, R., Gedam, S., dan Inamdar, A. B. (2022, oct). Impact of Indian Ocean Dipole Events on Phytoplankton Size Classes Distribution in the Arabian Sea. *Oceans*, 3(4), 480–493. Retrieved from <https://www.mdpi.com/2673-1924/3/4/32> doi: 10.3390/oceans3040032
- Simanjuntak, F., dan Lin, T.-H. (2022, mar). Monsoon Effects on Chlorophyll-a, Sea Surface Temperature, and Ekman Dynamics Variability along the Southern Coast of Lesser Sunda Islands and Its Relation to ENSO and IOD Based on Satellite Observations. *Remote Sensing*, 14(7), 1682. Retrieved from <https://www.mdpi.com/1569066><https://www.mdpi.com/2072-4292/14/7/1682/pdf><https://www.mdpi.com/2072-4292/14/7/1682> doi: 10.3390/rs14071682
- Sun, Q., Du, Y., Zhang, Y., Feng, M., Chowdary, J. S., Chi, J., ... Yu, W. (2019, may). Evolution of Sea Surface Salinity Anomalies in the Southwestern Tropical Indian Ocean During 2010-2011 Influenced by a Negative IOD Event. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(5), 3428–3445. Retrieved from <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018JC014580><https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdfdirect/10.1029/2018JC014580><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2018JC014580> doi: 10.1029/2018JC014580
- Sun, Q., Zhang, Y., Du, Y., dan Jiang, X. (2022, nov). Asymmetric Response of Sea Surface Salinity to Extreme Positive and Negative Indian Ocean Dipole in the Southern Tropical Indian Ocean. *Jo-*

- Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(11). Retrieved from <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2022JC018986>https://www.researchgate.net/profile/Qiwei-Sun-3/publication/364727966_Asymmetric_response_of_sea_surface_salinity_to_extreme_positive_and_negative_Indian_Ocean_Dipole_in_the_southern_tr doi: 10.1029/2022JC018986
- Thushara, V., dan Vinayachandran, P. N. (2020, jul). Unprecedented Surface Chlorophyll Blooms in the Southeastern Arabian Sea During an Extreme Negative Indian Ocean Dipole. *Geophysical Research Letters*, 47(13), e2019GL085026. Retrieved from <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019GL085026> doi: 10.1029/2019GL085026
- Tomita, H., Hihara, T., Kako, S., Kubota, M., dan Kutsuwada, K. (2019). An introduction to J-OFURO3, a third-generation Japanese ocean flux data set using remote-sensing observations. *Journal of Oceanography*, 75(2), 171–194. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/s10872-018-0493-x> doi: 10.1007/s10872-018-0493-x
- Tomita, H., Kutsuwada, K., Kubota, M., dan Hihara, T. (2021, feb). Advances in the Estimation of Global Surface Net Heat Flux Based on Satellite Observation: J-OFURO3 V1.1. *Frontiers in Marine Science*, 8, 8. Retrieved from <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2021.612361/full> doi: 10.3389/fmars.2021.612361
- Valsala, V., Sreeush, M. G., dan Chakraborty, K. (2020, nov). The IOD Impacts on the Indian Ocean Carbon Cycle. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 125(11). Retrieved from <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2020JC016485><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2020JC016485> doi: 10.1029/2020JC016485
- Wahiduzzaman, M., Cheung, K., Luo, J.-J., Bhaskaran, P. K., Tang, S., dan Yuan, C. (2022, feb). Impact assessment of Indian Ocean Dipole on the North Indian Ocean tropical cyclone prediction using a Statistical model. *Climate Dynamics*, 58(3-4), 1275–1292. Retrieved from <https://link.springer.com/10.1007/s00382-021-05960-0> doi: 10.1007/s00382-021-05960-0
- Xing, H., Wang, W., Wang, D., dan Xu, K. (2022, jun). Roles of Equatorial Ocean Currents in Sustaining the Indian Ocean Dipole Peak. *Journal of Ocean University of China*, 21(3), 622–632. Retrieved from <https://link.springer.com/10.1007/s11802-022-4864-y> doi: 10.1007/s11802-022-4864-y
- Zhang, L., dan Han, W. (2021, oct). Indian Ocean Dipole leads to Atlantic Nino. *Nature Communications*, 12(1), 5952. Retrieved from <https://www.nature.com/articles/s41467-021-26223-w> doi: 10.1038/s41467-021-26223-w
- Zhang, Q., Gu, X., Singh, V. P., Liu, L., dan Kong, D. (2016, apr). Flood-induced agricultural loss across China and impacts from climate indices. *Global and Planetary Change*, 139, 31–43. Retrieved from <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0921818115300801> doi: 10.1016/j.gloplacha.2015.10.006
- Zhang, Y., Li, J., Zhao, S., Zheng, F., Feng, J., Li, Y., dan Xu, Y. (2020,

- sep). Indian Ocean tripole mode and its associated atmospheric and oceanic processes. *Climate Dynamics*, 55(5-6), 1367–1383. Retrieved from <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-020-05331-1><https://link.springer.com/10.1007/s00382-020-05331-1> doi: 10.1007/s00382-020-05331-1
- Zhang, Z., Wang, J., dan Yuan, D. (2022, jun). Mixed Layer Salinity Balance in the Eastern Tropical Indian Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 127(6). Retrieved from <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/2021JC018229><https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2021JC018229> doi: 10.1029/2021JC018229
- Zhao, G., Ding, W., Tian, J., Liu, J., Gu, Y., Shi, S., ... Sun, N. (2022). Spearman rank correlations analysis of the elemental, mineral concentrations, and mechanical parameters of the lower cambrian niutitang shale: A case study in the fenggang block, northeast guizhou province, south china. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 208, 109550.

Lampiran 1. Kode Skrip untuk Mengunduh Data

Kode yang digunakan untuk memperoleh data HYCOM sebagai berikut

```
1 #Kode berikut menggunakan bahasa Shell Scripting (terminal linux)
2 #Syntax untuk mendownload data variabel HYCOM
3 #Sesuaikan akronim nama, tahun, dan koordinat: #AKRONIM, #TAHUN, #
  KOORDINAT
4
5 #Eksperimen HYCOM: GOFs 3.1: 41-layer HYCOM + NCODA Global 1/12°
  Analysis, cakupan waktu: 2014-July to Present
6 for k in {01..12}; do for i in {01..31}; do for j in 00 03 06 09 12
  15 18 21; do wget -O HYCOM_#AKRONIM_months_${k}_days_${i}_hours_${
  j}.nc4 "https://ncss.hycom.org/thredds/ncss/GLBy0.08/expt_93.0?
  var=#AKRONIM&north=#KOORDINAT&west=#KOORDINAT&east=#KOORDINAT&
  south=#KOORDINAT&disableProjSubset=on&horizStride=1&time=#TAHUN-${
  k}-${i}T${j}%3A00%3A00Z&vertCoord=&addLatLon=true&accept=netcdf4
  "; done; done; done
7
8 #Eksperimen HYCOM: GOFs 3.1: 41-layer HYCOM + NCODA Global 1/12°
  Reanalysis, cakupan waktu: 1994-01-01 to 2015-12-31
9 for k in {01..12}; do for i in {01..31}; do for j in 00 03 06 09 12
  15 18 21; do wget -O HYCOM_#AKRONIM_months_${k}_days_${i}_hours_${
  j}.nc4 "http://ncss.hycom.org/thredds/ncss/GLBv0.08/expt_53.X/
  data/#TAHUN?var=#AKRONIM&north=#KOORDINAT&west=#KOORDINAT&east=#
  KOORDINAT&south=#KOORDINAT&disableProjSubset=on&horizStride=1&
  time=#TAHUN-${k}-${i}T${j}%3A00%3A00Z&vertCoord=&addLatLon=true&
  accept=netcdf4"; done; done; done
```

Kode yang digunakan untuk memperoleh data NEMO/CMEMS sebagai berikut

```
1 #Kode berikut menggunakan bahasa Python
2 #Syntax untuk mendownload data variabel CMEMS
3 #Sesuaikan akronim nama, tahun, dan koordinat
4
5 #Untuk data arus, temperatur, salinitas, MLD
6 #Eksperimen CMEMS: GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024 (Analysis and
  Forecast), cakupan waktu: Since 29 Nov 2020
7 python -m motuclient --motu https://nrt.cmems-du.eu/motu-web/Motu --
  service-id GLOBAL_ANALYSISFORECAST_PHY_001_024-TDS --product-id
  cmems_mod_glo_phy_cur_anfc_0.083deg_P1D-m --date-min "2023-03-24
  00:00:00" --date-max "2023-03-26 23:59:59" --depth-min
  0.49402499198913574 --depth-max 3.5 --variable uo --variable vo
  --out-dir <OUTPUT_DIRECTORY> --out-name <OUTPUT_FILENAME> --user
  <USERNAME> --pwd <PASSWORD>
8 #Eksperimen CMEMS: GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030 (Reanalysis),
  cakupan waktu: 1 Jan 1993 to 31 Dec 2020
9 python -m motuclient --motu https://my.cmems-du.eu/motu-web/Motu --
  service-id GLOBAL_MULTIYEAR_PHY_001_030-TDS --product-id
  cmems_mod_glo_phy_my_0.083_P1D-m --date-min "2020-12-31 00:00:00"
  --date-max "2020-12-31 23:59:59" --depth-min 0.49402499198913574
  --depth-max 3.5 --variable bottomT --out-dir <OUTPUT_DIRECTORY>
  --out-name <OUTPUT_FILENAME> --user <USERNAME> --pwd <PASSWORD>
10
11 #Untuk data chl-a
12 #Eksperimen CMEMS: GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_BIO_001_028 (Analysis
  and Forecast), cakupan waktu: Since 4 May 2019
```

```

13 python -m motuclient --motu https://nrt.cmems-du.eu/motu-web/Motu --
    service-id GLOBAL_ANALYSIS_FORECAST_BIO_001_028-TDS --product-id
    global-analysis-forecast-bio-001-028-daily --date-min "2020-12-31
    00:00:00" --date-max "2020-12-31 23:59:59" --depth-min
    0.49402499198913574 --depth-max 3.5 --variable chl --out-dir <
    OUTPUT_DIRECTORY> --out-name <OUTPUT_FILENAME> --user <USERNAME>
    --pwd <PASSWORD>
14 #Eksperimen CMEMS: GLOBAL_MULTIYEAR_BGC_001_029 (Hindcast), cakupan
    waktu: 1 Jan 1993 to 31 Dec 2020
15 python -m motuclient --motu https://my.cmems-du.eu/motu-web/Motu --
    service-id GLOBAL_MULTIYEAR_BGC_001_029-TDS --product-id
    cmems_mod_glo_bgc_my_0.25_P1D-m --date-min "2020-12-31 00:00:00"
    --date-max "2020-12-31 23:59:59" --depth-min 0.5057600140571594
    --depth-max 3.5 --variable chl --out-dir <OUTPUT_DIRECTORY> --out
    -name <OUTPUT_FILENAME> --user <USERNAME> --pwd <PASSWORD>

```

Kode yang digunakan untuk memperoleh data NCEP/NCAR sebagai berikut

```

1 #Kode berikut menggunakan bahasa Shell Scripting (terminal linux)
2 #Syntax untuk mendownload data variabel NCEP
3 #Sesuaikan akronim nama, tahun, dan koordinat
4
5 #Syntax untuk mendownload data NCEP/NCAR
6 for i in {1994..2021}; do wget -O NCEP_AirT_years_${i}.nc4 "https://
    downloads.psl.noaa.gov/Datasets/ncep.reanalysis/surface_gauss/air
    .2m.gauss.${i}.nc"; done; done; done

```

Lampiran 2. Justifikasi Anggaran Penelitian

1. Honorarium				
Honor	Honor/Jam (Rp)	Waktu (Jam/Minggu)	Minggu	Honor per Tahun (Rp)
Teknisi 1	25.000	5	20	2.500.000
Teknisi 2	25.000	5	20	2.500.000
Pengolah data	50.000	6	5	1.500.000
Sekretariat	25.000	5	24	3.000.000
SUB TOTAL (Rp)				9.500.000
2. Pembelian Bahan Habis Pakai				
Material	Justifikasi Pemakaian	Kuantitas	Harga Satuan (Rp)	Harga Peralatan Penunjang (Rp)
ATK	Bahan pendukung	1 paket	10.000.000	10.000.000
Eksternal hardisk	Penyimpanan data mentah dan hasil olah data	4 paket	1.300.000	5.200.000
Print laporan	Pelaporan hasil dan kegiatan penelitian	500 lembar	2.000	1.000.000
Publikasi prosiding konferensi	Biaya 1 paket seminar dan publikasi pada prosiding	1 kali	3.000.000	3.000.000
Fotokopi	Penggandaan data mentah, hasil analisis, dan draft laporan	5000 lembar	250	1.250.000
SUB TOTAL (Rp)				23.800.000
3. Perjalanan				
Material	Justifikasi Perjalanan	Kuantitas	Harga Satuan (Rp)	Biaya per Tahun (Rp)
Transportasi seminar/workshop DN/LN	Transportasi udara dari Banda Aceh ke kota tujuan seminar DN/LN	1 kali PP	14.000.000	14.000.000
Akomodasi penginapan	Penginapan di hotel bintang tiga/empat	3 malam	1.100.000	3.300.000
Konsumsi/uang saku seminar/workshop DN/LN	Konsumsi yang tidak ditanggung oleh hotel dan penyelenggara seminar/workshop DN/LN	3 hari	800.000	2.400.000
SUB TOTAL (Rp)				19.700.000
4. Sewa				
Material	Justifikasi Sewa	Kuantitas	Harga Satuan (Rp)	Biaya per Tahun (Rp)
-	-	-	-	0
SUB TOTAL (Rp)				0
TOTAL ANGGARAN YANG DIPERLUKAN SETIAP TAHUN (Rp)				50.000.000
TOTAL ANGGARAN YANG DIPERLUKAN SELURUH TAHUN (Rp)				150.000.000

Lampiran 3. Dukungan Sarana dan Prasarana Penelitian

Dukungan yang memungkinkan terlaksananya penelitian ini adalah tersedianya saran dan prasarana seperti:

1. Laboratorium Laboratorium Pemodelan Oseanografi Fakultas Kelautan dan Perikanan, Universitas Syiah Kuala, Banda Aceh.
2. Sarana/prasarana umum Ruang diskusi Prodi DMAS USK.

Lampiran 4. Surat Pernyataan Mahasiswa

SURAT PERNYATAAN BEBAS PLAGIAT

Saya yang bertanda tangan di bawah ini,

Nama : Muh. Nur Hidayat

NPM : 2209300070026

Prodi : Doktor Matematika dan Aplikasi Sains

Dengan ini menyatakan bahwa proposal penelitian saya dengan judul:

Aplikasi Model Numerik Tiga Dimensi untuk Simulasi Hidrodinamika Laut

yang diusulkan untuk memenuhi Mata Kuliah Proposal Disertasi (MASP02) pada Program Studi Doktor Matematika dan Aplikasi Sains (DMAS) bersifat original dan bebas plagiat.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia dituntut dan diproses sesuai dengan ketentuan yang berlaku dan kelulusan untuk Mata Kuliah ini akan dibatalkan.

Demikian pernyataan ini dibuat dengan sesungguhnya dan dengan sebenar-benarnya.

Banda Aceh, 15 Juni 2023
Yang menyatakan,

Muh. Nur Hidayat
NPM. 2108201010005