

SKRIPSI

**ANALISIS DINAMIKA ANOMALI TINGGI PERMUKAAN
LAUT DAN SUHU PERMUKAAN LAUT TERHADAP
KEJADIAN ROB DI KOTA SEMARANG PERIODE 2012-2020**

***ANALYSIS OF THE DYNAMICS SEA LEVEL ANOMALIES AND
SEA SURFACE TEMPERATURE ON TIDAL FLOOD
OCCURRENCES IN SEMARANG CITY FROM 2012 TO 2020***



BELVA AURORA DANICA PUTRA

11.21.0012

**PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN METEOROLOGI
SEKOLAH TINGGI METEOROLOGI KLIMATOLOGI DAN GEOFISIKA
TANGERANG**

2025

SKRIPSI

ANALISIS DINAMIKA ANOMALI TINGGI PERMUKAAN LAUT DAN SUHU PERMUKAAN LAUT TERHADAP KEJADIAN ROB DI KOTA SEMARANG PERIODE 2012-2020

ANALYSIS OF THE DYNAMICS SEA LEVEL ANOMALIES AND SEA SURFACE TEMPERATURE ON TIDAL FLOOD OCCURRENCES IN SEMARANG CITY FROM 2012 TO 2020

Diajukan untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar

Sarjana Terapan Meteorologi



BELVA AURORA DANICA PUTRA

11.21.0012

**PROGRAM STUDI SARJANA TERAPAN METEOROLOGI
SEKOLAH TINGGI METEOROLOGI KLIMATOLOGI DAN GEOFISIKA
TANGERANG**

2025

HALAMAN PENGESAHAN
SKRIPSI

**ANALISIS DINAMIKA ANOMALI TINGGI PERMUKAAN LAUT DAN
SUHU PERMUKAAN LAUT TERHADAP KEJADIAN ROB DI KOTA
SEMARANG PERIODE 2012-2020**

Diusulkan oleh

BELVA AURORA DANICA PUTRA
11.21.0012

Telah dipertahankan di depan Tim Penguji dan dinyatakan lulus
pada tanggal 20 Agustus 2025

Susunan Tim Penguji

Pembimbing Utama

Ketua Tim Penguji

Ahmad Fadlan, SST, M.Si
NIP. 199003092010121001

Dr. Aries Kristianto, S.T., M.Si
NIP. 197504071997031001

Anggota Tim Penguji

Avrionesti, M.Si
NIP. 199204022022022001

Tangerang, 20 Agustus 2025

Ketua Program Studi
Sarjana Terapan Meteorologi

Ketua Sekolah Tinggi Meteorologi
Klimatologi dan Geofisika

Dr. Yosafat Donni Haryanto, S.P., M.Si.
NIP. 197612281999031002

Dr. Deni Septiadi, M.Si.
NIP.197809302000121001

PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya, Belva Aurora Danica Putra, NPT. 11.21.0012, menyatakan bahwa skripsi dengan judul “**Analisis Dinamika Anomali Tinggi Permukaan Laut dan Suhu Permukaan Laut terhadap Kejadian Rob di Kota Semarang Periode 2012-2020**” merupakan karya asli saya. Seluruh ide yang ada dalam skripsi ini merupakan hasil penelitian yang saya susun sendiri, dan sepanjang pengetahuan saya tidak terdapat karya atau pendapat orang lain yang saya ambil tanpa dicantumkan sumbernya secara tertulis dalam naskah ini dan/atau dalam daftar pustaka. Selain itu, saya menyatakan bahwa bagian mana pun dari skripsi ini tidak pernah digunakan sebelumnya untuk memperoleh gelar Ahli Madya atau gelar akademik lainnya di perguruan tinggi mana pun. Jika di kemudian hari pernyataan di atas terbukti sebaliknya, saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.

Tangerang, 20 Agustus 2025

Penulis,

Belva Aurora Danica Putra
NPT.11.21.0012

KATA PENGANTAR

Bismillahirrahmanirrahim. Dengan menyebut nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang, segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah Subhanahu wa Ta'ala atas limpahan rahmat, karunia, serta ridha-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi berjudul **“Analisis Dinamika Anomali Tinggi Permukaan Laut dan Suhu Permukaan Laut terhadap Kejadian Rob di Kota Semarang Periode 2012–2020”** dengan baik dan tepat waktu guna untuk memenuhi salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan Meteorologi pada program pendidikan diploma di Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. Shalawat dan salam senantiasa tercurah kepada Nabi Muhammad Shallallahu ‘alaihi wasallam sebagai teladan utama bagi seluruh umat Islam.

Penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bimbingan, arahan, serta bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan penuh rasa hormat dan terima kasih, penulis menyampaikan penghargaan yang sebesar-besarnya kepada:

1. Dr. Deni Septiadi, M.Si., selaku Ketua Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
2. Dr. Yosafat Donni Haryanto, S.P., M.Si., selaku Ketua Program Studi Sarjana Terapan Meteorologi.
3. Bapak Ahmad Fadlan, SST, M.Si., selaku Dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan ilmu, bimbingan, motivasi, serta masukan berharga selama proses penyusunan skripsi ini.
4. Dr. Aries Kristianto, S.T., M.Si. dan Ibu Avrionesti, M.Si., selaku dosen penguji yang telah memberikan kritik serta saran yang membangun demi penyempurnaan penelitian ini.
5. Bapak Adi Mulsandi, S.Si., M.Si. selaku dosen pembimbing akademik dan Ibu Rizki Amalia, S. Si selaku pembina mental.
6. Seluruh dosen dan staf Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika yang telah berbagi ilmu selama penulis menempuh pendidikan.

7. Kedua orang tua tercinta, Bapak Mochammad Chudlari, S.Pd., dan Ibu Siti Muqoyyimah, S.Ag., yang senantiasa memberikan kasih sayang, semangat, motivasi, serta doa yang tiada henti hingga penulis dapat menyelesaikan studi ini.
8. Kedua adik saya tersayang, Wafda Naufi Marva Nuzulia dan Mahza Zevala El Libna, yang senantiasa menjadi motivasi saya untuk menyelesaikan studi ini.
9. Rekan kos, teman-teman kelas Meteorologi 8A, rekan satu bimbingan, serta seluruh angkatan 2021 Adhikari Danadyaksa.
10. Semua pihak yang turut membantu dalam penyusunan skripsi ini yang tidak dapat disebutkan satu per satu.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih memiliki keterbatasan baik dari segi pengetahuan maupun pengalaman. Oleh karena itu, penulis memohon maaf atas segala kekurangan yang ada dan sangat mengharapkan kritik serta saran yang membangun demi perbaikan di masa mendatang. Akhir kata, besar harapan penulis agar karya ini dapat memberikan manfaat dan kontribusi positif bagi pembaca.

Tangerang, 20 Agustus 2025

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
SKRIPSI	i
HALAMAN PENGESAHAN	ii
PERNYATAAN ORISINALITAS	iii
KATA PENGANTAR	iv
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR LAMPIRAN	ix
INTISARI	x
ABSTRACT	xi
 BAB I PENDAHULUAN.....	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian.....	4
1.5 Sistematika Penulisan.....	4
BAB II DASAR TEORI	6
2.1 Tinjauan Pustaka	6
2.2 Landasan Teori	10
2.2.1 Tinggi Permukaan Laut	10
2.2.2 Suhu Permukaan Laut.....	11
2.2.3 Rob	12
2.2.4 ENSO.....	13
2.2.5 IOD.....	17
BAB III METODE PENELITIAN.....	19
3.1 Jenis Penelitian	19
3.2 Prosedur Penelitian	19
3.2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian	19
3.2.2 Data Penelitian	21
3.2.3 Alat Penelitian	22
3.2.4 Teknik Pengolahan Data	23
3.2.5 Teknik Analisis Data.....	23
3.2.6 Diagram Alir Penelitian.....	25
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	26
4.1 Hasil	26
4.1.1 Peta Spasial Anomali Tinggi Muka Laut dan Suhu Muka Laut.....	26
4.1.2 Grafik Perbandingan SLA, SST, IOD, ENSO, dan Rob.....	29
4.2 Pembahasan	35
BAB V PENUTUP.....	38
5.1 Kesimpulan.....	38
5.2 Saran.....	38
 DAFTAR PUSTAKA	 39
LAMPIRAN	42

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 <i>Dipole Mode Index</i>	18
Tabel 3.1 Rincian Waktu dan Wilayah Kejadian Rob	20

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Hipotesis Temperature Profil Laut	11
Gambar 2.2 Sirkulasi Timur Barat Kondisi Normal	15
Gambar 2.3 Sirkulasi Timur Barat Kondisi El Nino	16
Gambar 2.4 Sirkulasi Timur Barat Kondisi La Nina.....	17
Gambar 3.1 Lokasi Penelitian.....	21
Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian.....	25
Gambar 4.1 Peta Spasial Anomali Tinggi Muka Air Laut Semarang	26
Gambar 4.2 Peta Spasial Suhu Permukaan Laut Semarang.....	28
Gambar 4.3 Grafik klimatologi bulanan SST dan SLA di Pantai Semarang	29
Gambar 4.4 Grafik SLA Tahunan di Pantai Semarang	30
Gambar 4.5 Grafik Rata-Rata Musiman SLA dan SST di Pantai Semarang	31
Gambar 4.6 Grafik Rata-Rata Musiman SLA, Indeks Iklim NINO 3.4, DMI di Pantai Semarang.....	32
Gambar 4.7 Grafik Rob di Pantai Semarang.....	33
Gambar 4.8 Grafik Rata-Rata SLA, Rob, Indeks Iklim NINO 3.4, DMI di Pantai Semarang	34

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 <i>Script</i> Pengolahan Data	42
Lampiran 2 <i>Script</i> Pengolahan Peta Spasial SLA-SST.....	42
Lampiran 3 <i>Script</i> Pengolahan Data .nc ke .exc	45

INTISARI

Analisis Dinamika Anomali Tinggi Permukaan Laut dan Suhu Permukaan Laut terhadap Kejadian Rob di Kota Semarang Periode 2012-2020

Oleh

BELVA AURORA DANICA PUTRA

11.21.0012

Kota Semarang merupakan salah satu wilayah pesisir utara Jawa yang rentan mengalami rob, yang kerap terjadi tidak hanya pada musim hujan tetapi juga musim kemarau. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh dinamika anomali tinggi muka laut (*Sea Level Anomaly*/SLA) dan suhu permukaan laut (*Sea Surface Temperature*/SST) terhadap kejadian rob di Kota Semarang selama periode 2012 hingga 2020, serta mengkaji peran fenomena iklim global seperti *El Niño–Southern Oscillation* (ENSO) dan *Indian Ocean Dipole* (IOD) terhadap parameter tersebut. Data yang digunakan meliputi data SLA dan SST dari satelit altimetri serta data indeks NINO 3.4 dan *Dipole Mode Index* (DMI), yang diolah menggunakan Google Colaboratory, sedangkan pengolahan data lanjutan dan grafik dilakukan dengan Microsoft Excel. Hasil penelitian menunjukkan bahwa kenaikan SLA secara signifikan berkontribusi terhadap peningkatan frekuensi rob, terutama saat terjadi ekspansi termal akibat suhu laut yang tinggi. Hubungan SLA dan SST menunjukkan pola yang positif, di mana peningkatan suhu laut menyebabkan kenaikan permukaan laut. Fenomena ENSO, khususnya El Niño, berkontribusi terhadap peningkatan suhu laut dan SLA di Semarang, sehingga memperbesar potensi rob. Sebaliknya, pengaruh IOD terlihat tidak terlalu signifikan terhadap rob di wilayah ini. Dengan demikian, SLA dan SST, yang dipengaruhi oleh dinamika ENSO, dapat dijadikan indikator penting dalam mitigasi risiko banjir rob di wilayah pesisir Semarang.

Kata Kunci: rob, SLA, SST, ENSO, IOD, Semarang

ABSTRACT

Analysis of the Dynamics Sea Level Anomalies and Sea Surface Temperature on Tidal Flood Occurrences in Semarang City From 2012 To 2020

By

BELVA AURORA DANICA PUTRA

11.21.0012

The city of Semarang is one of the coastal areas in northern Java that is vulnerable to tidal flooding (rob), which frequently occurs not only during the rainy season but also in the dry season. This study aims to analyze the influence of Sea Level Anomaly (SLA) and Sea Surface Temperature (SST) dynamics on tidal flooding events in Semarang from 2012 to 2020, as well as to examine the role of global climate phenomena such as El Niño–Southern Oscillation (ENSO) and the Indian Ocean Dipole (IOD) on these parameters. The data used include SLA and SST obtained from altimetry satellites, as well as the Niño 3.4 index and Dipole Mode Index (DMI). The data were processed using Google Colaboratory, while further data processing and graphical analysis were carried out with Microsoft Excel. The results indicate that an increase in SLA significantly contributes to the higher frequency of tidal flooding, particularly during periods of thermal expansion caused by elevated sea temperatures. The relationship between SLA and SST shows a positive pattern, in which higher sea temperatures lead to rising sea levels. The ENSO phenomenon, especially El Niño, contributes to the increase in sea temperature and SLA in Semarang, thereby heightening the potential for tidal flooding. In contrast, the impact of IOD appears to be less significant for tidal flooding in this region. Therefore, SLA and SST, influenced by ENSO dynamics, can serve as important indicators for mitigating tidal flooding risks in the coastal areas of Semarang.

Keywords: *tidal flood, SLA, SST, ENSO, IOD, Semarang*

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Wilayah pesisir merupakan daerah yang sangat rentan terhadap bencana banjir rob (Small dkk., 2003). Diperkirakan sebanyak 10 juta orang di seluruh dunia terdampak banjir rob setiap tahun. Angka ini diproyeksikan meningkat menjadi 50 juta orang pada tahun 2080, didorong oleh perubahan iklim dan peningkatan kepadatan penduduk di kawasan pesisir (Nicholls, 2004). Menurut Triana dan Hidayah, (2020) banjir rob merupakan sebuah fenomena peningkatan level dari permukaan air laut akibat pemanasan global. Sedangkan berdasarkan Marfai, (2011) banjir rob merupakan genangan air di wilayah pesisir yang disebabkan oleh pasang surut air laut. Fenomena ini melibatkan masuknya air asin atau payau ke daratan rendah, sehingga menjadi salah satu isu utama di kawasan pesisir.

Fenomena banjir rob hampir terjadi disepanjang tahun baik selama musim hujan maupun musim kemarau. Hal ini menunjukkan bahwa curah hujan bukanlah faktor utama yang menyebabkan fenomena rob (Chandra dan Supriharjo, 2013). Penyebab utama terjadinya banjir rob adalah meningkatnya permukaan air laut (McGranahan dkk., 2007) dan kemudian diperburuk oleh faktor-faktor seperti reklamasi, dan infrastruktur pengendali banjir yang kurang efektif (Syafitri dan Rochani, 2021). Terjadinya banjir rob dikarenakan pengaruh kenaikan muka air laut dapat disebabkan oleh pasang surut atau faktor eksternal seperti dorongan air, angin yang merupakan fenomena alam yang sering ditemui di laut (Chandra dan Supriharjo, 2013).

Observasi pengukuran pasang surut sejak abad ke-19 menunjukkan bahwa tren kenaikan rata-rata permukaan laut secara global sebesar 1,6–3,2 mm per tahun, meskipun terdapat beberapa variasi regional yang signifikan (Cazenave dan Cozannet, 2014). Selama abad ke-20, kenaikan rata-rata mencapai $1,7 \pm 0,3$ mm per tahun dengan percepatan yang signifikan yang dipengaruhi oleh pencairan es, ekspansi termal air laut, eksploitasi air tanah, dan pembangunan bendungan.

Proyeksi hingga akhir abad ke-21 menunjukkan potensi kenaikan permukaan laut antara 30 hingga 180 cm bergantung pada skenario emisi gas rumah kaca (Nicholls dan Cazenave, 2010). Adanya kenaikan permukaan laut akibat pemanasan global yang disebabkan oleh akumulasi gas rumah kaca telah memicu dampak signifikan pada wilayah pesisir di seluruh dunia. Dampak seperti erosi pantai, banjir ekstrem, dan intrusi air asin diperkirakan akan memburuk, terutama di kawasan pesisir yang padat penduduk, seperti Asia Tenggara dan pulau-pulau kecil yang rendah (Cazenave dan Cozannet, 2014). Selain itu, fenomena iklim global seperti El Niño dan La Niña turut memengaruhi kenaikan permukaan laut, curah hujan, serta tinggi gelombang ekstrem, yang berkontribusi pada kerentanan wilayah pesisir (Mujadida dkk., 2021).

Banjir pesisir atau banjir rob sering terjadi di kota-kota yang berada di kawasan pesisir. Di Indonesia, banjir rob sering melanda daerah pantai, seperti wilayah Jakarta Utara dan Semarang (Chandra dan Supriharjo, 2013). Kota Semarang merupakan kota di pesisir utara Jawa Tengah yang merupakan salah satu kota yang terdampak signifikan oleh banjir rob. Penelitian Egaputra dkk., (2022) menunjukkan bahwa banjir rob di Semarang sering terjadi pada bulan Desember hingga Februari dan Mei hingga Juli, dengan faktor dominan seperti angin kencang, curah hujan tinggi, serta pasang purnama. Penelitian mengenai wilayah yang terdampak rob di Semarang telah dilakukan oleh Ramadhany dkk., (2012) dimana pada tahun 2011, luas genangan rob di Semarang mencapai 1.538,8 hektar, dengan wilayah terdampak terbesar di Kecamatan Semarang Utara (508,25 Ha), Genuk (377,68 Ha), Tugu (257,20 Ha), dan Semarang Barat (237,19 Ha). Pemodelan dampak banjir rob secara lebih luas di wilayah pesisir Jawa Tengah dilakukan oleh Marfai, (2011) menunjukkan bahwa area terdampak rob dapat mencapai lebih dari 16.000 hektar pada skenario kedalaman air tertentu. Selain itu, penelitian Nugraha dan Perbani, (2023) menunjukkan korelasi tinggi antara model *Sea Level Anomaly* (SLA) dengan data pengamatan, sehingga menunjukkan bahwa SLA berpengaruh terhadap kejadian banjir rob. Hal tersebut membuat model SLA dapat dipergunakan untuk memprediksi potensi kejadian banjir rob secara lebih akurat.

Penelitian mengenai prediksi banjir rob di Semarang pernah dilakukan oleh (Efendi dkk., 2021) dengan dan tanpa mempertimbangkan intensitas curah hujan. Hasil dari penelitian menunjukkan bahwa adanya curah hujan memang memberikan pengaruh terhadap luasan terjadinya banjir rob, khususnya jika hujan lebat terjadi. Penelitian perihal adaptasi masyarakat pesisir dengan dampak terjadinya banjir rob pernah dilakukan oleh Adiningsih, (2023) yang berlokasi di Desa Randusanga Kulon di Kabupaten Brebes. Desa Randusanga Kulon menghadapi tantangan serius akibat banjir rob yang hampir terjadi setiap tahun, mengakibatkan kerugian pada masyarakat, lingkungan, dan ekonomi, termasuk kerusakan ekosistem mangrove, abrasi, dan intrusi air laut. Adapun dampak lain banjir rob meliputi kerusakan infrastruktur, perubahan kawasan menjadi kumuh, hingga hambatan ekonomi akibat terganggunya transportasi dan aktivitas pelabuhan (Syafitri dan Rochani, 2021). Mengingat dampak banjir rob yang sangat berpengaruh dengan kondisi wilayah pesisir terutama wilayah yang rawan terjadi rob seperti Kota Semarang, maka peneliti bermaksud mengkaji mengenai kejadian rob Semarang yang telah diinventarisasi oleh Egaputra dkk., (2022) sejak tahun 2012 hingga 2020 dengan mempertimbangkan data suhu permukaan laut, anomali ketinggian muka laut, dan fenomena iklim yang mempengaruhinya.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang ada sebelumnya, maka rumusan masalah penelitian ini adalah bagaimana pengaruh dinamika anomali tinggi muka laut dan suhu muka laut terhadap kejadian rob Kota Semarang selama tahun 2012 hingga 2020?

1.3 Batasan Masalah

Berdasarkan rumusan masalah yang ada, adapun batasan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Fenomena bencana yang menjadi kajian penelitian adalah rob.
2. Lokasi kejadian rob yang dikaji adalah wilayah Kota Semarang dalam rentang waktu 2012-2020.

3. Parameter yang dikaji pada saat rob adalah suhu permukaan laut dan anomali tinggi muka laut.
4. Fenomena iklim yang dikaji terhadap kejadian rob adalah ENSO dan IOD.

1.4 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang ada, adapun tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengaruh dinamika anomali tinggi muka laut dan suhu muka laut terhadap kejadian rob Kota Semarang selama tahun 2012 hingga 2020.

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan mendalam mengenai pengaruh anomali tinggi muka laut, suhu permukaan laut, dan fenomena iklim terkhusus seperti ENSO serta IOD pada kejadian rob di wilayah pesisir Kota Semarang. Informasi yang dihasilkan diharapkan menjadi referensi berharga dan dapat dijadikan bahan pertimbangan untuk penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan kejadian rob di wilayah pesisir. Selain itu, hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan bagi lembaga terkait dalam merumuskan kebijakan dan strategi mitigasi bencana, sehingga dapat meminimalisir dampak kejadian rob serta penanganan dampak rob dapat dilakukan dengan lebih cepat dan akurat.

1.5 Sistematika Penulisan

Penelitian ini ditulis dalam sebuah paparan yang terdiri dari lima bab. Masing-masing bab secara ringkas menjelaskan hal-hal sebagai berikut:

1. BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisi latar belakang, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan dan manfaat penelitian, serta sistematika penulisan.

2. BAB II DASAR TEORI

Bab ini memuat tinjauan pustaka dan landasan teori.

3. BAB III DATA DAN METODE

Bab ini memuat jenis penelitian dan prosedur penelitian.

4. BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

Bab ini menjelaskan hasil dari pengolahan data serta pembahasan dari hasil penelitian.

5. BAB V PENUTUP

Bab ini memuat tentang kesimpulan dari keseluruhan hasil pembahasan skripsi, serta saran yang dapat digunakan untuk pengembangan penelitian di masa mendatang.

BAB II

DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Indonesia, sebagai salah satu negara kepulauan terbesar, menghadapi dampak serius dari kenaikan muka air laut. Penelitian kenaikan muka air laut secara global telah dilakukan oleh Cazenave dan Llovel, (2010). Data dari pengukuran pasang surut digunakan pada penelitian tersebut dikarenakan data pasang surut telah digunakan sejak abad ke-19 untuk memonitor kenaikan muka air laut di berbagai lokasi. Data hasil penginderaan jauh menunjukkan adanya rata-rata kenaikan $3,4 \pm 0,4$ mm/tahun untuk periode 1993–2008 dengan variasi regional yang signifikan. Sekitar 30% dari kenaikan ini disebabkan oleh ekspansi termal lautan, sementara 55% disebabkan oleh pelelehan es daratan. Pelelehan gletser dan lapisan es di Greenland dan Antartika juga memberikan kontribusi besar, dengan peningkatan yang signifikan dalam beberapa dekade terakhir. Selain itu, perubahan simpanan air di daratan, baik karena faktor alamiah maupun antropogenik, memberikan kontribusi terhadap variasi interannual tetapi tidak menunjukkan tren jangka panjang yang jelas.

Penelitian mengenai kenaikan muka air laut juga telah dilakukan di beberapa wilayah Indonesia. Salah satu penelitian kenaikan muka air laut di wilayah Indonesia dilakukan oleh Triana dkk., (2023) dengan menggunakan data satelit altimetri dari tahun 1993 hingga 2021 dengan lokasi penelitian di wilayah Papua. Penggunaan data altimetri pada penelitian didasari oleh cakupan spasial yang luas dan resolusi temporal yang panjang. Data anomali tinggi muka air laut (SLA) berasal dari sistem pemrosesan data multi-misi altimetri DUACS (*Data Unification and Altimeter Combination System*), yang memiliki resolusi spasial 0,25 derajat. Selain itu, data suhu permukaan laut (SST) dan indeks iklim seperti *Southern Oscillation Index* (SOI), *Dipole Mode Index* (DMI), dan *Pacific Decadal Oscillation* (PDO) digunakan untuk memahami hubungan antara variabilitas SLA dengan parameter-parameter iklim. Penelitian dilakukan di enam titik observasi di wilayah pantai utara (Sorong, Waropen, Jayapura) dan pantai selatan Papua (Kaimana, Asmat, Merauke). Hasil penelitian menunjukkan bahwa pantai selatan Papua memiliki

variabilitas musiman SLA yang lebih kuat dibandingkan pantai utara. Selama Desember-Januari-Februari (DJF), SLA cenderung meningkat di perairan selatan, sedangkan pada Juni-Juli-Agustus (JJA) terjadi penurunan akibat fenomena *upwelling* yang intens. Hasil penelitian selanjutnya mengenai tingkat kenaikan permukaan laut dimana tingkat kenaikan permukaan laut rata-rata lebih tinggi di pantai utara (0,95 cm/tahun) dibandingkan pantai selatan (0,64 cm/tahun). Nilai ini jauh lebih tinggi daripada rata-rata global, yaitu 0,34 cm/tahun. Adapun hasil keterkaitan SLA dengan indeks iklim yang ditinjau dari analisis statistik menunjukkan bahwa SLA di pantai utara lebih sensitif terhadap indeks SOI, DMI, PDO dan dibandingkan pantai selatan. Di sisi lain, perubahan SST memiliki pengaruh lebih besar terhadap SLA di pantai selatan. Pada penelitian tersebut juga dilakukan proyeksi kenaikan tinggi muka air laut Papua di tahun 2100 yang diproyeksikan naik hingga 0,72 meter di pantai utara dan 0,51 meter di pantai selatan, sejalan dengan skenario laporan IPCC 2021. Adapun kesimpulan penelitian tersebut yaitu mengungkapkan bahwa variabilitas SLA di Papua dipengaruhi oleh faktor musiman dan fenomena iklim global. Pantai utara lebih responsif terhadap fenomena iklim, sedangkan pantai selatan lebih dipengaruhi oleh variabilitas musiman yang dipengaruhi oleh SST.

Terdapat penelitian lain mengenai tinggi muka air laut di wilayah Indonesia, khususnya wilayah bagian utara dan selatan Pulau Jawa yang dilakukan oleh Fadlan dkk., (2017). Penelitian tersebut bertujuan untuk menganalisis pengaruh ENSO dan IOD terhadap variabilitas tinggi muka laut di perairan utara dan selatan Pulau Jawa, serta mengidentifikasi area yang paling rentan terhadap perubahan ini. Penelitian dilakukan dengan mengambil enam titik pengamatan yang digunakan di Jakarta, Semarang, Surabaya (pantai utara), Pelabuhan Ratu, Cilacap, dan Prigi (pantai selatan). Pemilihan titik ini didasarkan pada kota-kota besar wilayah pesisir di utara dan selatan Jawa yang dapat mewakili. Data penelitian yang digunakan yaitu altimetri satelit dimana data anomali tinggi muka laut (SLA) diperoleh dari satelit altimetri multi-misi yang diunduh melalui situs AVISO, Indeks ENSO dan IOD dimana Indeks ENSO dihitung menggunakan data anomali suhu permukaan laut di wilayah Niño 3.4, sementara indeks IOD dihitung berdasarkan perbedaan anomali

suhu permukaan laut antara wilayah barat (10°N – 10°S , 50°E – 70°E) dan timur (0° – 10°S , 90°E – 110°E). Data angin permukaan juga digunakan dimana data vektor angin (zonal dan meridional) diunduh dari *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). Analisis keterkaitan antara SLA dan fenomena atmosfer dilakukan dengan membandingkan data SLA pada kondisi normal dengan saat terjadi ENSO dan IOD. Disamping itu, data angin zonal digunakan untuk memahami mekanisme *upwelling* dan *downwelling*. Adapun hasil dan pembahasan penelitian tersebut yaitu mengenai pengaruh ENSO terhadap SLA dimana selama El Niño (ENSO+ 2002), SLA di selatan Jawa mengalami penurunan hingga -0,24 m pada September. Penurunan ini disebabkan oleh peningkatan *upwelling* akibat melemahnya angin pasat, yang menyebabkan massa air hangat bergeser ke timur. Sebaliknya, selama La Niña (ENSO- 2007/2008), SLA meningkat hingga 0,3 m di selatan Jawa pada Maret. Hal ini terjadi karena penguatan angin barat yang membawa massa air dari Pasifik ke perairan Indonesia, menciptakan fenomena *downwelling*. Disamping itu, terdapat pengaruh IOD terhadap SLA dimana fenomena IOD+ (2011) menyebabkan penurunan SLA hingga -0,28 m di selatan Jawa pada September. IOD+ meningkatkan intensitas *upwelling* karena perbedaan suhu yang signifikan antara bagian barat dan timur Samudra Hindia. Sedangkan selama IOD- (2005), SLA di selatan Jawa meningkat hingga 0,13 m pada Juli, meskipun peningkatannya tidak sebesar selama La Niña. Fenomena ini terjadi akibat mekanisme *downwelling* yang diperkuat oleh akumulasi massa air di Samudra Hindia Timur. Pada penelitian ini dikaji pula pola angin zonal dimana pola angin zonal tersebut menjadi faktor penting dalam perubahan SLA. Saat angin timur dominan (El Niño dan IOD+), *upwelling* di selatan Jawa meningkat, menyebabkan penurunan SLA. Sebaliknya, angin barat yang dominan selama La Niña dan IOD- memperkuat *downwelling*, meningkatkan SLA. Kesimpulan dari penelitian tersebut yaitu wilayah selatan Jawa lebih rentan terhadap perubahan SLA dibandingkan wilayah utara. Hal ini disebabkan oleh pengaruh langsung dari fenomena IOD yang berpusat di Samudra Hindia. SLA memiliki hubungan terbalik dengan ENSO dan IOD. IOD+ paling mempengaruhi penurunan SLA, sedangkan La Niña paling mempengaruhi peningkatan SLA. Peningkatan SLA selama La Niña

menunjukkan potensi risiko banjir pesisir (rob), gelombang tinggi, dan curah hujan ekstrem.

Penelitian mengenai SLA juga dikaji lebih lanjut oleh Mujadida dkk., (2021) yang dilakukan di Laut Jawa. Penelitian tersebut menggunakan data dari *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS) yang diolah melalui beberapa tahapan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata kenaikan muka air laut di Laut Jawa mencapai 37,545 mm/tahun sejak 1993. Tren kenaikan tercepat tercatat pada 2015–2016 sebesar 72,313 mm/tahun, sementara tren paling lambat terjadi pada 2002–2005 sebesar 16,7 mm/tahun. Adanya fenomena iklim seperti El Niño dan La Niña juga memengaruhi perubahan tren secara ekstrem dan pernah terjadi pada periode 1996–1998 dan 2010–2016.

Penelitian mengenai kenaikan muka laut di wilayah Pulau Jawa terkhusus di pesisir Semarang pernah dilakukan oleh (Wirasatriya dan Hartoko, 2006) dengan mengkaji komponen dan tipe pasang surut, perkembangan muka laut, kenaikan akibat pemanasan global, serta penurunan tanah di lokasi stasiun pasut di Semarang selama 20 tahun. Data yang digunakan meliputi data pasang surut dan penurunan tanah, yang diperoleh secara sekunder dari instansi terkait. Hasil penelitian menunjukkan bahwa tipe pasang surut di perairan Semarang adalah campuran condong ke ganda, dengan rata-rata kenaikan muka laut sebesar 5,43 cm/tahun. Kenaikan muka laut global akibat pemanasan global di Semarang tercatat sebesar 2,65 mm/tahun. Di sisi lain, laju penurunan tanah di Stasiun Pasut Semarang mencapai 5,165 cm/tahun, yang berkontribusi signifikan terhadap peningkatan relatif muka laut. Data juga mengindikasikan bahwa fenomena banjir rob di Semarang disebabkan oleh kombinasi kenaikan muka laut global dan penurunan tanah, yang memperburuk kondisi kawasan pesisir Semarang.

2.2 Landasan Teori

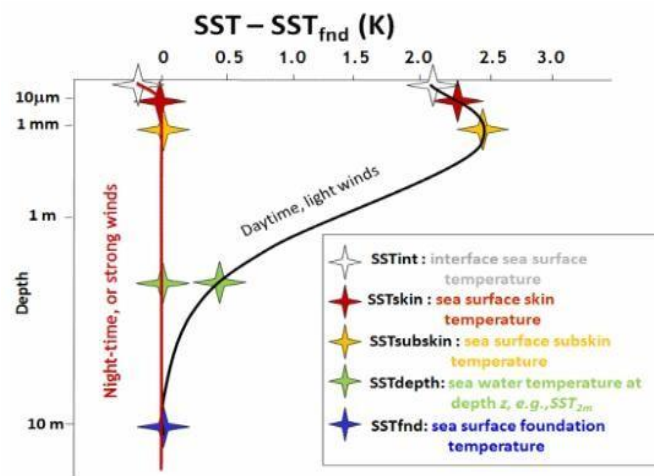
2.2.1 Tinggi Permukaan Laut

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Lyhardo Sidabutar dkk., (2016) tinggi permukaan laut atau *sea level rise* merupakan fenomena kenaikan permukaan laut yang pada umumnya dikaitkan dengan pemanasan global. Sejak puncak zaman es 18.000 tahun yang lalu, permukaan laut telah naik sekitar 120 meter. Kenaikan terbesar terjadi sebelum 6.000 tahun yang lalu. Mulai dari 3.000 tahun yang lalu hingga awal abad ke-19, tingkat kenaikan permukaan laut relatif stabil, hanya sekitar 0,1 hingga 0,2 mm per tahun. Namun, sejak tahun 1900, laju kenaikan ini meningkat menjadi antara 1 hingga 3 mm per tahun. Pada tahun 1992, Satelit Altimetri TOPEX/Poseidon mencatat laju kenaikan sekitar 3 mm per tahun. Terjadinya perubahan kenaikan permukaan laut tersebut merupakan awal dari dampak terjadinya pemanasan global (Watson dkk., 2015).

Berdasarkan pada penelitian Lyhardo Sidabutar dkk., (2016) pemanasan global terjadi akibat peningkatan gas-gas rumah kaca seperti karbon dioksida (CO₂). Pada awalnya, pemanasan ini mengakibatkan lebih banyak air yang menguap ke atmosfer. Karena uap air juga termasuk gas rumah kaca, peningkatan suhu terus berlanjut, menyebabkan konsentrasi uap air di udara semakin meningkat hingga tercapai keseimbangan. Efek rumah kaca yang dihasilkan uap air ini bahkan lebih signifikan dibandingkan dengan yang disebabkan oleh CO₂. Meskipun kandungan air absolut di udara bertambah, kelembaban relatif udara cenderung tetap stabil atau sedikit menurun karena udara menjadi lebih hangat. Peningkatan suhu global juga menyebabkan pencairan es di wilayah kutub dengan kecepatan yang terus meningkat. Ketika es mencair, permukaan daratan atau air di bawahnya menjadi terbuka. Permukaan daratan maupun air, memiliki kemampuan yang lebih rendah dalam memantulkan cahaya dibandingkan es, sehingga menyerap lebih banyak radiasi matahari. Hal ini semakin mempercepat pemanasan global, yang kemudian mempercepat pencairan es lebih lanjut. Siklus berkelanjutan ini akhirnya memicu fenomena kenaikan permukaan laut

2.2.2 Suhu Permukaan Laut

Hanim dkk., (2022) menyatakan bahwa suhu permukaan laut atau *sea surface temperature* (SST) dipengaruhi oleh intensitas penyinaran matahari yang memanaskan permukaan laut. Berdasarkan Arief dkk., (2015) suhu permukaan laut (SPL) dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti paparan sinar matahari, pergerakan arus di permukaan, kondisi awan, fenomena *upwelling*, serta proses divergensi dan konvergensi, khususnya di area muara dan sepanjang garis pantai. Selain itu, faktor-faktor meteorologi seperti curah hujan, tingkat penguapan, kelembaban udara, suhu atmosfer, kecepatan angin, dan intensitas radiasi matahari juga berkontribusi. Suhu air juga dipengaruhi oleh penetrasi cahaya matahari dan tekanan air. Semakin dalam airnya, tekanan akan semakin besar, sementara intensitas cahaya matahari yang masuk semakin berkurang, sehingga suhu air cenderung menurun. Profil vertikal suhu permukaan laut dapat dilihat pada gambar 2.1 berikut.



Gambar 2.1 Hipotesis Temperature Profil Laut (Arief dkk., 2015)

Gambar 2.1 menunjukkan profil temperatur hingga kedalaman 10 meter, menggambarkan kondisi kecepatan angin tinggi pada malam hari (warna merah) dan kecepatan angin rendah pada siang hari (warna hitam). Dari gambar tersebut, terlihat bahwa temperatur air laut terdiri dari beberapa lapisan suhu berikut:

a) *Interface temperature (SSTint)*

Merupakan suhu yang berada di antara lapisan udara dan permukaan laut. Saat ini, suhu ini tidak dapat diukur menggunakan teknologi yang ada.

- b) Suhu permukaan laut kulit (SSTskin)
Didefinisikan sebagai suhu yang diukur oleh radiometer inframerah, yang dapat mendeteksi suhu ini baik pada siang maupun malam hari.
- c) Suhu permukaan laut sub-kulit (SSTsub-skin)
Merupakan suhu di bagian bawah lapisan sub-kulit laut. Secara praktis, SSTsubskin juga dapat diukur menggunakan radiometer *microwave* yang beroperasi pada frekuensi 6–11 GHz.
- d) Suhu permukaan dasar laut (SSTfnd)
Dikenal sebagai suhu yang tidak terpengaruh oleh perubahan suhu harian. SSTfnd hanya bisa diukur menggunakan termometri *in situ* secara langsung (Arief dkk., 2015).

2.2.3 Rob

Menurut KBBI VI Daring, rob merupakan pasang besar (air laut maupun sungai) yang menyebabkan luapan air laut. Menurut Triana dan Hidayah, (2020) banjir rob merupakan sebuah fenomena peningkatan level dari permukaan air laut akibat pemanasan global. Banjir rob terjadi ketika air pasang tinggi menggenangi area daratan pantai atau wilayah yang posisinya lebih rendah dibandingkan permukaan laut. Fenomena banjir rob terjadi hampir disepanjang tahun baik terjadi di musim hujan maupun di musim kemarau. Hal ini menunjukkan bahwa curah hujan bukanlah faktor utama yang menyebabkan fenomena rob (Chandra dan Supriharjo, 2013). Sedangkan berdasarkan Marfai, (2011) banjir rob merupakan genangan air di wilayah pesisir yang disebabkan oleh pasang surut air laut. Fenomena banjir rob melibatkan masuknya air asin atau payau ke daratan rendah, sehingga menjadi salah satu isu utama di kawasan pesisir. Penyebab utama banjir rob meliputi kenaikan permukaan laut akibat pemanasan global dan perubahan iklim, serta penurunan tanah. Selain itu, adanya erosi, sedimentasi, dan perubahan garis pantai turut memengaruhi intensitas dan pola banjir rob di wilayah pesisir. Dampak dari banjir rob sangat luas dan mencakup berbagai aspek.

2.2.4 ENSO

Fenomena *El Niño Southern Oscillation* (ENSO) yang mencakup El Niño dan La Niña, tidak hanya berdampak pada variabilitas iklim dan cuaca di Indonesia, tetapi juga memengaruhi dinamika fenomena laut serta berbagai parameter kelautan di wilayah perairan Indonesia (Fadlan dkk., 2017). ENSO, yang merupakan interaksi antara fenomena El Niño dan La Niña, berasosiasi erat dengan *Southern Oscillation*, sebuah sistem keseimbangan tekanan udara yang ditandai oleh tingginya atau rendahnya tekanan udara di wilayah Indonesia (Pasifik Ekuator Barat) dan Pasifik Ekuator Timur serta intensitas Sirkulasi *Walker* (Trenberth, 1997; Hackert dan Hastenrath, 1986).

Interaksi antara atmosfer dan lautan tercermin melalui perubahan suhu permukaan laut yang melampaui rata-rata klimatologisnya (yakni suhu rata-rata selama sekitar 30 tahun), sehingga menghasilkan anomali atau penyimpangan. Ketika terjadi anomali negatif, suhu permukaan laut lebih rendah dari kondisi normal, sehingga muncul fenomena La Niña. Sebaliknya, jika anomalinya positif, suhu permukaan laut menjadi lebih tinggi dari biasanya, yang memicu fenomena El Niño (Yulihastin, 2010). Fenomena ENSO terbagi ke 3 fase, yaitu netral atau normal, El Niño, dan La Nina. Pembagian kriteria yang menggolongkan fase tersebut tergantung pada *Southern Oscillation Index* (SOI) (Sitompul dan Nurjani, 2013). Indeks variabilitas iklim ENSO juga dapat menggunakan nilai anomali dari suhu permukaan laut (SPL) pada NINO 3.4 (Seprianto dkk., 2016).

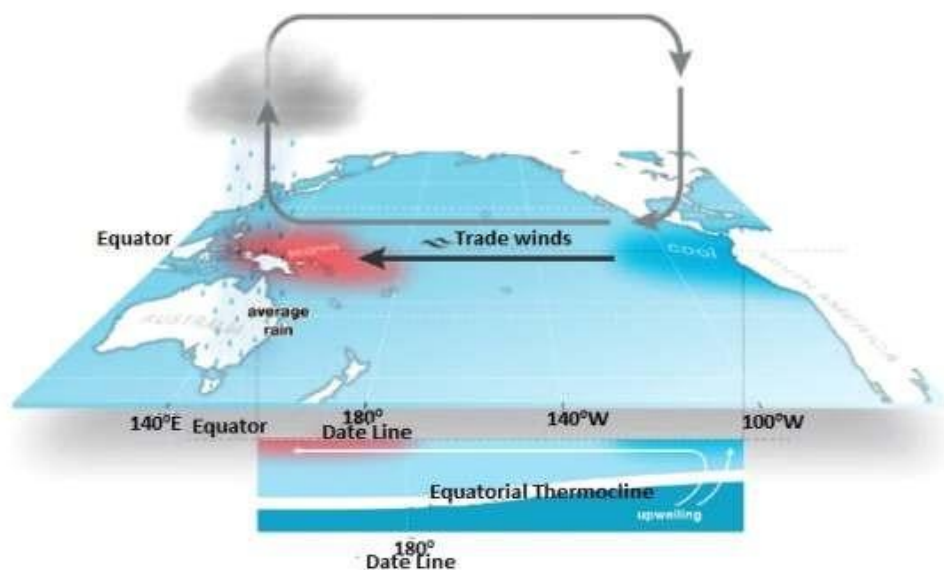
Suatu peristiwa didefinisikan sebagai El Niño apabila nilai anomali SST mencapai atau melebihi $+0,5^{\circ}\text{C}$ selama lima periode tiga bulanan yang saling tumpang tindih (*overlapping*), sedangkan La Niña terjadi apabila anomali SST sama dengan atau lebih kecil dari $-0,5^{\circ}\text{C}$ dengan kriteria periode yang sama. Lebih lanjut, intensitas kejadian dibedakan menjadi empat kategori, yaitu lemah ($0,5-0,9^{\circ}\text{C}$), sedang ($1,0-1,4^{\circ}\text{C}$), kuat ($1,5-1,9^{\circ}\text{C}$), dan sangat kuat ($\geq 2,0^{\circ}\text{C}$) (GGWS, 2019). Dalam penelitian ini, suatu peristiwa dapat dikategorikan ke dalam tingkat intensitas tertentu apabila nilai anomali SST memenuhi atau melampaui ambang batas tertinggi kategori tersebut sekurang-kurangnya selama tiga periode tiga bulanan yang saling tumpang tindih.

Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Tongkukut, (2011) El-Niño tergolong ke salah satu gejala alam yang memiliki pengaruh iklim secara global. El-Niño secara harfiah berarti "anak laki-laki" dan pertama kali diamati oleh nelayan di Peru pada bulan Desember. Fenomena ini ditandai dengan peningkatan suhu laut di wilayah Amerika Selatan, dekat Ekuador, yang kemudian meluas hingga ke perairan Peru. El-Niño merupakan kejadian tidak biasa yang ditandai oleh pemanasan permukaan laut di bagian timur Laut Pasifik Tropis. Pada dasarnya El-Niño adalah fenomena global yang memengaruhi interaksi antara lautan dan atmosfer, dengan dampak signifikan pada sirkulasi atmosfer regional dan lokal. Angin, sebagai pergerakan udara dari daerah bertekanan tinggi ke daerah bertekanan rendah, mengalami perubahan pola selama El-Niño. Saat fenomena ini terjadi, angin cenderung bergerak ke Pantai Barat Peru di Pasifik Timur, yang memiliki tekanan udara rendah. Karena angin memainkan peran penting dalam menentukan pola curah hujan di suatu wilayah, perubahan ini secara langsung memengaruhi distribusi hujan.

Pada tahun 1995, El-Niño menyebabkan kekeringan di Afrika dan Australia. Indonesia, yang terletak di antara 7° LU - 12° LS dan 94° BT - 142° BT, berada di sekitar garis ekuator dan berbatasan dengan Pasifik bagian timur. Posisi geografis ini membuat Indonesia sangat rentan terhadap dampak El-Niño. Sebagai contoh, pada tahun 1997/1998, fenomena ini menyebabkan kekeringan di berbagai wilayah Indonesia. El-Niño juga dikaitkan pada peningkatan suhu muka laut atau SST dari nilai rata-ratanya di sekitar Pasifik Tengah dan Timur sepanjang ekuator. Selama terjadinya El-Niño, suhu permukaan laut di wilayah Pasifik Timur dekat ekuator meningkat melampaui rata-rata normalnya. Peningkatan suhu ini menyebabkan tekanan udara di atas permukaan laut menurun, sehingga udara cenderung naik ke atas dan turun kembali di wilayah yang memiliki suhu lebih dingin.

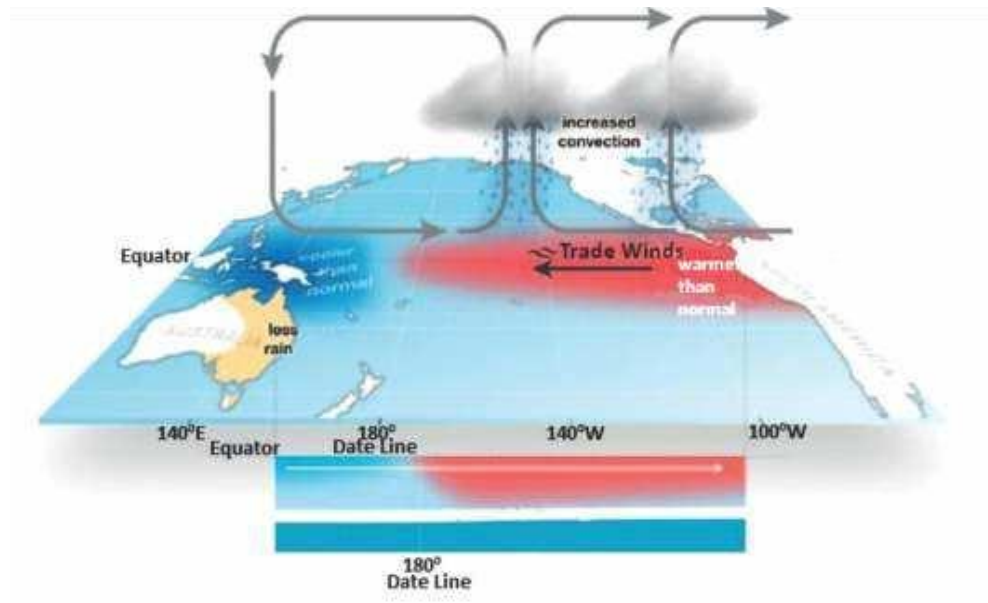
Fenomena La Nina merupakan kebalikan dari fenomena El Nino dimana pada fenomena La Nina suhu permukaan laut di kawasan ekuator Samudera Pasifik menurun melebihi suhu normalnya (Trenberth, 1997). La Nina merupakan fenomena dalam skala global dan mempunyai siklus yang tidak regular. Dampak yang ditimbulkan pada saat La Nina terjadi yaitu meningkatnya intensitas curah

hujan (Aldrian dkk., 2008). Selama periode terjadinya La Nina, angin pasat cenderung menjadi lebih kuat dibandingkan biasanya dikarenakan adanya peningkatan gradien tekanan antara Samudera Pasifik bagian barat dan timur. Hal tersebut membuat proses *upwelling* menjadi lebih kuat di sepanjang daerah pantai Amerika Selatan dan dengan suhu permukaan laut yang lebih dingin di Samudera Pasifik bagian timur, sedangkan pada Samudera Pasifik bagian barat suhunya akan lebih hangat dibandingkan biasanya (Zakir dkk., 2009).



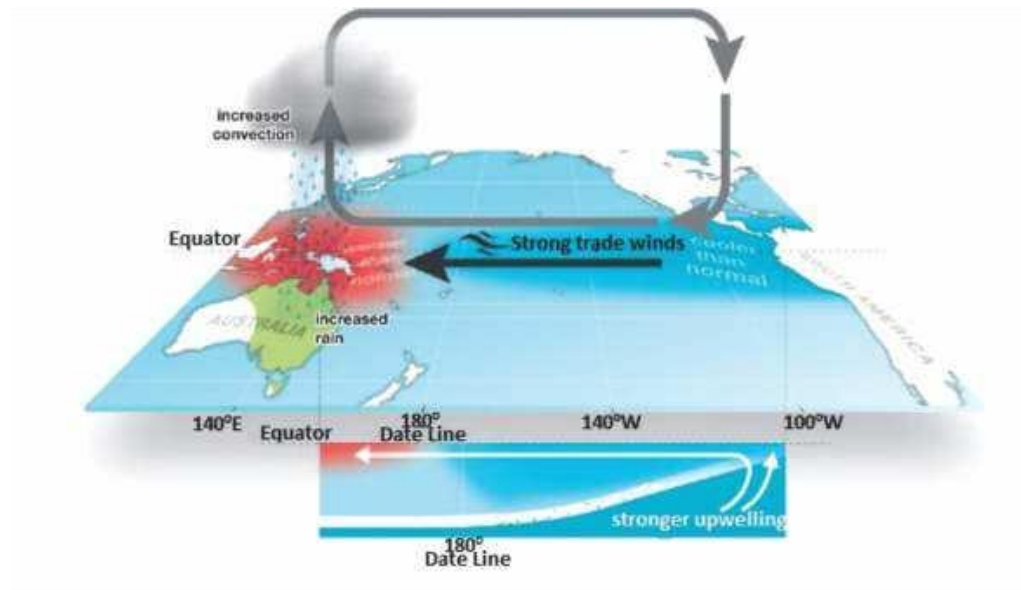
Gambar 2.2 Sirkulasi Timur Barat Kondisi Normal (BOM, 2010)

Gambar 2.2 menunjukkan kondisi sirkulasi Timur Barat saat normal. Suhu permukaan laut pada perairan Indonesia cukup hangat. Keadaan tersebut membuat naiknya massa udara yang berada di wilayah tersebut. Sirkulasi umum yang terjadi di kondisi ini yaitu, angin timuran bergerak menuju ke wilayah Indonesia, dimana massa udara yang berasal dari Pasifik bagian timur bergerak kearah wilayah Indonesia dan membuat wilayah Indonesia menjadi daerah yang konvergensi (Fitria dan Pratama, 2013).



Gambar 2.3 Sirkulasi Timur Barat Kondisi El Nino (BOM, 2010)

Pada saat terjadi El Nino seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.3, suhu permukaan laut wilayah Pasifik Ekuator Timur berubah menjadi lebih panas dibandingkan dengan kondisi normalnya. Hal tersebut menyebabkan banyak terjadinya konveksi di wilayah tersebut dan membuat curah hujan mengalami peningkatan. Banyaknya konveksi yang terjadi membuat massa udara berkumpul di wilayah Pasifik ekuator timur, termasuk massa udara yang berasal dari wilayah Indonesia sehingga membuat curah hujan menurun di wilayah Indonesia dan terdapat beberapa wilayah mengalami kekeringan (Fitria dan Pratama, 2013).



Gambar 2.4 Sirkulasi Timur Barat Kondisi La Nina (BOM, 2010)

Pada saat sirkulasi timur barat terjadi La Nina seperti Gambar 2.4, suhu permukaan laut di wilayah Pasifik Ekuator Timur akan lebih rendah dibandingkan kondisi normal. Pada wilayah Indonesia, suhu permukaan lautnya akan menjadi lebih hangat sehingga menyebabkan banyak pembentukan konveksi dan membuat massa udara berkumpul di wilayah Indonesia, termasuk massa udara yang berasal dari Pasifik Ekuator Timur (Fitria dan Pratama, 2013). Keadaan tersebut membuat wilayah Indonesia sangat menunjang untuk terbentuknya awan dan hujan. Sehingga terjadinya fenomena La Nina seringkali membuat curah hujan meningkat dan melebihi batas normal yang menimbulkan banjir, tanah longsor, bahkan angin kencang (Avia dan Hidayati, 2011).

2.2.5 IOD

Indian Ocean Dipole atau IOD merupakan salah satu faktor yang menyebabkan pergeseran musim di wilayah Indonesia. IOD adalah fenomena iklim yang muncul akibat interaksi antara lautan dan atmosfer di Samudra Hindia. IOD terbagi menjadi dua fase, yaitu fase positif dan fase negatif. Karakteristik utama IOD adalah peningkatan suhu permukaan laut di wilayah barat Samudra Hindia dan penurunan suhu permukaan laut di wilayah timur Samudra Hindia. Sebaliknya, jika

suhu permukaan laut di Samudra Hindia lebih rendah dari kondisi netral, sementara di Samudra Hindia lebih tinggi dari kondisi netral, maka situasi ini disebut sebagai IOD negatif. Fenomena IOD dapat memengaruhi suhu permukaan laut, baik dengan meningkatkannya maupun menurunkannya, yang diikuti oleh perubahan curah hujan, berupa peningkatan atau penurunan (Rahayu dkk., 2018). Penurunan suhu permukaan laut selama fase IOD positif berdampak pada berkurangnya intensitas curah hujan, sedangkan peningkatan suhu permukaan laut selama fase IOD negatif berkontribusi pada meningkatnya intensitas curah hujan. Fenomena IOD terjadi akibat perbedaan anomali suhu permukaan laut antara wilayah barat dan timur Samudra Hindia (Aldrian dan Dwi Susanto, 2003).

Fenomena IOD (+) dan El Niño berdampak pada berkurangnya jumlah curah hujan, sedangkan IOD (–) dan La Niña meningkatkan jumlah curah hujan (Tjasyono dkk., 2008). Indeks IOD atau indeks DM (Dipole Mode) merujuk pada perbedaan anomali Suhu Permukaan Laut (SPL) di wilayah lintang 10° LS hingga ekuator dengan bujur 90° – 110° BT (Samudera Hindia Ekuatorial bagian timur) serta lintang 10° LS hingga 10° LU dengan bujur 50° – 70° BT (Samudera Hindia Ekuatorial bagian barat) (Saji dkk., 1999). Indeks ini dikategorikan sebagai IOD (+) jika nilainya lebih dari 0,35 dan IOD (–) jika nilainya kurang dari –0,35. IOD (+) menunjukkan bahwa suhu permukaan laut di Pantai Timur Afrika lebih tinggi dibandingkan dengan di Pantai Barat Sumatera, sedangkan IOD (–) menunjukkan kondisi sebaliknya. Oleh karena itu, IOD (+) merepresentasikan fase dingin di perairan Pantai Barat Sumatera, yang menyebabkan aktivitas konveksi melemah. Sebaliknya, IOD (–) menggambarkan fase panas di perairan tersebut, yang mendorong penguatan aktivitas konveksi. Tabel klasifikasi IOD untuk mengidentifikasi tahun kejadian DM positif, negative, dan netral dapat dilihat sebagai berikut (Tjasyono dkk., 2008):

Tabel 2.1 Dipole Mode Index (Tjasyono dkk., 2008)

Nilai DMI	Keterangan
$DMI > 0,35^{\circ}\text{C}$	DM Positif
$DMI < -0,35^{\circ}\text{C}$	DM Negatif

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian menggunakan jenis kuantitatif dengan pendekatan deskriptif. Metode analisis ini digunakan untuk membahas dan menganalisis kejadian anomali tinggi muka air laut (SLA) dan suhu muka laut (SST) terhadap data kejadian banjir rob yang didapatkan dari Egaputra dkk., (2022). Berdasarkan penelitian Rachman dkk., (2024) penelitian kuantitatif sering berkaitan dengan angka dan statistik yang dapat berupa grafik. Penelitian kuantitatif memberikan gambaran analitis yang cukup kuat dalam memahami hubungan antar variabel. Jenis penelitian ini sangat sesuai untuk dapat memahami hubungan data SLA dan SST berdasarkan hasil olahan Google Colaboratory untuk mengkaji mengenai hubungan kedua data tersebut. Hasil olahan tersebut kemudian dikaji hubungannya dengan data kejadian banjir rob dari jurnal Egaputra dkk., (2022) untuk melihat pengaruhnya serta hubungannya dengan kejadian ENSO dan IOD di wilayah Semarang. Seluruh proses analisis ini nantinya akan digunakan dalam perumusan kesimpulan akhir.

3.2 Prosedur Penelitian

Pada subbab ini akan dijelaskan mengenai tahapan penelitian yang dilakukan, meliputi lokasi dan waktu penelitian, alat yang digunakan, data penelitian, serta metode pengolahan data analisis yang dipakai.

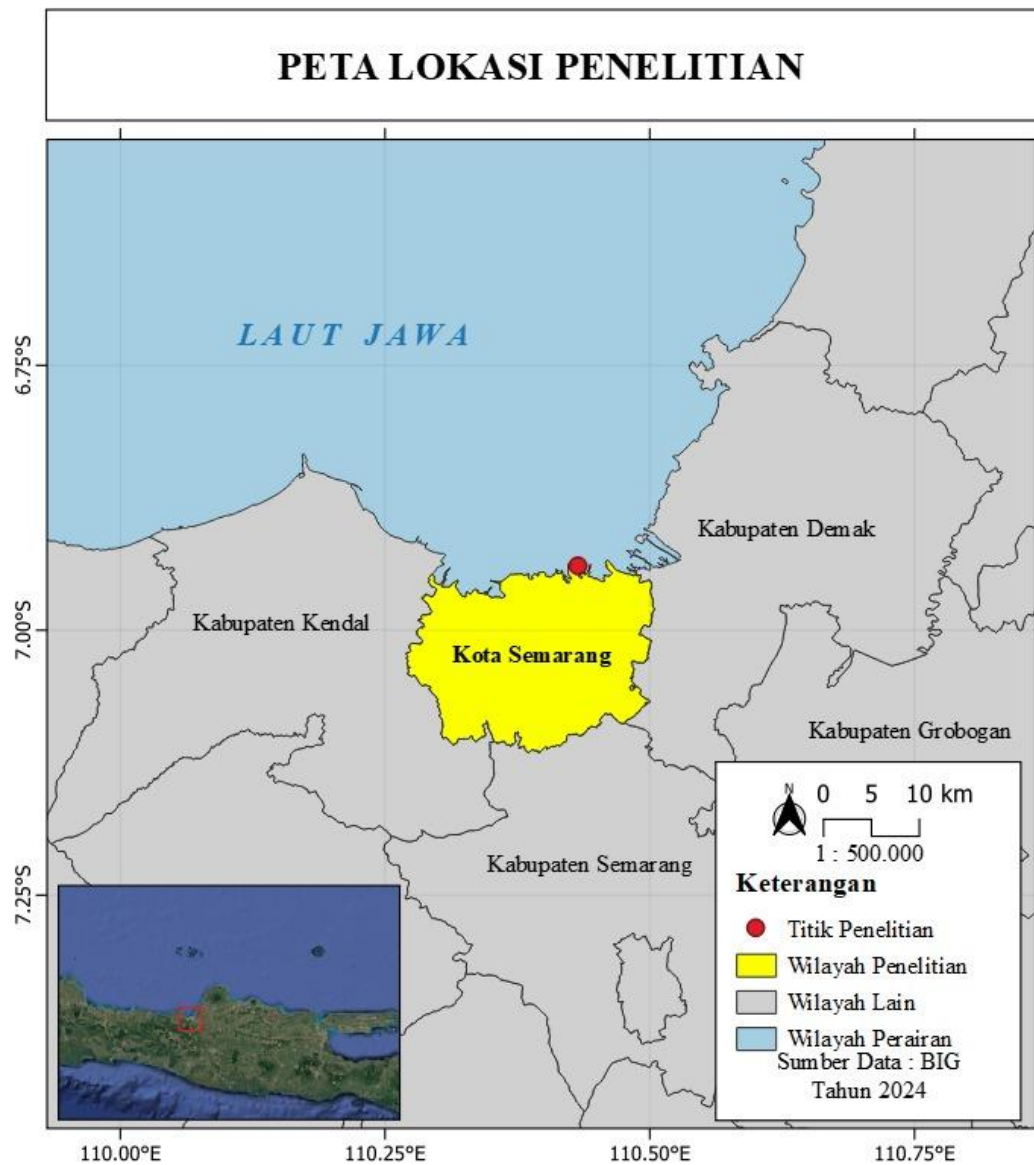
3.2.1 Lokasi dan Waktu Penelitian

Wilayah penelitian ini dilakukan di Semarang, yang terletak di 6 50'-7 10' LS dan 109 35'-110 50' BT dengan batas sebelah Utara dengan Laut Jawa, sebelah Timur dengan Kabupaten Demak, sebelah Barat dengan Kabupaten Kendal, dan sebelah Selatan dengan Kabupaten Semarang seperti yang ditampilkan pada gambar 3.1. Luas wilayah Kota Semarang yaitu 373,70 km atau 37.366.836 Ha yang terdiri dari 16 kecamatan dengan 117 kelurahan. Waktu dilakukannya penelitian dimulai dari tahun 2012 sampai tahun 2020 menyesuaikan dengan

ketersediaan data banjir rob yang ada. Data kejadian banjir rob oleh Egaputra dkk., (2022) yang ditampilkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Rincian Waktu dan Wilayah Kejadian Rob

No	Tanggal Kejadian	Kecamatan
1	23 Maret 2012	Semarang Utara
2	13 - 15 Januari 2013	Semarang Utara, Semarang Timur, Tugu
3	31 Mei 2013	Semarang Utara, Gayamsari
4	16 - 17 Juni 2013	Gajah Mungkur, Ngaliyan, Tugu, Semarang Utara, Gayamsari, Genuk, Pedurungan
5	21 Januari 2014	Gayamsari, Semarang Barat, Semarang Utara, Genuk, Semarang Timur, Gayamsari, Pedurungan
6	23 - 27 Januari 2014	Gayamsari, Semarang Barat, Semarang Utara, Genuk, Semarang Timur, Gayamsari, Pedurungan
7	12 Februari 2015	Gayamsari, Semarang timur, Semarang Utara, Genuk, Pedurungan, Semarang Barat, Ngaliyan
8	28 - 30 Mei 2016	Genuk, Semarang Timur, Semarang Utara, Gayamsari
9	26 Juni - 3 Juli 2016	Semarang Timur, Gayamsari, Genuk, Semarang Utara
10	1 - 4 Juni 2017	Semarang Utara dan Genuk
11	1 - 4 Desember 2017	Genuk, Semarang Utara, Gayamsari
12	29 - 30 Januari 2018	Genuk dan Semarang Timur
13	22 - 28 Februari 2018	Gayamsari dan Genuk
14	19 - 26 Mei 2018	Genuk, Semarang Timur, Semarang Utara, Gayamsari
15	10 April 2019	Genuk
16	14 Mei 2019	Semarang Utara
17	6 – 9 Desember 2020	Semarang Utara



Gambar 3.1 Lokasi Penelitian

3.2.2 Data Penelitian

Adapun data penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Data suhu permukaan laut yaitu *Sea Surface Temperature* (SST) grid didapatkan dari EU Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) yaitu https://data.marine.copernicus.eu/product/MULTIOBS_GLO_PHY_TSUV_3D_MYNRT_015_012/description dengan format NetCDF-4. Data SST yang digunakan merupakan data bulanan yang didapatkan dari pemrosesan ulang

multi-tahun dengan resolusi spasial 0.25 derajat. Durasi data yang dipakai pada penelitian ini yaitu dari tahun 2012 sampai 2020.

2. Data anomali tinggi muka laut yaitu *Sea Level Anomaly* (SLA) dihitung dengan menggunakan satelit altimetri terhadap rata-rata dua puluh tahun (1993 - 2012). Data SLA didapatkan dengan sistem pemrosesan data altimetri multimiris DUACS (*Data Unification dan Altimeter Combination System*) dengan resolusi spasial 0.125 derajat yang diperkirakan dengan menggunakan interpolasi optimal yang disediakan oleh EU *Copernicus Marine Environment Monitoring Service* (CMEMS) (https://data.marine.copernicus.eu/product/SEALEVEL_GLO_PHY_L4_MY_008_047/description) dengan format NetCDF-4. Sumber data SLA grid berasal dari empat satelit altimetri yang digabungkan pada waktu tertentu yaitu TOPEX/Poseidon dari Januari 1993 hingga November 2001, Jason-1 dari Desember 2001 hingga Mei 2008, OSTIM/Jason-2 dari Juni 2008 hingga Desember 2015, dan Jason-3 dari Januari 2016 hingga sekarang. Durasi data SLA yang dipakai pada penelitian ini yaitu dari tahun 2012 sampai 2020.
3. Data kejadian rob didapatkan dari jurnal Egaputra dkk., (2022).
4. Data indeks ENSO menggunakan NIÑO 3.4 yang didapatkan dari website *ggweather* yang dapat diakses melalui <https://ggweather.com/enso/oni.htm>.
5. Data *Index Mode Dipole* didapatkan dari website *National Oceanic dan Atmospheric Administrasi* (NOAA) yang dapat diakses melalui https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/Data/dmi.had.long.data dalam format csv.

3.2.3 Alat Penelitian

Adapun alat penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Perangkat lunak Googlecolaboratory sebagai alat untuk mengolah visualisasi data anomali tinggi muka laut dan suhu permukaan laut sreta untuk merubah format data SLA dan SST ke csv.
2. Microsoft Office 2019, yaitu Microsoft Word dan Microsoft Excel yang berfungsi untuk pengumpulan dan analisis hasil pengolahan data.
3. Perangkat lunak QGIS sebagai alat untuk memetakan wilayah penelitian.

4. Google Chrome sebagai alat dalam mencari informasi terkait penelitian secara online.

3.2.4 Teknik Pengolahan Data

Prosedur dalam pengolahan data pada penelitian ini dilakukan dengan rincian sebagai berikut:

1. Mengumpulkan data penelitian yang diperlukan, seperti data SLA, SST, Indeks Nino 3.4, *Index Mode Dipole*, dan data kejadian rob.
2. Melakukan pengolahan data SLA dengan Googlecolaboratory dan menjadikannya ke dalam bentuk peta yang digolongkan ke dalam beberapa waktu, yaitu bulan Desember-Januari-Februari (DJF), Maret-April-Mei (MAM), Juni-Juli-Agustus (JJA), dan September-Oktober-November (SON).
3. Melakukan pengolahan data SST dengan Googlecolaboratory. Visualisasi data SST dibuat menjadi bentuk peta yang digolongkan ke dalam beberapa waktu, yaitu bulan Desember-Januari-Februari (DJF), Maret-April-Mei (MAM), Juni-Juli-Agustus (JJA), dan September-Oktober-November (SON).
4. Mengolah data SLA dan SST dengan Googlecolaboratory untuk mengubah format .nc menjadi txt dengan titik data -6.938798, 110.432523 kemudian mengolahnya dengan Ms. Excel untuk mendapatkan grafik perbandingan SLA dan SST.
5. Mengolah data SLA, SST, indeks Nino 3.4, *Index Mode Dipole*, serta kejadian rob dengan Ms. Excel.

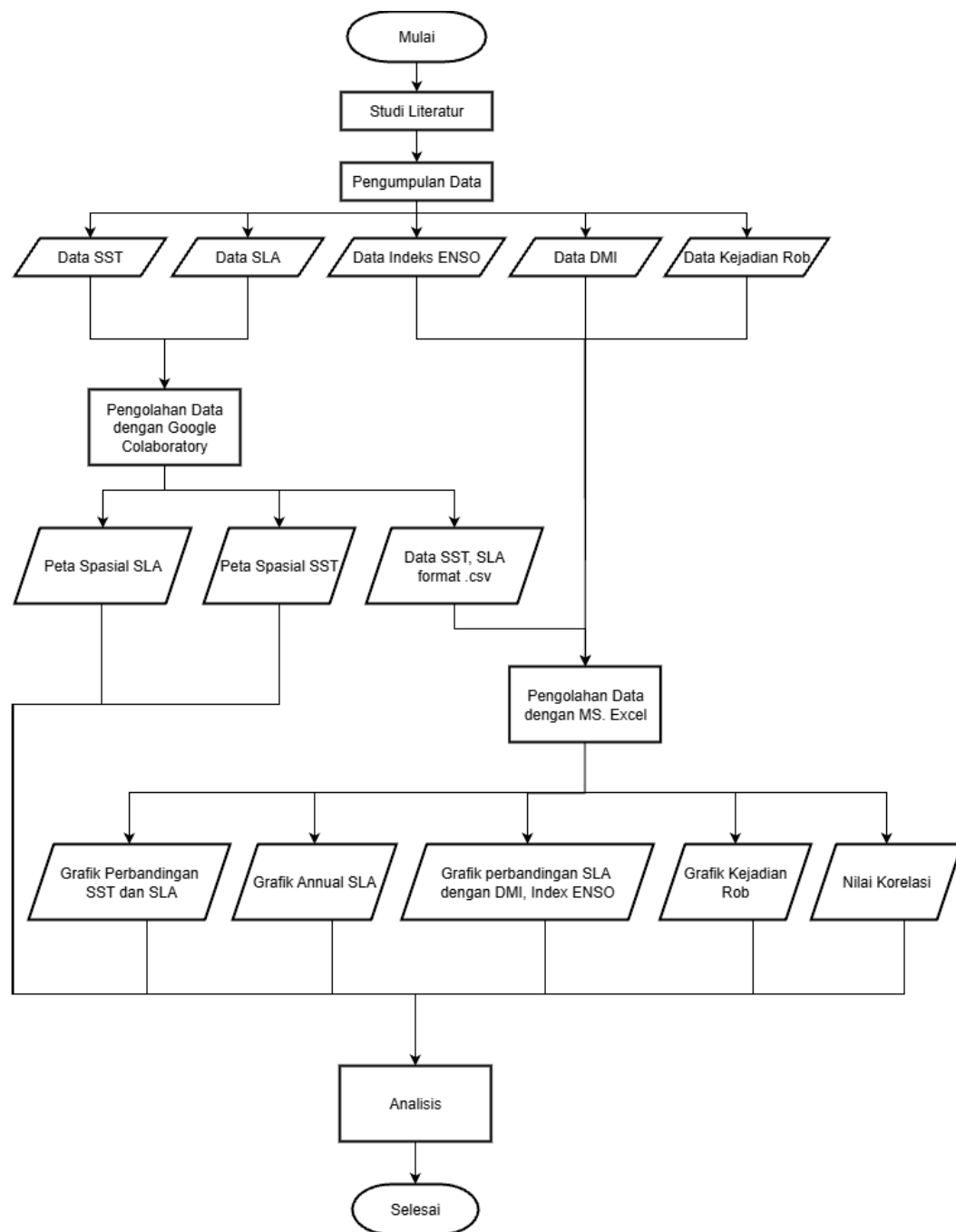
3.2.5 Teknik Analisis Data

Teknik analisis data dilakukan setelah pengolahan data selesai. Berikut ini langkah-langkah analisis data hasil pengolahan:

1. Mengidentifikasi peta spasial hasil olahan data anomali tinggi muka laut dari Googlecolaboratory yang mencangkup waktu penelitian selama 9 tahun dimulai sejak tahun 2012 hingga tahun 2020.
2. Mengidentifikasi peta spasial hasil olahan data suhu muka laut yang berasal dari pengolahan Googlecolaboratory dengan data waktu penelitian selama 9 tahun sejak tahun 2012 hingga tahun 2020.

3. Mengidentifikasi keterkaitan hasil pengolahan data SLA dengan SST untuk melihat pengaruh nilai SST terhadap ketinggian permukaan laut dengan melihat hasil grafik SLA-SST.
4. Mengidentifikasi pergerakan anomali tinggi muka laut secara tahunan di wilayah Semarang.
5. Mengidentifikasi anomali tinggi muka laut terhadap kejadian ENSO dan IOD yang terjadi di Semarang.
6. Mengidentifikasi kejadian rob berdasarkan grafik kejadian rob bulanan yang terjadi di Semarang.
7. Mengidentifikasi keterkaitan anomali tinggi muka laut dengan kejadian rob, ENSO, dan IOD yang terjadi di wilayah Pantai Semarang.

3.2.6 Diagram Alir Penelitian



Gambar 3.2 Diagram Alir Penelitian

BAB IV

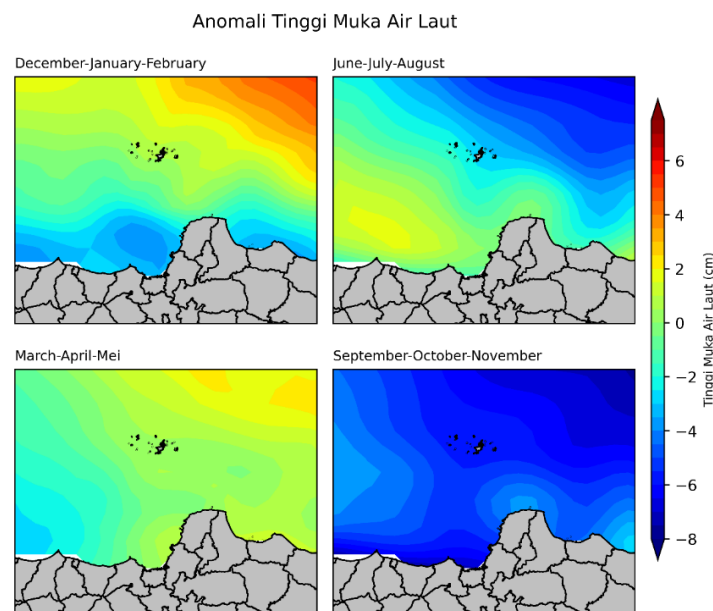
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil

Pada subbab ini, akan disajikan hasil pengolahan data yang telah dijelaskan pada Bab 3 sebelumnya. Hasil tersebut akan dibagi menjadi beberapa bagian. Pertama, akan dipaparkan hasil peta spasial dari rata-rata anomali tinggi muka air laut dan suhu permukaan laut yang dikelompokkan berdasarkan seasonal terkait kejadian rob di wilayah pesisir Kota Semarang periode 2012-2020. Selanjutnya akan ditampilkan hasil analisis dampak fenomena iklim seperti *El Nino Southern Oscillation* (ENSO), *Indian Ocean Dipole* (IOD), serta suhu permukaan laut, dan anomali tinggi muka laut terhadap kejadian rob di wilayah pesisir Kota Semarang. Untuk mengetahui respon tinggi muka air laut dan suhu muka air laut terhadap kejadian rob, maka data akan ditampilkan ke dalam bentuk grafik dengan titik data berada pada 6°56'19.7" LS dan 110°25'57.1" BT.

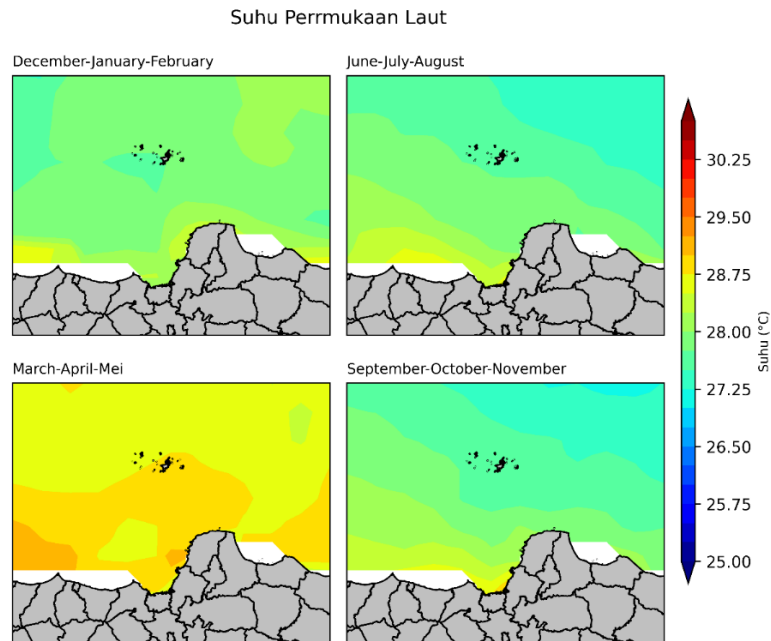
4.1.1 Peta Spasial Anomali Tinggi Muka Laut dan Suhu Muka Laut

Peta spasial anomali tinggi muka air laut di Pantai Semarang periode tahun 2012-2020 ditunjukkan oleh Gambar 4.1 berikut ini.



Gambar 4.1 Peta Spasial Anomali Tinggi Muka Air Laut Semarang

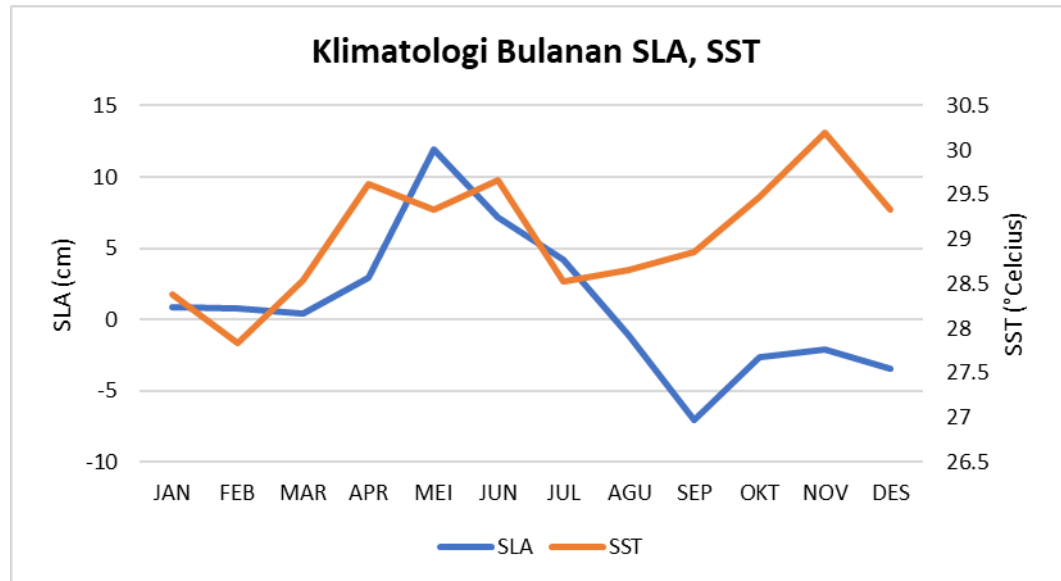
Gambar 4.1 yang ditampilkan menunjukkan peta distribusi anomali tinggi muka air laut di wilayah perairan sekitar Semarang yang dibagi berdasarkan empat musim atau periode tiga bulanan, yaitu Desember–Januari–Februari (DJF), Maret–April–Mei (MAM), Juni–Juli–Agustus (JJA), dan September–Oktober–November (SON). Skala warna pada peta mengindikasikan besar kecilnya nilai anomali, dengan warna biru tua menunjukkan anomali negatif hingga -8 cm, sementara warna oranye hingga merah menandakan anomali positif yang dapat mencapai +6 cm. Anomali positif berarti tinggi muka air laut lebih tinggi dari kondisi normal, sedangkan anomali negatif menandakan penurunan dari rata-rata normal. Pada periode DJF, terlihat adanya kombinasi warna biru muda hingga jingga-merah di wilayah utara peta, yang menunjukkan bahwa bagian utara wilayah Semarang mengalami anomali positif atau peningkatan tinggi muka laut hingga sekitar +6 cm. Sementara di dekat garis pantai, anomali cenderung negatif. Pada periode MAM, anomali tinggi muka air laut secara umum menunjukkan nilai netral hingga sedikit positif mendekati +2 cm, ditandai dengan dominasi warna hijau kekuningan. Masuk ke periode JJA, anomali tinggi muka laut di wilayah Pantai Semarang cenderung netral hingga sedikit negatif mendekati nilai -2 cm. Penurunan tinggi muka laut ini mencapai titik terendah pada musim SON, di mana hampir seluruh wilayah laut di sekitar Semarang didominasi oleh warna biru tua pekat, menandakan anomali negatif ekstrem hingga -8 cm. Ini menunjukkan bahwa tinggi muka air laut berada pada kondisi terendah.



Gambar 4.2 Peta Spasial Suhu Permukaan Laut Semarang

Gambar 4.2 menampilkan peta sebaran suhu permukaan laut di wilayah perairan sekitar Semarang yang telah dibagi berdasarkan musim, yaitu Desember-Januari (DJF), Maret-April-Mei (MAM), Juni-Juli-Agustus (JJA), dan September-Oktober-November (SON). Warna pada peta menunjukkan variasi suhu, dengan gradasi warna dari biru pekat (sekitar 25 °C) hingga merah pekat (lebih dari 30.25 °C), sesuai dengan legenda di sisi kanan peta. Secara umum, terlihat adanya variasi musiman yang signifikan dalam distribusi suhu permukaan laut. Pada musim DJF, suhu laut berada pada kisaran sedang, antara 27.5 °C hingga 28.5 °C, yang ditandai dengan dominasi warna hijau dengan sedikit kuning. Memasuki musim MAM, suhu permukaan laut mencapai nilai tertinggi yang berkisar di antara 28.5 °C hingga mendekati 29.5 °C yang ditandai dengan dominasi warna kuning dan jingga, mengindikasikan kondisi laut yang sangat hangat. Kondisi berubah drastis pada musim JJA, dimana suhu laut menurun menjadi sekitar 26.5 °C hingga 27.5 °C. Warna pada peta berubah menjadi hijau muda hingga kebiruan. Pada musim SON, suhu laut masih relatif rendah berada dalam kisaran 26°C hingga 27.5°C.

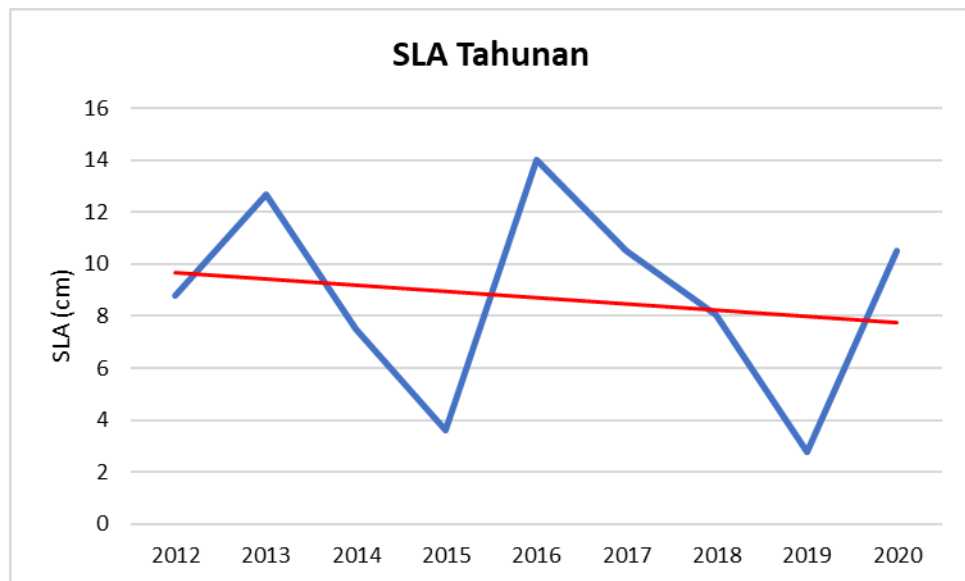
4.1.2 Grafik Perbandingan SLA, SST, IOD, ENSO, dan Rob



Gambar 4.3 Grafik Klimatologi Bulanan SST dan SLA di Pantai Semarang

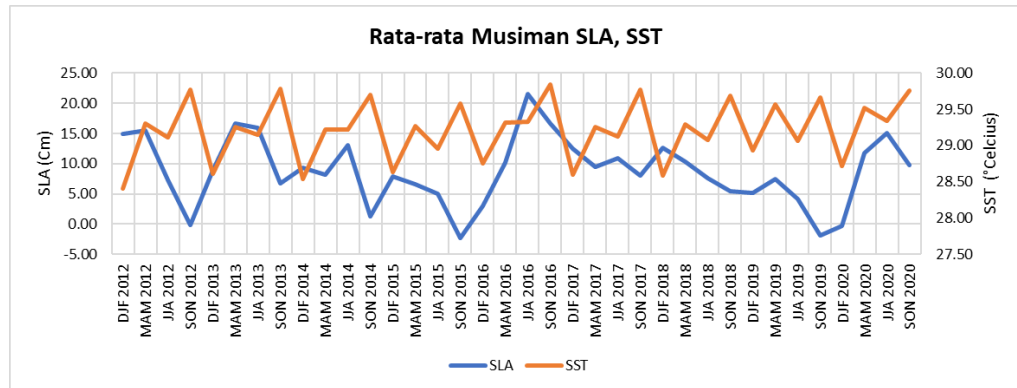
Grafik 4.3 menggambarkan pola klimatologi bulanan Suhu Permukaan Laut (SST) dan Anomali Tinggi Muka Laut (SLA) di wilayah pesisir Semarang selama periode 2012-2020. Berdasarkan grafik 4.3 terlihat adanya pola musiman yang cukup jelas pada kedua parameter tersebut. Pola pergerakan SST menunjukkan fluktuasi, dengan nilai tertinggi tercatat pada bulan November sebesar $\pm 30,3^{\circ}\text{C}$ dan nilai terendah terjadi pada bulan Februari sebesar $\pm 27,6^{\circ}\text{C}$. Kenaikan suhu permukaan laut yang signifikan terjadi dari bulan Maret ke April, dengan lonjakan dari sekitar $28,2^{\circ}\text{C}$ menjadi $29,5^{\circ}\text{C}$. Pola kenaikan ini berlanjut hingga bulan Mei, kemudian sedikit menurun pada bulan Juni dan kembali mengalami penurunan yang signifikan hingga bulan Agustus. Sementara itu, pola pergerakan SLA cenderung memperlihatkan hubungan yang berbanding terbalik dengan SST pada pertengahan tahun dan hal tersebut sesuai dengan nilai korelasi *pearson* yaitu -0.14278 dimana nilai negatif menandakan hubungan yang berkebalikan. SLA mengalami peningkatan tajam dari bulan Maret ke Mei, dengan nilai maksimum sebesar ± 15 cm pada bulan Mei. Setelah itu, SLA

menunjukkan tren penurunan yang drastis, khususnya dari bulan Juli hingga mencapai titik terendah sekitar -8 cm pada bulan September.



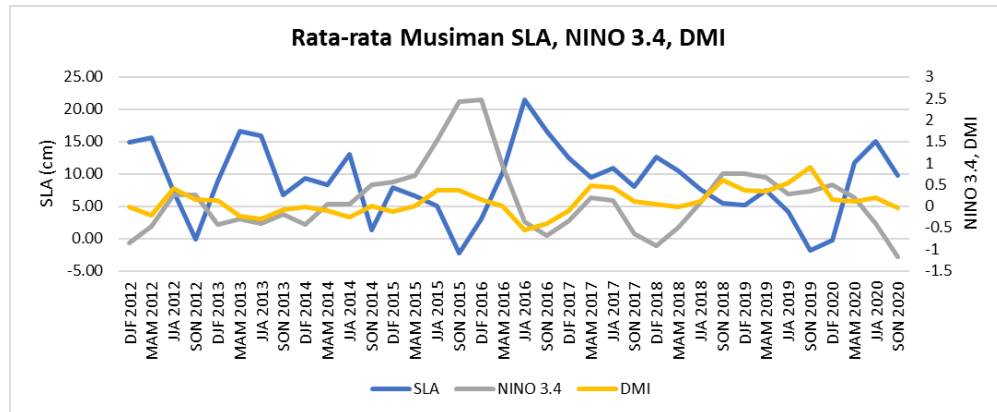
Gambar 4.4 Grafik SLA Tahunan di Pantai Semarang

Grafik 4.4 menggambarkan anomali tinggi muka laut (SLA) tahunan di wilayah pesisir Semarang selama periode 2012 hingga 2020 dalam satuan cm. Nilai tertinggi SLA tercatat pada tahun 2016 dengan ketinggian mencapai sekitar +14 cm. Lonjakan ini sangat mencolok dibandingkan tahun sebelumnya (2015), yang hanya mencatat sekitar +3,5 cm. Sebaliknya, nilai terendah SLA terjadi pada tahun 2019, dengan anomali hanya sekitar +3 cm. Penurunan drastis dari tahun sebelumnya (2018) yang mencatat sekitar +8 cm menunjukkan perubahan negatif sebesar -5 cm dalam kurun satu tahun. Meskipun secara tahunan terdapat variasi yang naik-turun, tren linier yang digambarkan oleh garis merah menunjukkan bahwa dalam rentang waktu penelitian, kondisi SLA di Pantai Semarang mengalami penurunan.



Gambar 4.5 Grafik Rata-Rata Musiman SLA dan SST di Pantai Semarang

Grafik 4.5 menunjukkan perbandingan rata-rata musiman *Sea Level Anomaly* (SLA) dan *Sea Surface Temperature* (SST) di Pantai Semarang selama periode 2012 hingga 2020. Pola pergerakan SST cenderung stabil dari tahun ke tahun dengan variasi kecil secara musiman, di mana suhu laut umumnya berada pada kisaran antara $\pm 28,2^{\circ}\text{C}$ hingga $\pm 29,8^{\circ}\text{C}$. Nilai SST tertinggi tercatat pada musim MAM (Maret–Mei) tahun 2016 yang mencapai $\pm 29,8^{\circ}\text{C}$, sedangkan nilai terendah terjadi pada DJF (Desember–Februari) tahun 2019 dengan suhu sekitar $\pm 28,2^{\circ}\text{C}$. Kenaikan signifikan suhu permukaan laut tampak pada transisi dari DJF 2015 ke MAM 2016, yang menunjukkan peningkatan suhu lebih dari 1°C secara musiman. Sementara itu, SLA menunjukkan variasi yang lebih fluktuatif dibandingkan SST. Nilai SLA tertinggi tercatat pada MAM 2016 dengan nilai mendekati ± 25 cm, yang juga bertepatan dengan puncak suhu SST pada periode yang sama. Sebaliknya, SLA terendah terjadi pada SON (September–November) tahun 2019 dengan nilai sekitar ± 2 cm. Terdapat beberapa perubahan signifikan dalam grafik SLA, seperti penurunan tajam dari JJA ke SON 2015 dan dari MAM ke JJA 2019, yang masing-masing menunjukkan penurunan muka laut hingga ± 10 cm. Sebaliknya, lonjakan SLA paling mencolok terjadi pada periode DJF ke MAM 2016, yang selaras dengan peningkatan SST, menunjukkan adanya akumulasi energi termal di lapisan permukaan laut yang berdampak terhadap kenaikan tinggi muka laut secara termal.



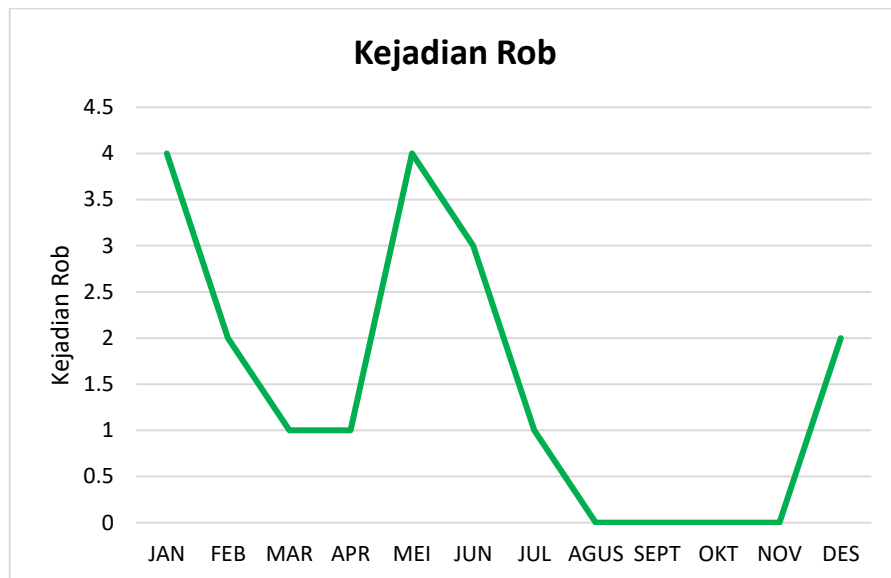
Gambar 4.6 Grafik Rata-Rata Musiman SLA, Indeks Iklim NINO 3.4, dan DMI di Pantai Semarang

Grafik 4.6 menampilkan perbandingan rata-rata musiman antara anomali tinggi muka laut (SLA), NINO 3.4, DMI di Pantai Semarang selama periode 2012 hingga 2020 menunjukkan fluktuasi musiman yang cukup dinamis. Nilai SLA cenderung beresilasi antara -5 cm hingga mencapai puncaknya sekitar 20 cm. Puncak SLA terjadi pada periode DJF tahun 2016, sementara nilai SLA terendah tercatat pada periode DJF 2015.

Indeks NINO 3.4 menunjukkan pergerakan yang mencerminkan keberadaan fenomena ENSO (*El Niño–Southern Oscillation*). Kenaikan tajam indeks NINO 3.4 pada tahun 2015 hingga awal 2016, yang mencapai nilai sekitar +2,5, menandai terjadinya El Niño kuat. Sebaliknya, pada saat terjadi La Niña, seperti pada SON 2016 dan DJF 2018, indeks NINO 3.4 menunjukkan nilai negatif ($< -0,5$) dan SLA juga menurun, mengindikasikan adanya hubungan negatif antara La Niña dan tinggi muka laut di wilayah Semarang.

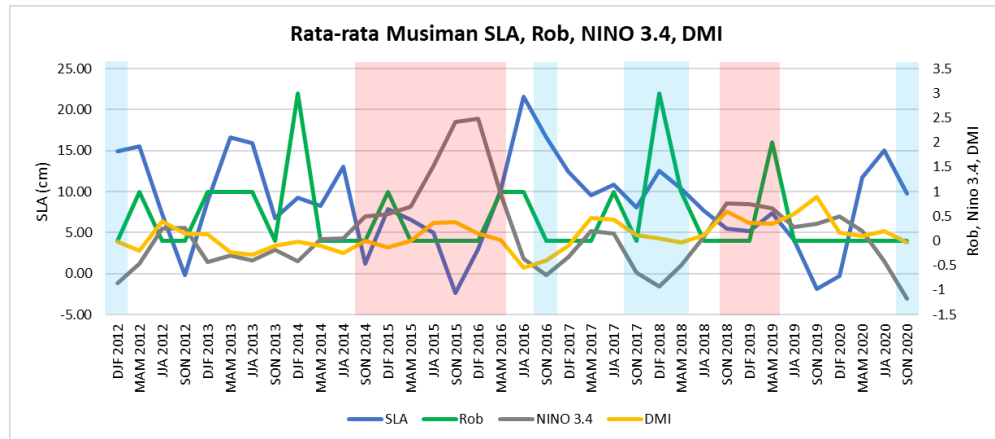
Sementara itu, indeks DMI menunjukkan fluktuasi yang lebih kecil namun tetap signifikan, terutama pada periode SON 2015 dan SON 2019, di mana nilai DMI mencapai lebih dari +1, menandai terjadinya IOD positif. Pada periode tersebut, SLA menunjukkan penurunan, yang mengindikasikan bahwa IOD positif cenderung menurunkan muka laut di wilayah Pantai Semarang. Meskipun demikian, hubungan antara SLA dan DMI tampaknya tidak sekuat hubungan SLA dengan indeks NINO 3.4, yang terlihat dari

pergerakan grafik DMI yang lebih stabil dan tidak selalu selaras dengan fluktuasi SLA.



Gambar 4.7 Grafik Rob di Pantai Semarang

Grafik 4.7 merupakan grafik bulanan kejadian rob di pantai Semarang periode 2012-2020. Berdasarkan grafik 4.7, terlihat adanya pola musiman yang cukup jelas. Kejadian rob paling banyak tercatat terjadi pada bulan Januari dan Mei, masing-masing sebanyak 4 kali. Setelah itu, jumlah kejadian menurun tajam pada bulan Februari menjadi 2 kejadian dan terus turun hingga mencapai titik terendah pada bulan Maret dan April, yaitu hanya 1 kejadian. Peningkatan drastis kembali terjadi pada bulan Mei, naik dari 1 menjadi 4 kejadian. Setelah bulan Mei, jumlah kejadian kembali menurun secara bertahap, dari 3 kejadian di bulan Juni menjadi 1 kejadian di bulan Juli, lalu mencapai nol kejadian pada bulan Agustus. Pada bulan Agustus hingga November tidak tercatat adanya kejadian rob sama sekali, menandakan periode tersebut sebagai musim yang relatif aman dari rob karena pada bulan-bulan ini, nilai SLA cenderung rendah. Pada bulan Desember, jumlah kejadian kembali meningkat menjadi 2, menunjukkan potensi awal peningkatan rob.



Gambar 4.8 Grafik Rata-Rata SLA, Rob, Indeks Iklim NINO 3.4, DMI di Pantai Semarang

Grafik 4.8 merupakan grafik rata-rata musiman (*seasonal average*) yang menampilkan variabel *Sea Level Anomaly* (SLA), kejadian rob, indeks Nino 3.4, dan *Dipole Mode Index* (DMI) pada periode 2012–2020 di Kota Semarang. Dalam grafik, kotak berwarna merah menunjukkan periode El Niño, sedangkan kotak berwarna biru menunjukkan periode La Niña. Pola fluktuasi antar variabel ini menunjukkan keterkaitan dinamis yang signifikan. Nilai korelasi *pearson* yang didapatkan antara SLA dengan NINO 3.4 adalah -0.63578. Nilai korelasi yang negatif bermakna bahwa ketika NINO 3.4 menurun atau berada di fase La Nina, tinggi muka air laut (SLA) naik. Sedangkan nilai korelasi *pearson* dari DMI dengan SLA adalah -0.67518, dimana hal tersebut menandakan bahwa ketika IOD negatif, suhu muka air laut cenderung naik. Nilai korelasi *pearson* SLA dengan kejadian rob adalah 0.314899471 dan termasuk kategori korelasi rendah. Hal tersebut terjadi karena kejadian rob tidak terjadi setiap waktu maupun atau di waktu-waktu tertentu saja.

Secara umum, nilai SLA menunjukkan pola fluktuasi musiman yang cukup signifikan dengan puncak kenaikan terjadi pada periode DJF 2016, DJF 2017, dan SON 2020, di mana nilai SLA dapat mencapai kisaran 0.20–22 cm. Kenaikan SLA ini berpotensi meningkatkan kejadian rob di pesisir Semarang karena tingginya muka laut akan menyebabkan air laut lebih mudah meluap ke daratan pesisir, terutama saat pasang maksimum. Hal ini

terlihat pada grafik, di mana kenaikan SLA cenderung diikuti dengan kenaikan frekuensi kejadian rob, seperti yang tampak pada MAM 2013, DJF 2017, dan DJF 2018.

Indeks Nino 3.4 yang merepresentasikan kondisi ENSO juga menunjukkan pola fluktuasi yang memiliki hubungan dengan kenaikan SLA dan kejadian rob. Pada periode DJF 2016, tercatat nilai Nino 3.4 berada pada kondisi positif tinggi yang menunjukkan fase El Niño yang ditandai dengan kotak merah. Peningkatan SLA selama periode El Niño ini dapat memperparah potensi kejadian rob, sebagaimana terlihat pada puncak kejadian rob dan SLA pada periode tersebut. Sebaliknya, fase La Niña yang ditunjukkan oleh kotak biru pada grafik, seperti DJF 2012, DJF 2018, dan DJF 2020, cenderung berasosiasi dengan penurunan nilai SLA dan penurunan frekuensi kejadian rob. Hal ini mengindikasikan bahwa kondisi La Niña dapat memberikan efek penurunan tinggi muka laut dan menurunkan potensi rob.

Sementara itu, indeks DMI yang merepresentasikan kondisi IOD menunjukkan fluktuasi yang relatif stabil mendekati nilai netral dengan beberapa kenaikan pada SON 2019. Berdasarkan grafik, pengaruh DMI terhadap pola SLA dan kejadian rob tidak terlihat secara signifikan di Semarang. Hal ini menunjukkan bahwa dalam konteks wilayah pesisir Semarang, pengaruh ENSO (Nino 3.4) cenderung lebih dominan dalam mempengaruhi variasi SLA dan kejadian rob dibandingkan dengan pengaruh IOD (DMI).

4.2 Pembahasan

Variasi musiman SST di wilayah pesisir Semarang pada periode tahun 2012 sampai 2020 menunjukkan suhu tertinggi pada musim MAM (Maret–April–Mei), khususnya tahun 2016, mencapai sekitar 29,8°C. Sebaliknya, nilai terendah teramati pada DJF (Desember–Januari–Februari) 2019 sekitar 28,2°C. Kenaikan suhu yang drastis dari DJF ke MAM 2016 menunjukkan akumulasi energi termal akibat radiasi maksimum saat

ekuinox Maret. Hubungan antara SLA dan SST menunjukkan bahwa ekspansi termal di lapisan permukaan laut merupakan mekanisme utama dalam peningkatan tinggi muka laut. Sebaliknya, penurunan ekstrem SLA terlihat pada SON (September–Oktober–November) 2019, dengan nilai mendekati 2 cm. Penurunan tajam SLA dari JJA ke SON tahun 2015 dan MAM ke JJA 2019, masing-masing mencapai ± 10 cm, mengindikasikan respon cepat terhadap kondisi atmosfer dan sirkulasi regional. Fenomena IOD positif yang kuat pada JJA–SON 2019 ($DMI > +0,8$) memperparah penurunan SLA di wilayah Semarang. Dari keseluruhan pola musiman dapat disimpulkan bahwa SLA dan SST memiliki keterkaitan yang erat, dengan SLA sangat responsif terhadap perubahan SST, terutama dalam konteks ekspansi termal di lapisan permukaan laut. Hal ini diperkuat oleh korelasi empiris antara peningkatan suhu dan kenaikan muka laut seperti yang diamati pada MAM 2016, serta penurunan suhu dan penurunan SLA pada SON 2019.

Kenaikan muka laut yang terjadi akibat pemanasan global memicu ekspansi termal air laut dan mencairnya es di kutub, yang pada akhirnya meningkatkan tinggi muka air laut dan memperparah kejadian rob di kawasan pesisir. Hal tersebut membuat SLA dapat dijadikan indikator penting dalam memprediksi risiko rob, khususnya ketika dikombinasikan dengan pengaruh SST dan indeks iklim global. Saat nilai SLA meningkat, kejadian rob cenderung mengalami peningkatan baik dari sisi frekuensi maupun intensitas. Kejadian rob yang tercatat pada awal tahun 2016 dan 2017 bertepatan dengan puncak SLA dan SST, menunjukkan adanya hubungan langsung antara anomali tinggi muka laut dan potensi genangan rob di daratan. Kejadian rob umumnya bertepatan dengan puncak SLA atau saat transisi dari pasang ke surut minimum, yang artinya kenaikan anomali muka laut secara signifikan berkontribusi terhadap genangan di wilayah pesisir. Hal tersebut menjadikan SLA dapat digunakan sebagai indikator utama untuk memprediksi potensi kejadian rob di masa mendatang. Sementara itu, pengaruh SST juga tidak dapat diabaikan. Meningkatnya suhu

permukaan laut menyebabkan ekspansi termal di permukaan laut, yang pada akhirnya meningkatkan volume laut secara keseluruhan.

Fenomena iklim global ENSO menunjukkan pengaruh yang lebih kuat dibandingkan IOD dalam memengaruhi dinamika rob di Semarang. Saat El Niño terjadi, penguatan konveksi di wilayah tengah Pasifik mengurangi curah hujan di Indonesia dan menaikkan suhu laut, menyebabkan ekspansi termal dan peningkatan SLA. Sebaliknya, La Niña menghasilkan penguatan angin monsun barat yang mendorong massa air hangat ke perairan Indonesia, meningkatkan SLA di beberapa wilayah. Hal ini menjelaskan terjadinya rob pada DJF 2018 meskipun SST relatif lebih rendah. Di sisi lain, pengaruh IOD terhadap rob di Semarang tidak konsisten. Meskipun IOD positif pada 2019 menyebabkan pendinginan laut dan penurunan SLA, kejadian rob tetap tercatat.

BAB V

PENUTUPAN

5.1 Kesimpulan

Hasil analisis terhadap variasi musiman anomali tinggi muka laut (SLA) dan suhu permukaan laut (SST) di Pantai Semarang selama periode 2012–2020 menunjukkan adanya keterkaitan dengan kejadian rob. Peningkatan SST umumnya terjadi pada musim MAM (Maret–Mei) dan SON (September–November), sedangkan penurunannya berlangsung pada musim DJF (Desember–Februari). Sebaliknya, SLA cenderung meningkat pada musim DJF dan menurun pada musim SON. Kejadian rob paling sering tercatat pada musim DJF, sementara tidak pernah terjadi pada musim SON. Secara dinamis, rob jarang muncul ketika SST naik namun SLA turun, terutama saat didominasi fenomena El Niño dan DMI positif; sebaliknya, rob lebih sering terjadi ketika SST menurun disertai kenaikan SLA, terutama pada kondisi La Niña dan DMI negatif. Hal ini menegaskan bahwa selain faktor lokal (radiasi, angin musiman, pasang maksimum, dan penurunan muka tanah), variabilitas iklim global (ENSO dan IOD) turut memodulasi SLA dan SST. Korelasi positif antara SLA dan kejadian rob memperlihatkan bahwa SLA merupakan indikator utama dalam memprediksi potensi rob, khususnya bila dipadukan dengan data SST dan indeks iklim global.

5.2 Saran

Saran untuk penelitian di masa mendatang dengan topik serupa dapat mempertimbangkan hal-hal berikut:

1. Penggunaan data penelitian yang lebih panjang guna melihat trend ataupun pola pergerakan dari anomali SST dan SLA lebih mendalam.
2. Wilayah penelitian yang diperluas guna mengatasi kekurangan resolusi data yang didapatkan.
3. Penambahan fenomena iklim lainnya dengan menyesuaikan wilayah penelitian yang dipilih.

DAFTAR PUSTAKA

- Adiningsih, A. W. (2023). Analisis adaptasi masyarakat terdampak banjir rob di Desa Randusanga Kulon, Kecamatan Brebes, Kabupaten Brebes berbasis ekosistem pesisir.
- Aldrian, E., & Susanto, R. D. (2003). Identification of three dominant rainfall regions within Indonesia and their relationship to sea surface temperature. *International Journal of Climatology*, 23(12), 1435–1452.
- Aldrian, E., Pengkajian, B., dan Teknologi, P., 2008, *Meteorologi Laut Indonesia*
- Arief, M., Adawiah, S. W., Parwati, E., Hamzah, R., Prayogo, T., & Harsanugraha, W. K. (2015). Pengembangan model ekstraksi suhu permukaan laut menggunakan data satelit Landsat 8 studi kasus: Teluk Lampung. *Jurnal Penginderaan Jauh*, 12(2), 107–122.
- Avia, L. Q., & Hidayati, R. (2011). Dampak peristiwa ENSO terhadap anomali curah hujan di wilayah Indonesia selama periode 1890–1989. *Majalah LAPAN*, 62–68.
- Bureau of Meteorology (BOM). (2010). *The three phases of the El Niño–Southern Oscillation (ENSO)*. <http://www.bom.gov.au/climate/enso/history/ln-2010-12/three-phases-of-ENSO.shtml>
- Cazenave, A., & Le Cozannet, G. (2014). Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future*, 2(2), 15–34.
- Cazenave, A., & Llovel, W. (2010). Contemporary sea level rise. *Annual Review of Marine Science*, 2(1), 145–173.
- Chandra, R. K., & Supriharjo, R. D. (2013). Mitigasi bencana banjir rob di Jakarta Utara. *Jurnal Teknik POMITS*.
- Efendi, U., Kristianto, A., & Pratama, B. E. (2021). Respon hujan lebat dan kenaikan tinggi muka laut terhadap prediksi luasan banjir rob di Semarang (Studi kasus tanggal 3–5 Desember 2018). *Jurnal Kelautan Nasional*, 16(3), 157.
- Egaputra, A. A., Ismunarti, D. H., & Pranowo, W. S. (2022). Inventarisasi kejadian banjir rob Kota Semarang periode 2012–2020. *Indonesian Journal of Oceanography*, 4(2), 29–40.

- Fadlan, A., Sugianto, D. N., Kunarso, & Zainuri, M. (2017). Influence of ENSO and IOD to variability of sea surface height in the north and south of Java Island. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Institute of Physics Publishing.
- Fitria, W., & Pratama, M. S. (2013). Pengaruh fenomena El Niño 1997 dan La Niña 1999 terhadap curah hujan di Biak.
- Golden Gate Weather Services. (2019). *El Niño and La Niña years and intensities: Based on the ONI*. <https://ggweather.com/enso/oni.htm>
- Marfai, M. A. (2011). Impact of coastal inundation on ecology and agricultural land use: Case study in Central Java, Indonesia. *Quaestiones Geographicae*, 30(3), 19–32.
- McGranahan, G., Balk, D., & Anderson, B. (2007). The rising tide: Assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and Urbanization*, 19(1), 17–37.
- Mujadida, Z., Setiyono, H., Handoyo, G., & Marwoto, J. (2021). Analisis dinamika permukaan laut di Laut Jawa dengan recurrent neural network. *Indonesian Journal of Oceanography*. <http://marine.copernicus.eu/>
- Nicholls, R. J. (2004). Coastal flooding and wetland loss in the 21st century: Changes under the SRES climate and socio-economic scenarios. *Global Environmental Change*, 14(1), 69–86.
- Nicholls, R. J., & Cazenave, A. (2010). Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, 328(5985), 1517–1520.
- Nugraha, A. D., & Perbani, N. M. R. R. C. (2023). Analisis waktu banjir rob pada model sea level anomaly harmonik dari data satelit altimetri Jason-3 tahun 2016–2018. Dalam *Seminar Nasional dan Diseminasi Tugas Akhir 2023* (hlm. 1328–1336). Bandung, Indonesia.
- Rahayu, N. D., Sasmito, B., & Bashit, N. (2018). Analisis pengaruh fenomena Indian Ocean Dipole (IOD) terhadap curah hujan di Pulau Jawa. *Jurnal Geodesi Undip*. <http://disc.gsfc.nasa.gov>
- Ramadhanty, F. W., Rochaddi, B., & Ismunarti, D. H. (2021). Pengaruh fenomena IOD (Indian Ocean Dipole) terhadap sebaran temperatur dan salinitas di perairan barat Sumatera. *Indonesian Journal of Oceanography*. <http://ejournal.undip.ac.id/index.php/ijoce>

- Saji, N. H., Goswami, B. N., Vinayachandran, P. N., & Yamagata, T. (1999). A dipole mode in the tropical Indian Ocean. *Nature*, 401(6751), 360–363.
- Sidabutar, Y. L., Sasmito, B., & Amarrohman, F. J. (2016). Analisis sea level rise dan komponen pasang surut dengan menggunakan data satelit altimetri Jason-2. *Jurnal Geodesi Undip*.
- Small, C., Nicholls, R. J., & others. (2003). A global analysis of human settlement in coastal zones. *Journal of Coastal Research*. <http://www.jstor.org/stable/4299200>
- Syafitri, A. W., & Rochani, A. (2021). Analisis penyebab banjir rob di kawasan pesisir. *Jurnal Kajian Ruang*, 1(1), 16–28.
- Tjasyono, B. H. K., Lubis, A., Juaeni, I., Ruminta, & Harijono, S. W. B. (2008). Dampak variasi temperatur Samudera Pasifik dan Hindia ekuatorial terhadap curah hujan di Indonesia. *Jurnal Sains Dirgantara*, 5(2), 83–95.
- Tongkukut, S. H. J. (2011). El Niño dan pengaruhnya terhadap curah hujan di Manado, Sulawesi Utara. *Jurnal Ilmiah Sains*, 11(1), 102–108.
- Trenberth, K. E. (1997). The definition of El Niño.
- Triana, Y. T., & Hidayah, Z. (2020). Kajian potensi daerah rawan banjir rob dan adaptasi masyarakat di wilayah pesisir utara Surabaya. *Juvenil: Jurnal Ilmiah Kelautan dan Perikanan*, 1(1), 141–150.
- Triana, K., Solihuddin, T., & Nandika, M. R. (2023). The dynamic of sea level anomaly in the Papua coastal area and its associated response to the climate indices. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Institute of Physics Publishing.
- Watson, C. S., White, N. J., Church, J. A., King, M. A., Burgette, R. J., & Legresy, B. (2015). Unabated global mean sea-level rise over the satellite altimeter era. *Nature Climate Change*, 5(6), 565–568.
- Wirasatriya, A., & Hartoko, A. (2006). Kajian kenaikan muka laut sebagai landasan penanggulangan rob di pesisir Kota Semarang. www.pdfactory.com
- Zakir, A., Sulistya, W., & Khotimah, M. K. (2009). *Perspektif operasional cuaca tropis*. Puslitbang BMKG.

LAMPIRAN

Lampiran 1 *Script* Pengolahan Data

Script pengolahan data skripsi dapat diakses di <https://github.com/Danica70/peta-spasial>

Lampiran 2 *Script* Pengolahan Peta Spasial SLA-SST

```
from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')

!pip install xarray matplotlib cartopy numpy h5netcdf scipy
!pip install "xarray[complete]"

import xarray as xr
import matplotlib.pyplot as plt
import cartopy.crs as ccrs
import cartopy.feature as cfeature

from cartopy.io.shapereader import Reader
from cartopy.feature import ShapelyFeature
import numpy as np
import matplotlib.cm as cm

data = xr.open_mfdataset('/content/drive/MyDrive/Colab
Notebooks/data_skripsi/SLA/SLA_Seasonal/SLA_*.nc',
concat_dim='time', engine='h5netcdf', combine='nested')

sla = data['sla']*100
lon = data['longitude']
lat = data['latitude']

sla

fig = plt.figure(figsize=(10, 6), dpi=300)
ax = fig.add_subplot(1, 1, 1, projection=ccrs.PlateCarree())

cmap = cm.jet
```

```

# Add this line to inspect the data being plotted
print(sla[0])

mesh = ax.contourf(lon, lat, sla[0], # Use sla instead of sst
                  cmap=cmap, levels= np.arange(-8.25, 6.25, 0.25),
                  transform=ccrs.PlateCarree(),
                  extend='both')

shape_feature = ShapelyFeature(Reader('/content/drive/MyDrive/Colab
Notebooks/Shapefile/LapakGIS_Batas_Kabupaten_2024.shp').geometries(),
                             ccrs.PlateCarree(), edgecolor="black", facecolor="silver") # Membaca
shapefile
ax.add_feature(shape_feature, linewidth=1.0) # Menambahkan shapefile ke peta
ax.set_extent([109.125, 111.875, -7.375, -5.125])
#ax.add_feature(cfeature.COASTLINE, linewidth=2)
#ax.add_feature(cfeature.BORDERS, linewidth=2, linestyle='--')
#ax.set_extent([111, 116, -10, -5], crs=ccrs.PlateCarree())

cbar_ax = fig.add_axes([0.75, 0.15, 0.02, 0.7])
cbar = fig.colorbar(mesh, cax=cbar_ax).set_label(label='Anomali Tinggi Permukaan
laut (cm)', size=9) # Updated label

plt.suptitle('Anomali Tinggi Permukaan Laut', # Updated title
            fontsize=14, y=0.92)

plt.show()

fig = plt.figure(figsize=(6, 6.05), dpi=600) # Add this line to create a figure

```

```

cmap = cm.Spectral # Define the colormap

title = ['December-January-February', 'March-April-Mei', 'June-July-August',
        'September-October-November']

for i in range(4):
    ax = fig.add_subplot(2, 2, i+1, projection=ccrs.PlateCarree())
    mesh = ax.contourf(lon, lat, sla.isel(time=i),
                      levels= np.arange(-8, 8, 0.5), cmap=cmap,
                      transform=ccrs.PlateCarree(), extend = 'both')

    shape_feature = ShapelyFeature(Reader('/content/drive/MyDrive/Colab
Notebooks/Shapefile/LapakGIS_Batas_Kabupaten_2024.shp').geometries(),
                                   ccrs.PlateCarree(), edgecolor="black", facecolor="silver") #
    Membaca shapefile
    ax.add_feature(shape_feature, linewidth=1.0) # Menambahkan shapefile ke peta
    #ax.add_feature(cfeature.COASTLINE, linewidth=2)
    #ax.add_feature(cfeature.BORDERS, linewidth=2, linestyle='--')
    ax.set_extent([109.125, 111.875, -7.375, -5.125], crs=ccrs.PlateCarree())
    # Now you can use pd.to_datetime
    plt.title(title[i], fontsize=9, loc='left') # Changed time to data.time to access the time
    variable from your xarray dataset

cbar_ax = fig.add_axes([1, 0.15, 0.02, 0.7])
cbar = fig.colorbar(mesh, cax=cbar_ax)
cbar.set_label(label='Anomali Tinggi Muka Air Laut (cm)', size=8)

plt.suptitle('Anomali Tinggi Muka Air Laut',

```



```

        fontsize=12, ha='center')

plt.tight_layout()

plt.show()

```

Lampiran 3 *Script* Pengolahan Data .nc ke .exc

1. Mount Google Drive

```

from google.colab import drive
drive.mount('/content/drive')

```

2. Import library

```

import xarray as xr
import pandas as pd

```

3. Buka file NetCDF

```

file_path = '/content/drive/MyDrive/Colab
Notebooks/data_skripsi/SST/SST_Bulanan.nc' # <- Ganti jika file SST Anda
berbeda

```

```

ds = xr.open_dataset(file_path)

```

4. Cek isi dataset (untuk melihat struktur: variabel, dimensi, koordinat)

```

print(ds)

```

5. Koordinat target dari hasil konversi

```

target_lon = 110.418778

```

```

target_lat = -6.951944

```

```

target_depth = 0 # kedalaman laut permukaan

```

6. Ekstraksi variabel SST di titik tersebut, pada kedalaman 0

Gantilah 'longitude', 'latitude', dan 'depth' sesuai nama sebenarnya di ds.coords

```

sst_data = ds['to'].sel(
    longitude=target_lon,
    latitude=target_lat,
    depth=target_depth,

```

```
method='nearest'  
)  
  
# 7. Konversi ke DataFrame dan simpan ke CSV  
df = sst_data.to_dataframe().reset_index()  
csv_path = '/content/drive/MyDrive/Colab  
Notebooks/data_skripsi/SST/SST_Bulanan.csv'  
df.to_csv(csv_path, index=False)  
print("Data SST pada kedalaman 0 m berhasil diekstrak ke:", csv_path)
```