

**ANALISIS PENGARUH DAN JEJAK KARBON PELINDUNG
KOMBINASI PANTAI DALAM MITIGASI DAMPAK TSUNAMI:
STUDI KASUS DI PESISIR PANDEGLANG**

TUGAS AKHIR



LEVINA AMARIA ADRA SANDIA

1212004008

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK DAN ILMU KOMPUTER
UNIVERSITAS BAKRIE**

JAKARTA

2025

**ANALISIS PENGARUH DAN JEJAK KARBON PELINDUNG
KOMBINASI PANTAI DALAM MITIGASI DAMPAK TSUNAMI:
STUDI KASUS DI PESISIR PANDEGLANG**

TUGAS AKHIR

Diajukan sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik



LEVINA AMARIA ADRA SANDIA

1212004008

**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK DAN ILMU KOMPUTER**

UNIVERSITAS BAKRIE

JAKARTA

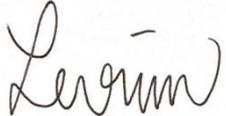
2025

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Tugas Akhir ini adalah hasil karya saya sendiri, dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan dengan benar.

Nama : Levina Amaria Adra Sandia

NIM : 1212004008

Tanda Tangan : 

Tanggal : 27 Mei 2025

HALAMAN PENGESAHAN

Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Levina Amaria Adra Sandia
NIM : 1212004008
Program Studi : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik dan Ilmu Komputer
Judul Tugas Akhir : Analisis Pengaruh dan Jejak Karbon Pelindung Kombinasi Pantai dalam Mitigasi Dampak Tsunami: Studi Kasus di Pesisir Pandeglang

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Bakrie

DEWAN PENGUJI

Pembimbing : Teuku Muhammad Rasyif, S.T., M.T., Ph. D. ()

Penguji 1 : Dr. Ir. Budianto Ontowirjo, Msc. ()

Penguji 2 : Susania Novita Putri, S.T., M.T. ()

Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal : 27 Mei 2025

KATA PENGANTAR

Puji dan syukur saya panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala limpahan rahmat, karunia, dan hidayah-Nya, sehingga saya dapat menyelesaikan penyusunan skripsi ini dengan judul **“ANALISIS PENGARUH DAN JEJAK KARBON PELINDUNG KOMBINASI PANTAI DALAM MITIGASI DAMPAK TSUNAMI: STUDI KASUS DI PESISIR PANDEGLANG”** sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik dan Ilmu Komputer, Universitas Bakrie. Penyusunan skripsi ini tentunya tidak lepas dari bantuan, bimbingan, dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, dengan segala kerendahan hati, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada:

1. Ibu Prof. Ir. Sofia W. Alisjahbana, M.Sc., Ph.D. selaku Rektor Universitas Bakrie.
2. Ibu Fatin Adriati, S.T., M.T. selaku Kepala Program Studi Teknik Sipil sekaligus Dosen Pembimbing Akademik yang telah memberikan arahan kepada penulis selama masa perkuliahan.
3. Bapak Teuku Muhammad Rasyif, S.T., M.T., Ph.D. selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir atas bimbingan, arahan, dan evaluasi yang sangat berarti dalam penyusunan tugas akhir ini.
4. Bapak Dr. Ir. Budianto Ontowirjo, Msc.dan Ibu Susania Novita Putri, S.T., M.T.selaku Dosen Penguji Tugas Akhir yang telah memberikan masukan, kritik, dan saran yang sangat berharga demi penyempurnaan tugas akhir ini.
5. Bapak dan Ibu Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Bakrie atas segala ilmu, bimbingan, serta motivasi yang telah diberikan selama masa perkuliahan, yang menjadi bekal berharga dalam penyusunan tugas akhir ini.
6. Kedua orang tua dan saudara penulis yang telah memberikan doa dan dukungan demi kelancaran kegiatan kuliah dan tugas akhir ini.
7. Muhammad Danu Ega Ahmar yang telah memberikan dukungan dan motivasi tanpa henti kepada penulis dalam menyelesaikan tugas akhir ini.
8. Syafa, Dea, dan Aziz selaku teman-teman satu bimbingan yang telah saling mendukung, berbagi ilmu, dan memberikan semangat selama proses penyusunan tugas akhir ini

9. Viyana, Nabila, dan Nike selaku teman-teman seperjuangan selama masa kuliah yang telah memberikan dukungan dan motivasi hingga proses penyusunan tugas akhir ini dapat terselesaikan.
10. Nabilla, Ani, dan Elsa selaku sahabat penulis yang telah memberikan doa, dukungan, dan motivasi selama proses penyusunan tugas akhir ini.

Jakarta, 22 Mei 2025

Levina Amaria Adra Sandia

HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI

Sebagai sivitas akademik Universitas Bakrie, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Levina Amaria Adra Sandia

NIM : 1212004008

Program Studi : Teknik Sipil

Fakultas : Teknik dan Ilmu Komputer

Jenis Tugas Akhir : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Bakrie **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty-Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul:

ANALISIS PENGARUH DAN JEJAK KARBON PELINDUNG KOMBINASI PANTAI DALAM MITIGASI DAMPAK TSUNAMI: STUDI KASUS DI PESISIR PANDEGLANG

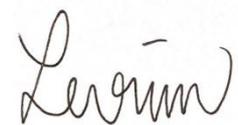
beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Bakrie berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan mempublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta untuk kepentingan akademis.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Jakarta

Pada tanggal : 27 Mei 2025

Yang menyatakan



Levina Amaria Adra Sandia

**ANALISIS PENGARUH DAN JEJAK KARBON PELINDUNG KOMBINASI
PANTAI DALAM MITIGASI DAMPAK TSUNAMI: STUDI KASUS DI PESISIR
PANDEGLANG**

Levina Amaria Adra Sandia

ABSTRAK

Wilayah pesisir Pandeglang, Banten, merupakan salah satu daerah yang rawan terhadap bencana tsunami. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh pelindung kombinasi pantai berupa *seawall* dan *mangrove* dalam mengurangi dampak tsunami, serta menghitung jejak karbon yang dihasilkan dari pembangunan pelindung tersebut. Simulasi penyebaran gelombang tsunami dilakukan menggunakan model numerik COMCOT dua dimensi horisontal, baik untuk kondisi tanpa pelindung maupun dengan pelindung kombinasi pantai. Hasil simulasi menunjukkan bahwa penggunaan pelindung kombinasi pantai mampu menurunkan ketinggian maksimum gelombang tsunami dan jarak inundasi secara signifikan dan mengurangi luas genangan maksimum hingga 39,6% dibandingkan kondisi tanpa pelindung. Dari sisi jejak karbon, Pembangunan *seawall* menghasilkan emisi sebesar 84.172,5 tonCO₂/m³, sedangkan area *mangrove* mampu menyerap hingga 2.344,49 ton/tahun. Dengan kombinasi pelindung tersebut, mitigasi bencana tidak hanya lebih efektif dalam menahan gelombang tsunami, tetapi juga memberikan kontribusi terhadap pengurangan dampak perubahan iklim melalui penyerapan karbon.

Kata kunci: tsunami, pelindung kombinasi pantai, *seawall*, *mangrove*, jejak karbon

***ANALYSIS OF THE IMPACT AND CARBON FOOTPRINT OF COASTAL
PROTECTION COMBINATIONS IN TSUNAMI IMPACT MITIGATION: A CASE
STUDY ON THE PANDEGLANG COAST***

Levina Amaria Adra Sandia

ABSTRACT

The coastal area of Pandeglang, Banten, is one of the regions vulnerable to tsunami disasters. This study aims to analyze the effectiveness of a combined coastal protection system consisting of a seawall and mangroves in reducing the impact of tsunamis, as well as to calculate the carbon footprint generated from the construction of these protective structures. Tsunami wave propagation simulations were conducted using the two-dimensional horizontal numerical model COMCOT, both for conditions without protection and with the combined coastal protection system. The simulation results show that the use of the combined coastal protection system significantly reduces the maximum tsunami wave height and inundation distance, as well as decreasing the maximum inundation area by up to 39,6% compared to the unprotected condition. In terms of carbon footprint, the construction of the seawall generates emissions of 84.172,5 tonsCO₂/m³, while the mangrove area can absorb up to 2.344,49 tons per year. With this combination of protective measures, disaster mitigation is not only more effective in resisting tsunami waves but also contributes to reducing the impact of climate change through carbon absorption.

Keywords: tsunami, combined coastal protection, seawall, mangroves, carbon footprint.

DAFTAR ISI

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS	ii
HALAMAN PENGESAHAN	iii
KATA PENGANTAR	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	vi
ABSTRAK.....	vii
<i>ABSTRACT</i>.....	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL.....	xiii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian	5
1.4 Batasan Masalah	6
1.5 Manfaat Penelitian	6
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	7
2.1 Tsunami.....	7
2.1.1 Penyebab Tsunami	7
2.1.2 Parameter Tsunami	9
2.2 Gempa Bumi.....	11
2.2.1 Parameter Gempa Bumi.....	12
2.2.2 Scalling Laws Gempa dan Dimensi Patahan	15
2.3 Mitigasi Bencana	16
2.3.1 Struktur (<i>Hard Solution</i>).....	17
2.3.2 Non Struktur (<i>Soft Solution</i>)	17
2.3.3 Kombinasi (<i>Combination</i>)	18
2.4 SIG (Sistem Informasi Geografi).....	19
2.5 <i>Shallow Water Equation (SWE)</i>	23
2.6 <i>Climate Change</i>	27
2.6.1 <i>Carbon Footprint</i>	27
2.7 Penelitian Terdahulu	33

BAB III METODE PENELITIAN.....	36
3.1 Metode Penelitian	36
3.2 Bentuk Penelitian.....	37
3.3 Lokasi Penelitian	37
3.4 Metode Pengumpulan Data.....	38
3.4.1 Data Spasial	39
3.4.2 Parameter Tsunami	40
3.4.3 Data Sumber Patahan.....	41
3.4.4 Data Pelindung Kombinasi Pantai	42
3.4.5 Data Jejak Karbon.....	45
3.5 Metode Analisis Data.....	46
3.5.1 Analisis Tutupan Tata Guna Lahan dengan Citra Satelit	46
3.5.2 Simulasi Tsunami dengan Pemodelan Numerik	46
3.5.3 Perhitungan Jejak Karbon pada Pelindung Kombinasi Pantai	47
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	49
4.1 Analisis Tutupan Tata Guna Lahan	49
4.2 <i>Initial Condition</i>	52
4.3 Penjalaran Gelombang Tsunami	53
4.4 Ketinggian Maksimum Tsunami.....	56
4.5 Jarak Inundasi	59
4.6 Estimasi Perhitungan <i>Carbon Footprint</i>	63
BAB V PENUTUP	67
5.1 Kesimpulan	67
5.2 Saran	68
DAFTAR PUSTAKA	70
LAMPIRAN	73

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Ilustrasi Tsunami Gempa Bumi Bawah Laut	8
Gambar 2.2 Ilustrasi Tsunami Aktivitas Vulkanik	8
Gambar 2.3 Ilustrasi Tsunami Longsoran Bawah Laut.....	9
Gambar 2.4 Ilustrasi Tsunami Tumbukan Benda Luar Angkasa.....	9
Gambar 2.5 Parameter Tsunami	10
Gambar 2.6 Jenis Mekanisme Gempa.....	12
Gambar 2.7 Model Patahan	13
Gambar 2.8 <i>Seawall</i> di Jepang	17
Gambar 2.9 Penanaman <i>Mangrove</i> di Kabupaten Sinjai	18
Gambar 2.10 Pembangunan <i>Seawall</i> dan Penanaman Vegetasi di Jepang.....	19
Gambar 2.11 Subsistem Sistem Informasi Geografi	19
Gambar 2.12 Komponen Sistem Informasi Geografi	20
Gambar 2.13 Klasifikasi Tata Guna Lahan pada SIG	20
Gambar 2.14 Perbedaan Data Vektor dan Data Raster pada SIG	21
Gambar 2.15 Indeks Spektral Peta NDVI.....	23
Gambar 2.16 Skema <i>Leap Frog Finite Difference</i>	25
Gambar 2.17 Penyebab Terjadinya Perubahan Iklim.....	27
Gambar 2.18 Komponen Jejak Karbon Aktivitas Manusia.....	28
Gambar 2.19 Dinamika Penyimpanan Karbon Pada <i>Mangrove</i>	30
Gambar 2.20 Jenis Bangunan <i>Seawall</i>	33
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian.....	36
Gambar 3.2 Peta Lokasi Kecamatan Labuan	38
Gambar 3.3 Peta Lokasi Penelitian	38
Gambar 3.4 Peta Topografi dan Batimetri	39
Gambar 3.5 Citra Satelit Lokasi Penelitian.....	40
Gambar 3.6 Bentuk <i>Multilayer</i> Area untuk Program COMCOT.....	40
Gambar 3.7 Pemodelan Megathrust 1 dan 2	42
Gambar 3.8 Letak Pelindung Kombinasi Pantai (<i>Seawall</i> dan <i>Mangrove</i>)	43
Gambar 3.9 Struktur Bangunan Pelindung <i>Seawall</i>	43
Gambar 4.1 Panjang <i>Mangrove</i>	44
Gambar 4.2 Panjang <i>Seawall</i>	44
Gambar 4.3 Tutupan Tata Guna Lahan Tanpa Pelindung Kombinasi.....	50
Gambar 4.4 Tutupan Tata Guna Lahan dengan Pelindung Kombinasi.....	50
Gambar 4.5 Modifikasi Data Topografi Pada <i>Seawall</i>	52
Gambar 4.6 <i>Initial Condition</i> Simulasi Tsunami	53
Gambar 4.7 Penjalaran Gelombang Tsunami Skenario 1 <i>Layer</i> 1	54
Gambar 4.8 Penjalaran Gelombang Tsunami Skenario 1 <i>Layer</i> 5	55
Gambar 4.9 Penjalaran Gelombang Tsunami Skenario 2 <i>Layer</i> 5	56
Gambar 4.10 Ketinggian Maksimum Skenario 1.....	57
Gambar 4.11 Ketinggian Maksimum Skenario 2.....	58
Gambar 4.12 Perbedaan Ketinggian Maksimum Skenario 1 dan Skenario 2.....	59
Gambar 4.13 Jarak Inundasi Maksimum Skenario 1	60
Gambar 4.14 Jarak Inundasi Maksimum Skenario 2	60
Gambar 4.15 Tinjauan Wilayah Utara Kecamatan Labuan.....	61
Gambar 4.16 Potongan Melintang Wilayah Utara Kecamatan Labuan	61
Gambar 4.17 Tinjauan Wilayah PLTU	62
Gambar 4.18 Potongan Melintang Wilayah PLTU	62

Gambar 4.19 Perbedaan Jarak Inundasi Terjauh dari Skenario 1 dan Skenario 2 63
Gambar 4.20 Potongan Melintang dari Jarak Inundasi Terjauh..... 63

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Band <i>Landsat 8</i>	22
Tabel 2.2 Analisis Serapan Karbon <i>Mangrove</i>	29
Tabel 2.3 Koefisien Manning Tutupan Lahan.....	32
Tabel 2.4 Penelitian Terdahulu.....	34
Tabel 3.1 Informasi Parameter Simulasi untuk Program COMCOT	41
Tabel 3.2 Parameter Sumber Patahan	42
Tabel 4.1 Luas Tutupan Tata Guna Lahan dengan Pelindung Kombinasi	51

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia adalah negara yang rawan bencana dilihat dari aspek geografis dan demografis. Letak geografis Indonesia di antara dua benua dan dua samudera menyebabkan Indonesia rawan terhadap bencana alam. Secara geologis, Indonesia terletak pada 3 (tiga) lempeng yaitu Lempeng Eurasia, Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Pasifik yang mengakibatkan potensi bencana gempa, tsunami, dan longsor. Tsunami merupakan salah satu ancaman bencana untuk banyak wilayah pesisir di Indonesia. Bencana ini umumnya dipicu oleh terjadinya gempa bumi di laut yang menyebabkan pergeseran secara vertikal di dasar laut. Indonesia tercatat telah mengalami lebih kurang dari 172 tsunami. Beberapa catatan bencana tsunami di Indonesia adalah Tsunami Aceh, Tsunami Selat Sunda, dan lain-lain. Tsunami Aceh pada tahun 2004 yang meluluhlantakkan kawasan pesisir Samudera Hindia. Pusat gempa berada di perairan Samudera Hindia, dengan magnitudo sebesar 9,2 pada kedalaman 30 km. Penjalaran gelombang tsunami Aceh mencapai sepuluh negara yang berbatasan langsung dengan Samudera Hindia (Shaw, 2006). Bencana Tsunami Aceh menduduki peringkat pertama, dimana korban jiwa yang tercatat lebih dari 200.000 jiwa (Iemura et al., 2006).

Peristiwa tsunami lainnya yaitu Tsunami Selat Sunda 2018 dipicu oleh sumber pembangkit tsunami non tektonik yaitu aktivitas erupsi Gunung Anak Krakatau. Kejadian tsunami tersebut tanpa didahului oleh peringatan dini. Menurut ESDM (2023), kejadian tsunami telah mengakibatkan 437 orang meninggal dunia, wilayah yang terkena dampak tsunami salah satunya Kabupaten Pandeglang. Menurut data Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi (PVMBG), tinggi rendaman (*flow depth*) maksimum adalah 390 cm di Kecamatan Sumur dan jarak landaan (*inundation distance*) maksimum adalah 274 m di Kecamatan Cigeulis, Kabupaten Pandeglang.

Berdasarkan letak wilayah Pandeglang yang berada di antara Lempeng Eurasia dan Lempeng Indo-Australia, menjadikan wilayah Pandeglang memiliki potensi besar rawan tsunami. Pandeglang memiliki batas sebelah utara berbatasan dengan Kabupaten Serang, sebelah Barat berbatasan dengan Selat Sunda, sebelah Selatan berbatasan dengan Samudera Indonesia, dan sebelah Timur berbatasan dengan Kabupaten Lebak. Hal ini

didukung oleh lokasi Pandeglang yang berbatasan langsung dengan Selat Sunda dan merupakan kawasan Cincin Api Pasifik, karena berada di pertemuan Lempeng IndoAustralia dan Lempeng Eurasia (ESDM, 2018). Menurut Pepen (2022), zona patahan area Selatan Jawa dapat diketahui adanya tingkat slip defisit yang tinggi, dimana terdapat energi tektonik yang tinggi dan belum dilepaskan pada zona patahan tersebut. Adanya zona patahan dengan tingkat slip defisit yang tinggi pada area tersebut, dapat menyebabkan gempa bumi yang mengakibatkan tsunami terutama jika patahan tersebut berada di laut. Oleh karena itu, wilayah Pandeglang termasuk salah satu wilayah yang harus dilindungi karena memiliki potensi bencana tsunami yang tinggi.

Pandeglang memiliki potensi besar dilihat dari aspek pariwisata yang dapat meningkatkan laju perekonomian sehingga harus dilindungi. Wilayah ini memiliki tujuan pariwisata yang beragam mulai dari wisata alam, budaya, dan lainnya. Kawasan pertanian di Pandeglang juga luas, mulai dari tanaman pangan, hortikultura, perkebunan, dan peternakan. Oleh karena itu, wilayah Pandeglang yang memiliki dampak positif dengan potensi peningkatan perekonomian, maka wilayah ini perlu dilakukan mitigasi mengingat keberadaan Pandeglang yang rawan terhadap bencana alam salah satunya tsunami. Salah satu upaya mitigasi untuk tsunami yaitu dilakukan pembangunan pelindung pantai.

Bangunan pantai merupakan segala jenis infrastruktur yang dibangun sebagai pelindung pantai dan darat atau pelabuhan dari kerusakan karena serangan gelombang maupun arus (BPSDM PUPR, 2017). Pada umumnya, alam telah menyediakan mekanisme perlindungan alami yang efektif yaitu berupa hutan pantai dan *mangrove* sebagai pelindung alami pantai (Zikra, 2009), yang dimana tumbuhan pantai ini akan memecahkan energi gelombang (Hartati et al., 2016). Akan tetapi, pelindung alami *mangrove* memiliki kekurangan, yaitu tingkat kerusakan *mangrove* berada di kelas sedang dilihat dari kondisi ancaman dan kerentanan tsunami (Vitasari, 2015). Dengan begitu, bangunan pelindung pantai struktural buatan berupa dinding laut atau *revetment* atau tanggul dapat didesain sebagai perkuatan pantai yang mampu menahan gelombang yang cukup besar (Hidayat, 2006). Namun, apabila hanya dilakukan pembangunan berupa dinding penahan akan dapat melepaskan arus deras yang lebih intens jika dinding tersebut pecah dan akan banyak barang yang terbawa oleh arus deras tersebut. Oleh karena itu, dilakukan pembangunan pelindung kombinasi pantai untuk peredaman gelombang serta menahan barang terbawa arus (Hakim, 2014).

Efektifitas dari pelindung pantai telah dikaji oleh beberapa peneliti, antara lain simulasi peredaman gelombang pada wilayah Palu dan pemodelan numerik *mangrove* yang digabungkan dengan tanggul di atas topografi datar. Simulasi peredaman gelombang telah dilakukan untuk wilayah Palu, Sulawesi Tengah berdasarkan data tsunami tahun 2018 (Jessica et al., 2023). Hasil simulasi menunjukkan bahwa dengan adanya pelindung pantai kombinasi (bangunan pantai dan *mangrove*) sangat mempengaruhi pada karakteristik gelombang transmisi, dan kecepatan. Terdapatnya bangunan pantai dan hutan *mangrove*, mampu mereduksi transmisi gelombang hingga 20 – 100 %, juga mampu mereduksi kecepatan gelombang hingga 100% secara signifikan dalam keadaan muka air relatif (*Mean Water Level*) , mereduksi hingga 87% pada keadaan elevasi rata-rata (*Sea Water Level*), dan mereduksi hingga 22% pada keadaan pasang tertinggi (*High Water Level*). Penelitian simulasi lainnya adalah dilakukan pemodelan numerik *mangrove* yang digabungkan dengan tanggul di atas topografi datar. Menurut Iryanto (2019), hasil simulasi menunjukkan bahwa *mangrove* yang dikombinasikan dengan tanggul vertikal dapat mengurangi ketinggian gelombang sebesar 10,5% dan mencegah gelombang melewati tanggul. Pada kedua penelitian tersebut hanya diketahui seberapa besar tingkat redaman gelombang tsunami pada bangunan pantai. Semakin berkembangnya teknologi, pembangunan dengan memperhatikan *carbon footprint* telah menjadi standar penilaian yang kerap dibicarakan oleh para peneliti di Indonesia, karena dapat mengakibatkan perubahan iklim (BAPPENAS, 2021).

Perubahan iklim diakibatkan oleh adanya pemanasan global yang berasal dari jejak karbon karena adanya aktivitas manusia, seperti penggunaan kendaraan bermotor dan bahan pembangunan. Emisi yang dilepaskan oleh aktivitas manusia berkontribusi terhadap jejak karbon sehingga dapat menyebabkan perubahan iklim. Berdasarkan worldometer, Indonesia berada pada urutan keenam negara yang memiliki total karbon terbanyak pada tahun 2022. Upaya yang dilakukan pemerintah menurut Undang-Undang Nomor 16 Tahun 2016 yaitu menurunkan emisi karbon sebesar 29% pada tahun 2030, sekaligus upaya dalam pengendalian perubahan iklim. Menurut simulasi untuk model pengelolaan *mangrove* di Kabupaten Sinjai, Sulawesi Selatan, hasil simulasi menunjukkan bahwa proporsi emisi berbanding terbalik dengan perubahan luas *mangrove*. Berdasarkan hasil skenario sedang dan ambisius untuk sektor *mangrove*, pada kondisi dasar, *net emission mangrove* mencapai nilai negatif, di mana penyerapan lebih besar dari pelepasan emisi pada tahun 2041 (-2,26 ton CO₂ eq) hingga tahun 2060 (-

15,10 ton CO₂ eq). Pada kondisi sedang, mencapai nilai negatif pada tahun 2027 (-1,49 ton CO₂ eq) hingga tahun 2060 (-324 ton CO₂ eq). Pada kondisi ambisius, mencapai nilai negatif pada tahun 2024 (-14,5 ton CO₂ eq) hingga tahun 2060 (-719 ton CO₂ eq). *Net emission mangrove* akan dicapai pada tahun 2041 untuk kondisi dasar, tahun 2027 untuk kondisi sedang, dan tahun 2024 untuk kondisi ambisius. Aktivitas lain dalam kehidupan yang menghasilkan karbon yaitu adanya proyek pembangunan konstruksi.

Di Indonesia pada tahun 2005, bahan pembangunan berupa semen merupakan penyumbang emisi sebesar 13% dari total emisi gas rumah kaca. Rata-rata emisi gas rumah kaca semen di Indonesia pada tahun 2005 adalah 1.444 CO₂ eq per tahun. Salah satu penggunaan semen pada konstruksi adalah pembuatan beton. Menurut analisis perhitungan, untuk beton dengan perbandingan air dan beton sebesar 1:2, nilainya berfluktuasi antara 347 dan 351 kg CO₂ eq per m³. Campuran beton mencakup total semen, agregat, dan emisi tidak signifikan lainnya seperti penggunaan air, penempatan beton, dan bahan peledak (ESMAP, 2009). Dari hasil perhitungan gas emisi rumah kaca untuk beton, dapat dibuktikan bahwa aktivitas dalam kehidupan perlu memperhatikan jejak karbon yang dihasilkan. Dengan adanya pelindung kombinasi pantai, diharapkan dapat tercapai hasil jejak karbon yang netral, sehingga perlindungan pesisir tidak hanya efektif dalam menghadapi bencana alam, tetapi juga dapat mengurangi dampak negatif dari perubahan iklim.

Pemodelan tsunami dapat digunakan untuk menilai efektifitas dari metode kombinasi terhadap bencana tsunami. Salah satu model yang dapat digunakan ialah model COMCOT. *Cornell Multi-grid Coupled Tsunami Model (COMCOT)* adalah model hidrostatik yang menggunakan metode beda hingga *leap frog* untuk menyelesaikan persamaan air dangkal dengan skema bertahap. Model COMCOT yang digunakan adalah horizontal dua dimensi untuk menghitung kecepatan rata-rata kedalaman serta mensimulasikan karakteristik tsunami secara numerik. Salah satu contoh penelitian yang melakukan simulasi tsunami menggunakan COMCOT adalah simulasi tsunami di Sabang. Hasil numerik dari simulasi tsunami di Sabang, zona bahaya tsunami di Sabang mencakup sebagian besar Kota Sabang. Dari hasil simulasi numerik tersebut menghasilkan waktu kedatangan tsunami, amplitudo, dan ketinggian tsunami (Jihad, 2023). Dari hasil simulasi tersebut, dapat dibuktikan bahwa penggunaan program COMCOT ini dapat mensimulasikan terjadinya tsunami dengan memperhatikan waktu dan gelombang tsunami dengan program COMCOT.

Penelitian ini bertujuan menganalisis pengaruh pelindung kombinasi pantai terhadap gelombang tsunami serta menghitung emisi karbon yang dihasilkan selama pembangunan pelindung pantai kombinasi di Pandeglang, Banten. Proses penelitian efektivitas pelindung kombinasi pantai dibantu oleh simulasi numerik melalui program COMCOT model horizontal dua dimensi. Simulasi penyebaran tsunami pada skenario 1 atau tanpa pelindung kombinasi pantai (*mangrove* dan *seawall*), menggunakan data topografi Pandeglang, Banten, kemudian dimasukkan parameter gempa. Setelah itu, simulasi penyebaran tsunami dijalankan untuk menampilkan pergerakan gelombang, waktu, dan ketinggian. Pada data topografi untuk simulasi penyebaran tsunami pada skenario 2 atau dengan pelindung kombinasi pantai (*mangrove* dan *seawall*), diperlukan modifikasi peninggian data topografi untuk memberi tanda adanya bangunan *seawall* dan perhitungan koefisien kekasaran untuk memberi tanda adanya hutan *mangrove*. Jejak karbon dapat dihitung dari karbon yang dihasilkan dari bahan bangunan yang digunakan pada pembangunan *seawall*, serta karbon yang diserap oleh *mangrove*. Melalui penulisan ini, peneliti berharap dapat memberikan gambaran akurat mengenai penyebaran gelombang akibat bencana tsunami serta jejak karbon yang dihasilkan.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana penyebaran gelombang tsunami pada skenario 1 atau tanpa adanya pelindung kombinasi pantai (*mangrove* dan *seawall*) menggunakan program COMCOT di Pandeglang, Banten?
2. Bagaimana penyebaran gelombang tsunami pada skenario 2 atau dengan adanya pelindung kombinasi pantai (*mangrove* dan *seawall*) menggunakan program COMCOT di Pandeglang, Banten?
3. Bagaimana jumlah nilai *carbon footprint* yang dihasilkan dari proses pembangunan pelindung kombinasi pantai (*mangrove* dan *seawall*) terhadap bencana tsunami di Pandeglang, Banten?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Menganalisis penyebaran gelombang tsunami pada skenario 1 atau tanpa adanya pelindung kombinasi pantai (*mangrove* dan *seawall*) menggunakan program COMCOT yang berfokus di Pandeglang, Banten
2. Menganalisis penyebaran gelombang tsunami pada skenario 2 atau dengan adanya pelindung kombinasi pantai (*mangrove* dan *seawall*) menggunakan program COMCOT yang berfokus di Pandeglang, Banten

3. Menganalisis jumlah nilai *carbon footprint* yang dihasilkan dari proses pembangunan pelindung kombinasi pantai (*mangrove* dan *seawall*) terhadap bencana tsunami menggunakan program COMCOT yang berfokus di Pandeglang, Banten

1.4 Batasan Masalah

1. Penelitian ini hanya berfokus pada wilayah Kecamatan Labuan, Pandeglang, Banten
2. Penelitian ini hanya memperhitungkan hasil *carbon footprint* dilihat dari volume bangunan *seawall* setiap m³ dan luas *mangrove* setiap hektar
3. Penelitian ini hanya menggunakan satu nilai koefisien kekasaran untuk satu jenis *mangrove*
4. Penelitian ini hanya memperhitungkan *carbon footprint* bahan material pada pelindung *seawall*
5. Penelitian ini tidak memperhitungkan nilai stabilitas dari *seawall* dan hanya menggunakan tinggi bangunan *seawall* sebesar 10 meter
6. Penelitian ini tidak memperhitungkan sungai dan bangunan lainnya

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui hasil simulasi penyebaran tsunami dan perhitungan estimasi mengenai jumlah nilai *carbon footprint* yang dihasilkan dari proses pembangunan pelindung kombinasi pantai (*seawall* dan *mangrove*) di Pandeglang, Banten. Simulasi penyebaran tsunami akan dilakukan menggunakan program COMCOT horizontal dua dimensi. Hasil *carbon footprint* dapat dijadikan referensi untuk peneliti berikutnya agar dapat memperhatikan karbon yang dihasilkan akibat dari aktivitas kehidupan manusia. Melalui penelitian ini, peneliti berusaha untuk memberikan pengetahuan baru mengenai potensi risiko yang dihasilkan akibat bencana tsunami yang terjadi kepada masyarakat maupun pemerintah.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Tsunami

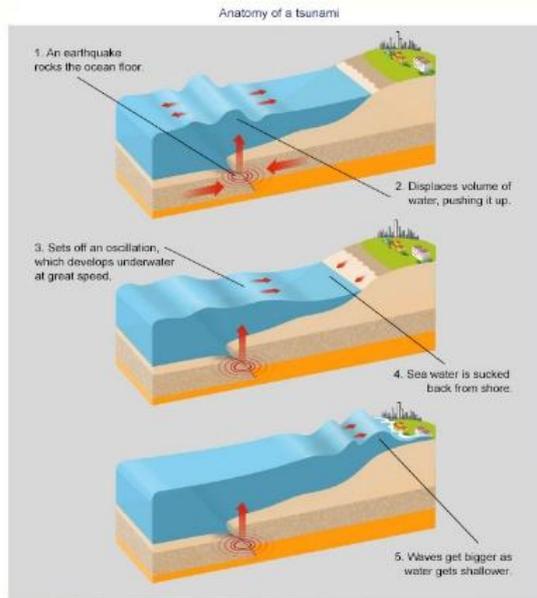
Tsunami adalah rangkaian gelombang laut yang menjalar, memiliki kecepatan hingga lebih dari 900 km per jam (ESDM, 2018). Tsunami tidak terlihat saat masih berada jauh di tengah lautan, namun begitu mencapai wilayah dangkal, ketinggiannya meningkat, sementara kelajuannya menurun. Tinggi tsunami saat mendekati pantai mengalami perbesaran karena adanya penumpukan massa air akibat adanya penurunan kesempatan penjalaran (Sugito, 2008).

2.1.1 Penyebab Tsunami

Tsunami disebabkan oleh peristiwa adanya perpindahan air laut dengan jumlah besar, antara lain gempa bumi bawah laut, aktivitas vulkanik, longsor yang terjadi di dasar laut, dan jatuhnya benda bermassa besar ke dalam laut (Febby, 2001). Sekitar 90% tsunami terutama terjadi disebabkan oleh gempa bumi di dasar laut, sedangkan penyebab tsunami lainnya jarang terjadi. Tsunami terjadi akibat adanya pergerakan di dasar laut secara tiba-tiba dan mengalami perpindahan vertikal, mengakibatkan dasar laut naik atau turun, sehingga mengakibatkan aliran energi air laut yang sampai di pantai menjadi gelombang besar dan mengakibatkan tsunami. Beberapa penyebab tsunami sebagai berikut :

a. Gempa Bumi Bawah Laut

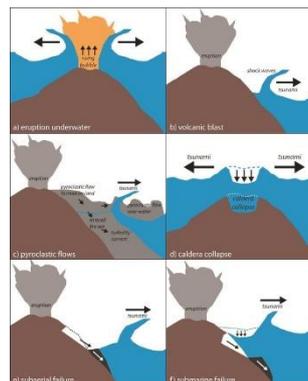
Dapat dilihat pada **Gambar 2.1** bahwa salah satu penyebab tsunami yaitu terjadinya gempa bumi bawah laut, yang terjadi di 100 km bagian atas dari kerak samudera, namun gempa bumi yang berpusat di daratan yang berdekatan dengan laut juga dapat menimbulkan tsunami (Bryant, 2008). Apabila gempa terjadi di bawah laut, air di atas wilayah yang lempengnya bergerak akan berpindah posisi dari posisi kesetimbangannya (Sugito, 2008). Tidak semua gempa bumi menghasilkan tsunami, hanya gempa yang terjadi di laut dengan magnitudo sebesar 7.0 atau lebih dan kedalaman < 70 km (BMKG, 2010).



Gambar 2.1 Ilustrasi Tsunami Gempa Bumi Bawah Laut (Ibtihaj, 2021)

b. Aktivitas Vulkanik

Peningkatan aktivitas vulkanik pada gunung berapi disebabkan oleh pergeseran lempeng di dasar laut, yang dapat memberikan getaran air laut di atas lempeng tersebut, sehingga dapat menaikkan air dan membangkitkan gelombang tsunami (Sugito, 2008). Massa besar air laut yang mengelilingi gunung berapi akan mengalir di sekitarnya dan air laut meluap sebagai tsunami (Shiki et al., 2008). Ilustrasi aktivitas vulkanik yang menyebabkan tsunami dapat dilihat pada **Gambar 2.2**.

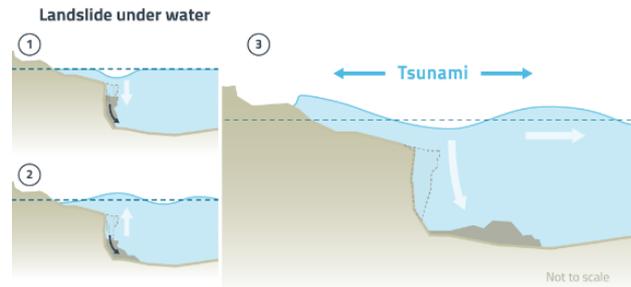


Gambar 2.2 Ilustrasi Tsunami Aktivitas Vulkanik (Mutaqin et al., 2019)

c. Longsoran Bawah Laut

Pada **Gambar 2.3** terjadinya longsoran bawah laut merupakan pergerakan sedimen yang padat, yang disebabkan oleh gempa bumi atau guncangan aktivitas vulkanik sehingga membuat sedimen yang tidak stabil

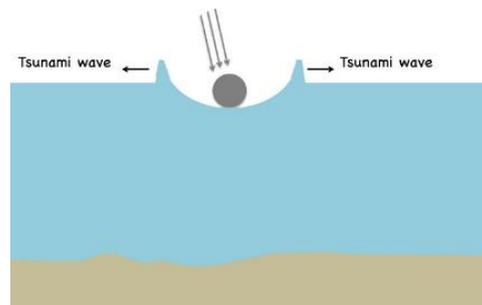
menjadi bergerak. Selain itu, longsor juga disebabkan karena secara tiba-tiba adanya pergerakan lempeng atau retakan di perbatasan antar lempeng tektonik, yang disebut dengan patahan atau *fault* (Sugito, 2008). Oleh karena itu, longsor bawah laut dapat memicu terjadinya tsunami (Shiki et al., 2008)



Gambar 2.3 Ilustrasi Tsunami Longsor Bawah Laut (Ibtihaj, 2021)

d. Tumbukan Benda Luar Angkasa

Berdasarkan ilustrasi pada **Gambar 2.4** Benda luar angkasa, seperti meteor, yang mencapai permukaan bumi dan mencapai laut dapat menghasilkan gelombang besar dan menyebabkan terjadinya tsunami. (Bryant, 2008). Tumbukan dari benda luar angkasa yang masuk ke laut akan menghasilkan kawah di bawah laut, kemudian air laut yang mengelilingi lokasi tumbukan akan mengalir masuk ke dalam kawah bawah laut tersebut, dan air mengalir keluar menjadi tsunami. (Shiki et al., 2008).

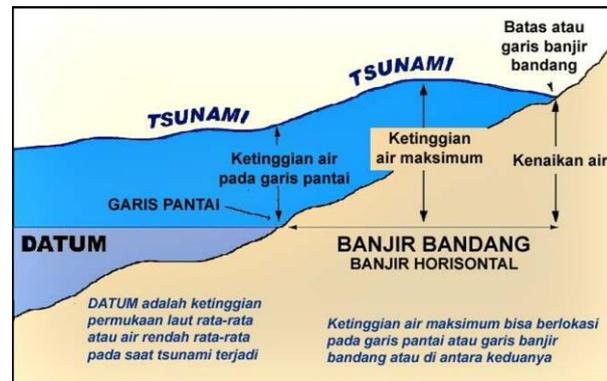


Gambar 2.4 Ilustrasi Tsunami Tumbukan Benda Luar Angkasa (Grezio et al., 2017)

2.1.2 Parameter Tsunami

Gelombang tsunami yang memasuki daratan memiliki beberapa istilah yang biasa disebut dengan parameter tsunami. Dengan mengetahui parameter tsunami, dapat mengetahui akibat yang dihasilkan dari terjadinya tsunami dan memberikan mitigasi untuk wilayah pesisir pantai. Parameter tsunami juga dapat memberikan

pengetahuan akan ancaman yang terjadi akibat tsunami. Istilah dalam parameter tsunami dapat dilihat pada **Gambar 2.5**.



Gambar 2.5 Parameter Tsunami (UNESCO, 2006)

a. Gelombang Tsunami yang Datang (*Incoming Tsunami Wave*)

Gelombang tsunami yang datang adalah gelombang tsunami yang tiba pertama, menimbulkan lekuk awal atau penurunan dalam tinggi permukaan laut. Gelombang yang akan mencapai daratan ini memiliki kekuatan besar dan kecepatan tinggi sehingga gelombang yang akan dihasilkan besar, akibatnya gelombang tersebut dapat menghantam wilayah daratan dan dapat menimbulkan kerusakan.

b. Letak Garis Pantai (*Shoreline Position*)

Garis pantai menandakan letak garis dimana sebelum terjadinya tsunami, yang menunjukkan perubahan garis pantai sebelum dan setelah terjadinya tsunami. Selain mengetahui perubahan garis pantai, juga dapat mengetahui wilayah permukiman sekitar pesisir yang akan terancam akibat terjadinya tsunami dan dapat menghitung parameter tsunami lainnya, seperti kedalaman air (*flow depth*), ketinggian air maksimum (*maximum tsunami height*), jarak genangan pada daratan (*inundation distance*), dan ketinggian maksimum gelombang di daratan (*run-up*).

c. Kedalaman Air (*Flow Depth*)

Kedalaman air pada tsunami yaitu selisih antara tingkat kenaikan tanda permukaan air dengan tingkat kenaikan permukaan air laut pada saat tsunami, yang dihitung dari ketinggian topografi. Setiap jangkauan *flow depth* dari jarak genangan di daratan berbeda – beda tergantung topografi permukaan pantai tersebut. Kedalaman air diukur secara tegak lurus vertikal dari letak garis pantai, yang dapat mengetahui potensi ketinggian tsunami yang dapat dicapai ketika menghantam daratan.

d. Tinggi Maksimum Tsunami (*Max Tsunami Height*)

Tinggi maksimum tsunami adalah titik tertinggi permukaan air laut di wilayah daratan pada saat tsunami. Wilayah yang memiliki laut dangkal cenderung memiliki ketinggian tsunami yang lebih besar, karena pengaruh kecepatan gelombang yang menghantam wilayah dengan kedalaman dangkal, sehingga akan terjadi pemupukan air dan menghasilkan tinggi maksimum tsunami.

e. Jarak Genangan Horizontal (*Inundation Horizontal Distance*)

Inundation Horizontal Distance merupakan jarak horizontal terjauh yang dijangkau oleh gelombang tsunami diukur dari garis pantai. Semakin landai pantai maka jarak jangkauan inundasi semakin jauh dan panjang diukur dari garis pantai. Pengukuran jarak ini dapat melihat wilayah daratan yang dibanjiri air karena tsunami, sehingga dapat diketahui jarak wilayah daratan yang terancam tsunami hingga yang paling sedikit terancam tsunami.

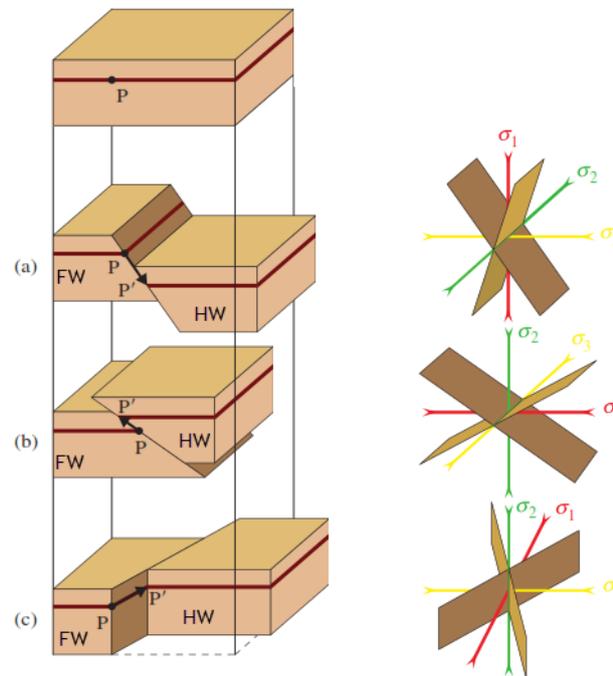
f. Kenaikan Air (*Run-Up Height*)

Run-up yaitu ketinggian tsunami pada titik genangan maksimum di daratan dihitung dari letak garis pantai saat terjadinya tsunami. Secara praktis, kenaikan air hanya diukur dimana terdapat bukti jelas dari batas genangan di pantai, yang dapat mengetahui batas terjauh dari hasil genangan yang dihasilkan akibat terjadinya tsunami.

2.2 Gempa Bumi

Gempa bumi adalah peristiwa bergetarnya bumi akibat pelepasan energi di dalam bumi secara tiba-tiba, ditandai dengan patahnya lapisan batuan pada kerak bumi. Energi yang dihasilkan merambat kesegala arah berupa gelombang gempa bumi sehingga efeknya dapat dirasakan sampai ke permukaan bumi (BMKG, 2015). Mekanisme gempa bumi secara singkat yaitu apabila terdapat suatu batuan yang memberikan pergerakan terhadap batuan yang lain. Batuan bersifat elastis sehingga apabila mendapat tekanan akan berubah bentuk, setelah kekuatan tekanan melebihi nilai elastisitas batuan, maka batuan tersebut akan patah (Hidayat, 1997). Pada **Gambar 2.6** dapat dilihat jenis patahan yang dihasilkan. Menurut Parriaux (2018), berdasarkan arah gerak batuan dan gaya jenis patahan, yaitu patahan normal (*Normal Fault*) terbentuk karena tekanan gaya maksimum terhadap vertikal mengakibatkan salah satu batuan bergerak ke bawah mengikuti bidang patahan, patahan naik (*Reverse Fault*) terbentuk karena gaya maksimum berada pada batuan dengan arah horizontal mengakibatkan salah satu bagian batuan berarah ke atas,

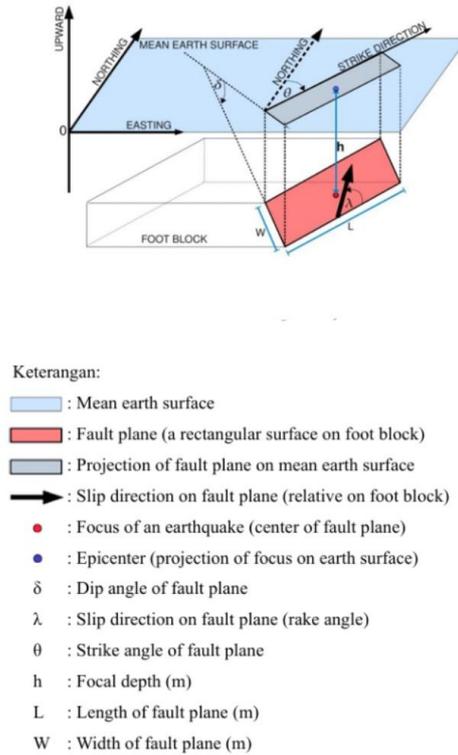
dan patahan mendatar (*Strike Slip Fault*) yang dapat bergerak secara vertikal maupun horizontal pada bidang batuan akibat gaya yang dihasilkan. Akibat adanya pergeseran batuan tersebut, energi yang tersimpan akan dilepaskan dalam bentuk getaran yang disebut dengan gempa bumi (Ari Sungkowo, 2016).



Gambar 2.6 Jenis Mekanisme Gempa untuk: a) *Normal Faults* , b) *Reverse Faults* , dan c). *Strike-Slip Faults* (Parriaux, 2018)

2.2.1 Parameter Gempa Bumi

Parameter gempa bumi adalah informasi yang berhubungan dengan kejadian peristiwa gempa bumi yang membantu untuk memahami peristiwa gempa bumi. Pada **Gambar 2.7** dapat dilihat pemodelan patahan yang dikembangkan oleh Okada (1985) yang menunjukkan pergerakan mekanisme gempa bumi. Model ini berguna untuk menggambarkan dan memahami karakteristik serta mekanisme yang terjadi selama gempa bumi. Selain itu, model yang dikembangkan oleh Okada (1985) juga sering dimanfaatkan dalam studi mengenai tsunami, khususnya untuk menghitung perubahan awal permukaan laut akibat gempa bawah laut. Karena telah melalui proses validasi secara kuantitatif maupun kualitatif, model ini dapat diaplikasikan dalam berbagai bidang penelitian.



Gambar 2.7 Model Patahan (Wang, 2009)

a. Kekuatan Gempa Bumi (*Magnitude*)

Magnitude pada gempa atau kekuatan dari gempa bumi adalah salah satu parameter utama gempa bumi yang menunjukkan besarnya kekuatan gempa bumi di sumbernya. Terdapat empat jenis magnitude yang umum digunakan, yaitu *magnitude local* (M_L) yang diukur berdasarkan amplitudo sinyal dari garis nol ke puncak pada seismogram, *magnitude body* (M_B) yang sangat akurat untuk gempa skala lokal maupun regional, *magnitude surface* (M_S) yang didapatkan dari hasil pengukuran terhadap gelombang permukaan, dan *magnitude moment* (M_W) yang dapat diestimasi dari dimensi pergeseran bidang patahan.

b. Waktu Terjadinya Gempa Bumi (*Origin Time – OT*)

Waktu terjadinya gempa bumi adalah waktu dimana terlepasnya penumpukan tegangan yang terbentuk gelombang gempa bumi, yang dinyatakan dalam hari, tanggal, bulan, tahun, jam, menit, dan detik dalam satuan UTC (*Universal Time Coordinated*) (Stein, S.; Wysession, 2003). *Origin Time* dimulai dari momen pertama ketika patahan mulai bergerak hingga menyebabkan getaran yang dirasakan. Parameter ini penting dalam menentukan waktu tiba gelombang yang dihasilkan pada berbagai tempat.

c. Episentrum (*Epicenter*)

Parameter episentrum pada gempa bumi merupakan titik di permukaan bumi yang menyatakan refleksi tegak lurus dari hiposenter atau titik pusat gempa bumi. Letak episentrum dibuat dalam sistem koordinat kartesius bola bumi atau koordinat geografis yang dinyatakan dalam derajat lintang dan bujur (Garini, 2020)

d. Kedalaman Gempa Bumi (*Focal Depth*)

Kedalaman gempa bumi merupakan parameter yang menunjukkan kedalaman titik pusat dibawah episentrum gempa bumi. Berdasarkan *focal depth*, yaitu gempa bumi dengan *focal depth* 70 km disebut gempa dangkal, gempa bumi dengan *focal depth* antara 70-300 km disebut gempa intermedit, dan gempa bumi dengan *focal depth* di bawah 300 km disebut gempa dalam. Batas *focal depth* adalah 700 km (Hidayat, 1997).

e. Dislokasi (*Dislocation*)

Dislokasi dari parameter gempa bumi adalah jarak gerak relatif antara blok patahan bawah dan blok patahan atas pada bidang patahan (Rasyif, 2014). Parameter ini mengacu pada pergeseran atau perubahan posisi batuan yang terjadi akibat gempa. Dislokasi terjadi di sepanjang patahan ketika tekanan di dalam bumi menumpuk melebihi kekuatan gesekan pada patahan dan mengakibatkan batuan bergerak secara tiba-tiba.

f. Panjang (*Length - L*)

Nilai panjang pada parameter gempa bumi menunjukkan panjang patahan yang mengalami pergeseran atau retakan yang terjadi selama gempa bumi yang mempengaruhi kekuatan gempa dan besarnya dampak yang ditimbulkan. Patahan yang lebih panjang akan menghasilkan gempa bumi dengan nilai magnitude yang lebih besar, dan sebaliknya.

g. Lebar (*Width - W*)

Parameter lebar pada gempa bumi menunjukkan lebar patahan yang mengalami pergeseran selama gempa bumi. Parameter ini mengukur jarak horizontal atau vertikal dari bidang patahan yang diukur dari atas hingga bawah bidang patahan yang sejajar dengan sudut kemiringan patahan.

h. *Strike Direction* (θ)

Strike Direction merupakan parameter sudut yang dibentuk oleh arah patahan dengan arah utara bumi. Umumnya pengukuran *strike* diukur searah dengan jarum jam hingga patahan. Sudut yang dihasilkan oleh *strike* berkisar antara 0 derajat hingga 360 derajat (Pranata, 2017)

i. *Dip Angle* (δ)

Dip Angle menunjukkan sudut yang dibentuk oleh bidang patahan terhadap bidang horizontal dan diukur pada bidang vertikal yang arahnya tegak lurus terhadap jurus patahan. *Dip Angle* membentuk sudut antara 0 derajat hingga 90 derajat (Pranata, 2017). Posisi 0 derajat menunjukkan patahan yang sejajar dengan permukaan bumi atau garis horizontal. Sedangkan 90 derajat menunjukkan patahan yang tegak lurus atau garis vertikal.

j. *Slip Direction* (λ)

Slip Direction adalah sudut yang dibentuk dari arah patahan dengan arah slipnya. *Slip Direction* dapat bernilai positif pada patahan naik dan bernilai negatif pada patahan turun. Sudut yang dihasilkan berkisar antara -180 derajat hingga 180 derajat (Pranata, 2017).

2.2.2 Scalling Laws Gempa dan Dimensi Patahan

Seperti yang dijelaskan sebelumnya, luas patahan akibat gempa bumi termasuk salah satu penyebab terjadinya tsunami. Untuk melakukan pengukuran tersebut, diperlukan perhitungan beberapa parameter, seperti dislokasi (D), panjang (L), dan lebar (W). Penelitian terdahulu telah dilakukan untuk mengukur besarnya gempa bumi dengan berbagai metode berbeda. Salah satu parameter gempa bumi yang digunakan untuk mengetahui besarnya gempa bumi yaitu *magnitude*. Skala *magnitude* tradisional seperti *magnitude body* (M_B) dan *magnitude surface* (M_S) memiliki keterbatasan tidak dapat mengetahui secara langsung energi yang dihasilkan. Hanks & Kanamori (1979) menyediakan metode untuk mengubah *magnitude* tradisional menjadi momen seismik dan untuk memperkenalkan persamaan rumus menghitung momen *magnitude* dari momen seismik. Persamaan yang dirumuskan sebagai berikut:

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.7 \quad (2.1)$$

Keterangan:

M_w : Momen Magnitude

M_0 : Momen Seismik

Untuk perhitungan dislokasi (D), dapat menggunakan persamaan momen seismik. Menurut Davies & Griffin (2020), nilai kekakuan geser diasumsikan sebesar

30 GPa (Supendi, 2022). Persamaan untuk perhitungan momen seismik sebagai berikut:

$$M_0 = \mu DS = \mu DLW \quad (2.2)$$

Keterangan:

μ : Kekakuan (diasumsikan sebesar 30 GPa)

L : Panjang

W : Lebar

Berdasarkan analisis yang dikembangkan oleh Wells & Coopersmith (1994), hubungan antara momen magnitude dan dimensi dapat menentukan dimensi patahan menggunakan persamaan berikut:

$$\log(L) = a + b * M_w \quad (2.3)$$

Nilai a dan b pada persamaan tersebut berbeda untuk setiap jenis patahan, dimana:

Normal (a = -1,88 ; b = 0,5)

Reverse (a = -2,42 ; b = 0,58)

Strike Slip (a = -2,57 ; b = 0,62)

$$\log(W) = a + b * M_w \quad (2.4)$$

Nilai a dan b pada persamaan tersebut berbeda untuk setiap jenis patahan, dimana:

Normal (a = -1,14 ; b = 0,35)

Reverse (a = -1,61 ; b = 0,41)

Strike Slip (a = -0,76 ; b = 0,27)

2.3 Mitigasi Bencana

Mitigasi merupakan usaha mengurangi kerugian jiwa dan kerugian harta akibat peristiwa yang disebabkan oleh alam, manusia, maupun keduanya yang menghasilkan kerugian jiwa, kerugian harta, dan kerusakan sarana prasarana fasilitas umum, serta menimbulkan gangguan kehidupan masyarakat (Nurjanah, 2022). Menurut Purbo (2008),

perlindungan pantai dapat dilakukan dengan cara struktur dan non struktur, serta dapat juga dilakukan dengan cara kombinasi, yaitu menggabungkan cara struktur dan non struktur.

2.3.1 Struktur (*Hard Solution*)

Cara struktur (*Hard Solution*) dilakukan dengan melakukan pembangunan struktur bangunan untuk pelindung pantai, seperti *seawall*, *groin*, dan *breakwater*. Salah satu cara struktur untuk pelindung pantai yaitu *seawall*.

1. *Seawall*

Seawall merupakan bangunan yang digunakan untuk melindungi kawasan pantai dari ancaman erosi dan gelombang kecil, yang dibangun di sepanjang garis pantai yang berpotensi mengalami abrasi. *Seawall* memiliki kelebihan dan kekurangan. Kelebihan dari *seawall* yaitu memiliki struktur yang masif sehingga dapat menahan gelombang besar, bentuk dinding vertikal membutuhkan material sedikit, bentuk dinding miring memiliki bidang yang luas, konstruksinya murah dan mudah dibangun, dan sisi vertikalnya dapat digunakan sebagai dermaga. Kekurangan dari *seawall* yaitu bentuk dinding vertikal di tanah lunak memerlukan perbaikan tanah, bentuk dinding miring perlu memperhatikan tinggi gelombang, risiko terjadinya erosi perlu diperhatikan, dan kurang mampu menahan gelombang besar. Salah satu penerapan *seawall* di Jepang dapat dilihat pada **Gambar 2.8**.



Gambar 2.8 *Seawall* di Jepang (The BIM, 2021)

2.3.2 Non Struktur (*Soft Solution*)

Cara non struktur (*Soft Solution*) dapat dilakukan berupa penanaman *mangrove* dan pengisian pasir pantai. Penanaman *mangrove* sebagai berikut.

1. Penanaman *Mangrove*

Mangrove memiliki kemampuan mereduksi energi gelombang yang mencapai pantai, sehingga melindungi pantai dari kerusakan akibat serangan gelombang. Penanaman *mangrove* memiliki akar-akar yang mampu menahan sedimentasi yang terbawa arus, sehingga terjadi proses pengendapan di sekitar *mangrove*. Selain itu, *mangrove* berfungsi sebagai penghasil oksigen dan berperan menjaga keseimbangan lingkungan pantai. *Mangrove* memerlukan bibit yang banyak dan lahan yang luas untuk penanamannya serta perawatan intensif pada masa awal penanaman, mengingat *mangrove* membutuhkan waktu yang lama untuk menjadi efektif sebagai pelindung pantai. Penanaman *mangrove* dilakukan di Kabupaten Sinjai yang dapat dilihat pada **Gambar 2.9**.



Gambar 2.9 Penanaman *Mangrove* di Kabupaten Sinjai (Anshari, 2023)

2.3.3 Kombinasi (*Combination*)

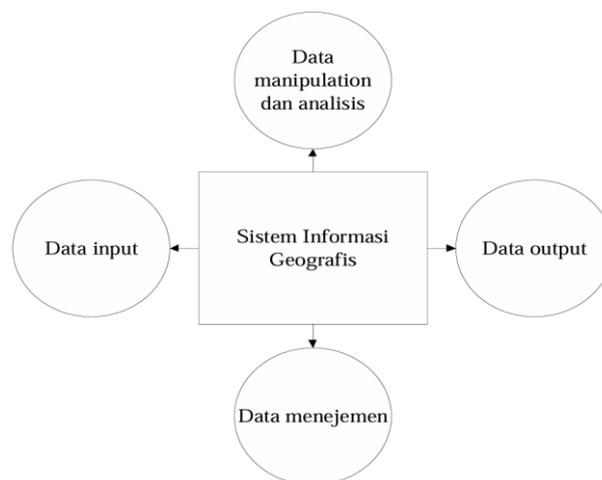
Cara kombinasi dapat dilakukan dengan menggabungkan cara struktur dan non struktur, seperti terlihat pada **Gambar 2.10** Cara ini menggabungkan bangunan struktur pelindung pantai dengan vegetasi, seperti menggabungkan pembangunan *seawall* dan penanaman *mangrove*. Bangunan struktur dari beton berfungsi sebagai pemecah gelombang di pantai, sedangkan penanaman vegetasi membantu mengurangi kekuatan gelombang tsunami dan dapat menghentikan benda yang terbawa arus (The BIM, 2021).



Gambar 2.10 Pembangunan *Seawall* dan Penanaman Vegetasi di Jepang (The B!M, 2021)

2.4 SIG (Sistem Informasi Geografi)

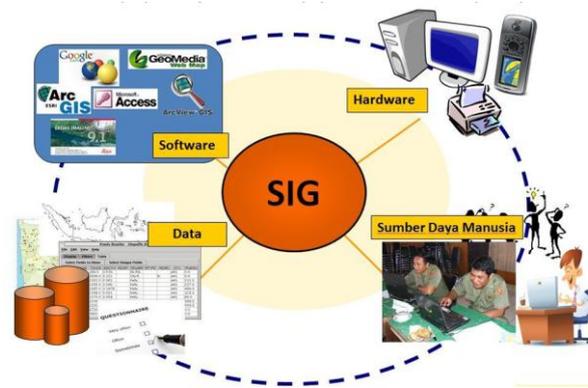
Menurut Arnoff (1989), sistem informasi geografis adalah suatu sistem yang mendasar pada komputer memiliki kemampuan menangani data bersumber dari geografis yaitu pemasukan data, manajemen data (penyimpanan dan pemulihan kembali), manipulasi dan analisis data, dan keluaran hasil akhir (*output*). Tujuan pemanfaatan SIG yaitu informasi yang telah diolah dan disimpan sebagai petunjuk suatu lokasi dapat ditemukan dengan mudah. Ciri-ciri data yang dapat dimanfaatkan yaitu data yang telah terikat lokasi dan merupakan data dasar yang belum diubah lebih detail (Dulbahri, 1993). Pada **Gambar 2.11** dapat dilihat subsistem yang bekerja pada SIG sebagai berikut.



Gambar 2.11 Subsistem Sistem Informasi Geografi (Prahasta, 2005)

Menurut Prahasta (2005), subsistem SIG terdiri dari subsistem data *input* (untuk mengumpulkan dan mempersiapkan data dan petunjuk dari berbagai sumber), subsistem manajemen (untuk mengorganisasikan data spasial maupun petunjuk ke dalam sistem hingga data spasial (berkaitan dengan dimensi ruang) tersebut mudah dicari dan diubah),

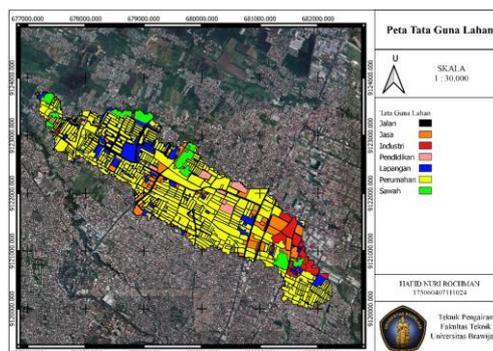
subsistem manipulasi dan analisis (menentukan informasi yang dapat dihasilkan oleh SIG), dan subsistem *output* (untuk menampilkan keluaran seluruh atau sebagian data dalam bentuk *softcopy* maupun *hardcopy*). Subsistem SIG dengan komponen SIG saling terhubung satu sama lain dan melekat dengan sistem komputer. Pada **Gambar 2.12** dapat dilihat komponen pada SIG sebagai berikut.



Gambar 2.12 Komponen Sistem Informasi Geografi (Amelia, 2021)

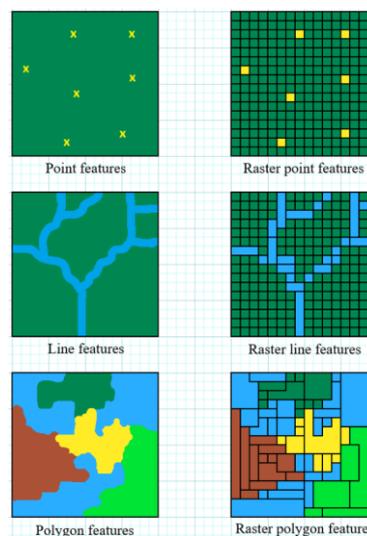
Secara umum SIG bekerja dengan empat komponen, yaitu *hardware* (perangkat komputer seperti kapasitas memori, *hardisk*, dan CPU), *software* (program aplikasi untuk memudahkan pengolahan data, penyimpanan, dan lain-lain), sumber daya manusia atau *user* (untuk mengelola sistem dan membangun perencanaan sesuai kondisi nyata), dan data (bahan dasar SIG yang akan diolah untuk tujuan tertentu).

Seperti yang telah disebutkan bahwa tujuan pemanfaatan SIG yaitu informasi yang telah diolah dan disimpan sebagai petunjuk suatu lokasi dapat ditemukan dengan mudah. Salah satu contohnya yaitu penggunaan SIG untuk klasifikasi tata guna lahan dengan cara memberikan warna untuk setiap batas sesuai daerah yang ingin dianalisis, sehingga dapat dibedakan visualisasinya. Dapat dilihat pada **Gambar 2.13** menunjukkan klasifikasi tata guna lahan menggunakan SIG dengan model data raster.



Gambar 2.13 Klasifikasi Tata Guna Lahan pada SIG (Rochman et al., 2022)

Menurut Wibowo et al. (2015), SIG memiliki dua model data digital geografis, yaitu data spasial (data yang berorientasi geografis mengenai penampakan permukaan bumi) dan data non spasial (data yang menyimpan atribut mengenai permukaan bumi). Dalam data spasial terdapat dua model data, yaitu model data vektor (data yang diwakili dengan simbol, seperti titik, garis, dan lain-lain) dan model data raster (data yang menggambarkan objek geografis, dimana setiap informasi disimpan dalam grid yang disebut dengan *pixel*, seperti citra satelit). Perbedaan tersebut data spasial dapat dilihat pada **Gambar 2.14**.



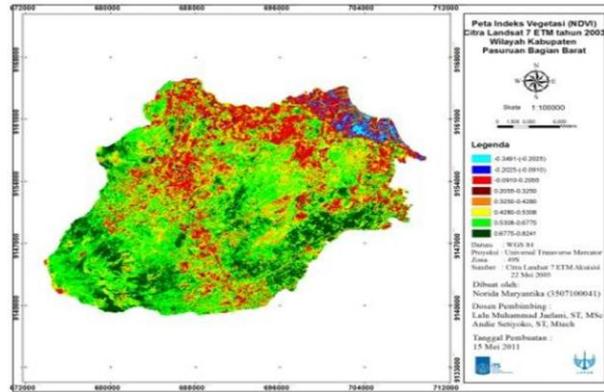
Gambar 2.14 Perbedaan Data Vektor dan Data Raster pada SIG (Akhund, 2022)

Salah satu contoh data raster, yaitu penggunaan citra satelit, merupakan gambaran penampakan dari objek yang diamati, akibat dari perekaman suatu sensor pemantau. Citra satelit yang digunakan untuk tata guna lahan salah satunya yaitu *Landsat* (Satelit Darat), dengan tujuan menyediakan arsip foto satelit global. *Landsat* dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu *Landsat 4-5*, *Landsat 7*, dan *Landsat 8*. Bagian *landsat* tersebut menunjukkan adanya penyempurnaan satelit dari generasi sebelumnya yang memiliki jumlah band spektral berbeda (Farizka, 2023). Salah satu contoh *Landsat* dapat dilihat pada **Tabel 2. 1** untuk data *Band Landsat 8*.

Tabel 2. 1 Band *Landsat 8* (Farizka, 2023)

<i>Landsat 8</i>	Panjang Gelombang (mm)	Resolusi (m)
<i>Band 1</i> – Aerosol pesisir	0,43 – 0,45	30
<i>Band 2</i> – Biru	0,45 – 0,51	30
<i>Band 3</i> – Hijau	0,53 – 0,59	30
<i>Band 4</i> – Merah	0,64 – 0,67	30
<i>Band 5</i> – Near Infrared (NIR)	0,85 – 0,88	30
<i>Band 6</i> – Infrared Gelombang Pendek (SWIR) 1	1,57 – 1,65	30
<i>Band 7</i> – Infrared Gelombang Pendek (SWIR) 2	2,11 – 2,29	30
<i>Band 8</i> - Pankromatik	0,5 – 0,68	30
<i>Band 9</i> - Cirrus	1,36 – 1,38	30
<i>Band 10</i> – Termal Infrared (TIRS) 1	10,6 – 11,19	30
<i>Band 11</i> – Terimal Infrared (TIRS) 2	11,5 – 12,51	30

Pada citra satelit yang digunakan untuk tutupan tata guna lahan, terdapat beberapa indeks spektral, antara lain indeks vegetasi (NDVI), indeks perbedaan air yang dinormalisasi (MNDWI), indeks bangunan perbedaan normal (NDBI), dan indeks tanah kosong (BSI). NDVI (*Normalized Difference Water Vegetation Index*) atau indeks vegetasi merupakan metode yang mempertimbangkan kehijauan dengan cara mengukur kemiringan antara nilai asli *band red* dan *band near infrared*, dimana *infrared* cenderung lebih banyak diserap oleh klorofil tumbuhan. Nilai NDVI berada di antara -1 (non vegetasi) dan +1 (vegetasi). Contoh peta NDVI dapat dilihat pada **Gambar 2.15** MNDWI (*Modified Normalized Difference Water Index*) merupakan indeks yang dapat membedakan antara perairan dan daratan dengan jelas yang memiliki tingkat akurasi hingga 99,85% yang memanfaatkan band hijau dan band inframerah. NDBI (*Normalized Difference Built-Up Index*) digunakan untuk mendeteksi daerah yang terdapat bangunan, yang memiliki besaran nilai indeks antara 0,1 – 0,3. BSI (*Bare Soil Index*) merupakan indeks numerik yang menggabungkan band inframerah, biru, merah, dan *near infrared* untuk menangkap variasi tanah.



Gambar 2.15 Indeks Spektral Peta NDVI (Maryantika et al., 2011)

Dengan mengetahui nilai indeks spektral, dapat dilakukan penemuan informasi dengan mudah, contohnya untuk klasifikasi tutupan tata guna lahan, yang dapat memberikan visualisasi mengenai daerah vegetasi, perairan, bangunan, dan juga tanah kosong. Klasifikasi tutupan tata guna lahan dapat menggunakan SIG, karena berkaitan dengan subsistem yang dimiliki, yaitu subsistem manajemen, yang berarti SIG dapat mengorganisasikan suatu data spasial atau data atribut menjadi suatu data sehingga dapat dengan mudah dimodifikasi atau ditemukan.

2.5 Shallow Water Equation (SWE)

Penelitian ini dilakukan simulasi untuk pemodelan numerik pada tsunami dengan menggunakan program *Cornell Multigrid Coupled Tsunami* (COMCOT). Program COMCOT dikembangkan oleh Prof. L-F Liu dari Universitas Cornell yang merupakan pemodelan numerik dengan metode skema *leapfrog finite difference* (waktu) dan skema *upwind* (spasial) untuk menyelesaikan persamaan air dangkal. Dari kedua skema tersebut akan dihasilkan hasil numerik yang lebih akurat sehingga penyebaran tsunami akan mendapatkan hasil yang maksimal. Proses penjalaran gelombang tsunami dari sumber di laut hingga ke daratan dapat menggunakan pemodelan 2 dimensi horizontal. Persamaan yang dapat digunakan pada COMCOT adalah persamaan air dangkal linear (untuk laut dalam) dan non-linear (untuk laut dangkal). Pada COMCOT, gelombang tsunami dapat dimodelkan dengan menggunakan persamaan air dangkal atau *Shallow Water Equation (SWE)*, karena tinggi air relatif kecil dibandingkan dengan kedalaman air. Persamaan ini berhubungan dengan kekekalan massa dan momentum suatu volume air. Menurut Wang (2009), persamaan untuk penyelesaian SWE dapat dilihat sebagai berikut:

- Kekekalan Massa

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial [u(h + \eta)]}{\partial x} + \frac{\partial [v(h + \eta)]}{\partial y} = 0 \quad (2.5)$$

- Persamaan Momentum

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho} = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_y}{\rho} = 0 \quad (2.7)$$

Keterangan:

η : Ketinggian muka air

u dan v : Kecepatan arus (arah x dan y)

g : Percepatan gravitasi bumi

τ_x dan τ_y : Tegangan geser (arah x dan y)

ρ : Massa jenis air laut

Persamaan di atas merupakan persamaan dasar untuk penyusunan model 2 dimensi horizontal pada program COMCOT. Selanjutnya, persamaan yang dapat digunakan pada COMCOT adalah persamaan air dangkal linear dan non-linear dapat dirumuskan sebagai berikut:

- Persamaan Linear

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \right\} = - \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - fQ = 0 \quad (2.9)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + fP = 0 \quad (2.10)$$

- Persamaan Non Linear

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \right\} = - \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{P^2}{H} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + Fx = 0 \quad (2.12)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{Q^2}{H} \right\} + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + Fy = 0 \quad (2.13)$$

Keterangan :

P : Debit fluks pada arah x (Barat - Timur)

Q : Debit fluks pada arah y (Selatan - Utara)

h : Kedalaman perairan

f : Koefisien gaya Coriolis

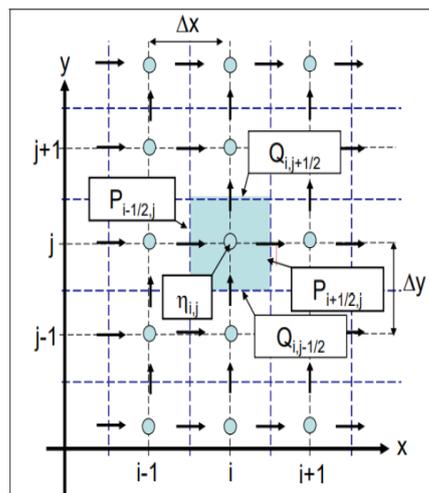
g : Percepatan gravitasi

η : Elevasi muka air

H : Total kedalaman perairan ($\eta + h$)

F_x, F_y : Friksi permukaan dasar pada arah x dan y

Pada **Gambar 2.16** merupakan pemodelan dengan metode *leap frog finite difference* yang dapat menyelesaikan persamaan air dangkal linear dan nonlinear. Dari pemodelan kontinuitas *leap frog finite difference* dapat menghitung elevasi permukaan di titik tertentu pada waktu tertentu. Skema perhitungan numerik yang dilakukan dengan melakukan pemecahan ruang dan waktu menjadi *grid* sel yang lebih kecil agar hasil yang didapatkan lebih akurat.



Gambar 2.16 Skema *Leap Frog Finite Difference* (Wang, 2009)

Berikut ini rumus yang digunakan pada skema *leap frog finite difference* untuk persamaan air dangkal linear sebagai berikut:

$$\frac{\eta_{i,j}^{n+1/2} - \eta_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta t} + \frac{P_{i+1/2,j}^n - P_{i-1/2,j}^n}{\Delta x} - \frac{Q_{i,j+1/2}^n - P_{i,j-1/2}^n}{\Delta y} = \frac{h_{i,j}^{n+1/2} - h_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta t} \quad (2.14)$$

$$\frac{P_{i+1/2,j}^n - P_{i-1/2,j}^n}{\Delta t} + gh_{i+1/2,j} \frac{\eta_{i,j}^{n+1/2} - \eta_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta x} = 0 \quad (2.15)$$

$$\frac{Q_{i,j+1/2}^n - P_{i,j-1/2}^n}{\Delta t} + gh_{i,j+1/2} \frac{\eta_{i,j}^{n+1/2} - \eta_{i,j}^{n-1/2}}{\Delta y} = 0 \quad (2.16)$$

Persamaan air dangkal dalam persamaan momentum dibedakan dengan menggunakan skema *upwind*, dirumuskan sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{P^2}{H} \right\} = \frac{1}{\Delta x} \left\{ \lambda_{11} \frac{(P_{i+3/2,j}^n)^2}{H_{i+3/2,j}^n} + \lambda_{12} \frac{(P_{i+1/2,j}^n)^2}{H_{i+1/2,j}^n} + \lambda_{13} \frac{(P_{i-1/2,j}^n)^2}{H_{i-1/2,j}^n} \right\} \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} = \frac{1}{\Delta y} \left\{ \lambda_{21} \frac{(PQ)_{i+1/2,j+1}^n}{H_{i+1/2,j+1}^n} + \lambda_{22} \frac{(PQ)_{i+1/2,j}^n}{H_{i+1/2,j}^n} + \lambda_{23} \frac{(PQ)_{i+1/2,j-1}^n}{H_{i+1/2,j-1}^n} \right\} \quad (2.18)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} = \frac{1}{\Delta x} \left\{ \lambda_{31} \frac{(PQ)_{i+1,j+1/2}^n}{H_{i+1,j+1/2}^n} + \lambda_{32} \frac{(PQ)_{i,j+1/2}^n}{H_{i,j+1/2}^n} + \lambda_{33} \frac{(PQ)_{i-1,j+1/2}^n}{H_{i-1,j+1/2}^n} \right\} \quad (2.19)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{Q^2}{H} \right\} = \frac{1}{\Delta y} \left\{ \lambda_{41} \frac{(Q_{i,j+3/2}^n)^2}{H_{i,j+3/2}^n} + \lambda_{42} \frac{(Q_{i,j+1/2}^n)^2}{H_{i,j+1/2}^n} + \lambda_{43} \frac{(Q_{i,j-1/2}^n)^2}{H_{i,j-1/2}^n} \right\} \quad (2.20)$$

Dimana koefisien λ memiliki nilai sebagai berikut:

$$\begin{cases} \lambda_{11} = 0, \lambda_{12} = 1, \lambda_{13} = -1, \text{ if } P_{i+1/2,j}^n \geq 0 \\ \lambda_{11} = 1, \lambda_{12} = -1, \lambda_{13} = 0, \text{ if } P_{i+1/2,j}^n < 0 \end{cases} \quad (2.21)$$

$$\begin{cases} \lambda_{21} = 0, \lambda_{22} = 1, \lambda_{23} = -1, \text{ if } Q_{i+1/2,j}^n \geq 0 \\ \lambda_{21} = 1, \lambda_{22} = -1, \lambda_{23} = 0, \text{ if } Q_{i+1/2,j}^n < 0 \end{cases} \quad (2.22)$$

$$\begin{cases} \lambda_{31} = 0, \lambda_{32} = 1, \lambda_{33} = -1, \text{ if } P_{i,j+1/2}^n \geq 0 \\ \lambda_{31} = 1, \lambda_{32} = -1, \lambda_{33} = 0, \text{ if } P_{i,j+1/2}^n < 0 \end{cases} \quad (2.23)$$

$$\begin{cases} \lambda_{41} = 0, \lambda_{42} = 1, \lambda_{43} = -1, \text{ if } Q_{i,j+1/2}^n \geq 0 \\ \lambda_{41} = 1, \lambda_{42} = -1, \lambda_{43} = 0, \text{ if } Q_{i,j+1/2}^n < 0 \end{cases} \quad (2.24)$$

Oleh karena persamaan di atas menggunakan skema *upwind*, maka perhitungan friksi permukaan dasar dirumuskan sebagai berikut:

$$F_x = \frac{1}{2} \frac{gn^2}{(H_{i+1/2,j}^n)^{7/3}} [(P_{i+1/2,j}^n)^2 + (Q_{i+1/2,j}^n)^2]^{1/2} (P_{i+1/2,j}^{n+1} + P_{i+1/2,j}^n) \quad (2.25)$$

$$F_x = \frac{1}{2} \frac{gn^2}{(H_{i+1/2,j}^n)^{7/3}} [(P_{i+1/2,j}^n)^2 + (Q_{i+1/2,j}^n)^2]^{1/2} (P_{i+1/2,j}^{n+1} + P_{i+1/2,j}^n) \quad (2.26)$$

2.6 Climate Change

Perubahan iklim merupakan hal penting yang mempengaruhi kehidupan masyarakat dan pembangunan pada masa yang akan datang (Setiadi, 2018). Menurut BMKG (2011), perubahan iklim adalah peristiwa yang terjadi pada kondisi alamiah yang secara alami mengalami perubahan atau keadaan tidak normal, sehingga dapat mengganggu kehidupan manusia dan aktivitas lainnya.

Secara langsung dan tidak langsung, perubahan iklim disebabkan oleh aktivitas manusia yang mengubah komposisi atmosfer global (salah satunya karbon) dan keberagaman iklim alami. Dapat dilihat pada **Gambar 2.17** penyebab dari perubahan iklim yang disebabkan oleh tindakan manusia, antara lain menggunakan kendaraan bermotor, bahan pembangunan, dan lain-lain. Emisi yang dilepaskan oleh aktivitas kehidupan manusia, berkontribusi terhadap jejak karbon yang dapat menyebabkan perubahan iklim. Dilihat dari banyaknya aktivitas manusia yang menghasilkan karbon, menandakan bahwa perubahan iklim dipicu oleh jejak karbon yang terus meningkat, sehingga diperlukan langkah-langkah untuk mengurangi emisi dalam upaya mencegah dampak perubahan iklim yang lebih buruk di masa mendatang (Konvensi PBB, 2015).



Gambar 2.17 Penyebab Terjadinya Perubahan Iklim (IPCC, 2022)

2.6.1 Carbon Footprint

Carbon footprint adalah ukuran jumlah total emisi karbon dioksida yang secara langsung dan tidak langsung disebabkan oleh suatu aktivitas atau terakumulasi selama

tahap kehidupan suatu produk (Wiedmann, et al). Dapat dilihat pada **Gambar 2.18** bahwa secara langsung maupun tidak langsung, aktivitas manusia juga berkontribusi terhadap peningkatan jejak karbon (Admaja, et al. 2018). Perhitungan jejak karbon digunakan untuk mengetahui dampak yang dihasilkan dari suatu kegiatan (Wright, et al. 2011). Semakin banyak aktivitas yang dilakukan manusia, maka semakin tinggi nilai jejak karbon yang dihasilkan. Hal itu menunjukkan adanya hubungan antara aktivitas manusia dengan kualitas udara (Admaja, et al. 2018).



Gambar 2.18 Komponen Jejak Karbon Aktivitas Manusia (Decode 6, 2023)

Salah satu aktivitas manusia yang menghasilkan jejak karbon yaitu adanya pembangunan konstruksi yang memiliki pengaruh besar dalam menghasilkan gas emisi, mulai dari produksi material konstruksi hingga pembongkaran bangunan (Jeremy, 2022). Proyek pembangunan menghasilkan 35% energi global dan 38% emisi CO₂ (Wang et al., 2017). Berdasarkan penelitian sebelumnya, terdapat beberapa bahan bangunan yang memiliki nilai emisi yang cukup tinggi dan penggunaannya besar pada pembangunan yang dapat dilihat pada. Menurut Nielsen (2008), nilai Emisi CO₂ untuk beton memiliki nilai sebesar 387 kg CO₂/m³. Nilai emisi CO₂ memungkinkan terdapat perbedaan akibat dari jenis bahan yang digunakan ketika bahan tersebut diproduksi (Sabaruddin, 2021).

Berdasarkan jejak karbon bahan material tersebut, dapat diperhitungkan jumlah jejak karbon yang dihasilkan pada pembangunan *seawall*. Untuk menghitung jumlah jejak karbon yang dihasilkan pada pembangunan *seawall* dilihat dari bahan material yang digunakan, rumus yang digunakan sebagai berikut:

$$\text{koefisien jejak karbon} \times \text{volume bangunan per } m^3 \quad (2.27)$$

Untuk mencapai karbon netral, maka diperlukan hal yang dapat mereduksi karbon yang dihasilkan oleh pembangunan, salah satunya adalah penanaman

mangrove melalui proses sekuestrasi yang dapat menyerap dan menyimpan karbon (Prakoso, 2017). Jumlah dan jenis karbon yang tersimpan dilihat berdasarkan keragaman, kerapatan, dan pengelolaan pada *mangrove* (Rifandi, 2021). Berdasarkan penelitian yang telah ada, analisis hutan *mangrove* dengan spesies *Soonerita Alba* dan *Rhizopora Stylosa*, dapat dilihat pada **Tabel 2.2** Analisis Serapan Karbon *Mangrove* (Ambat et al, 2022) Pada penelitian ini, luas total *mangrove* dibagi menjadi 76 plot dan dilakukan pengambilan data *mangrove* dari tahun 2011 hingga tahun 2023.

Tabel 2.2 Analisis Serapan Karbon *Mangrove* (Ambat et al, 2022)

	Luas (m ²)	Kerapatan (ind/m ²)	Jumlah Pohon (ind)		Biomassa (kg/m ²)		Cadangan Karbon (ton/ha)	Serapan CO ₂ (ton/ha)
Total	142.759	8,864	SA :	Rz :	SA :	Rz :	4.668,7	17.693,1
Rata-rata	1.878,4	0,117	9.252	7.896	51,684	185,68	61,4	232,8

Keterangan :

SA : *Soonerita Alba*

Rz : *Rhizopora Stylosa*

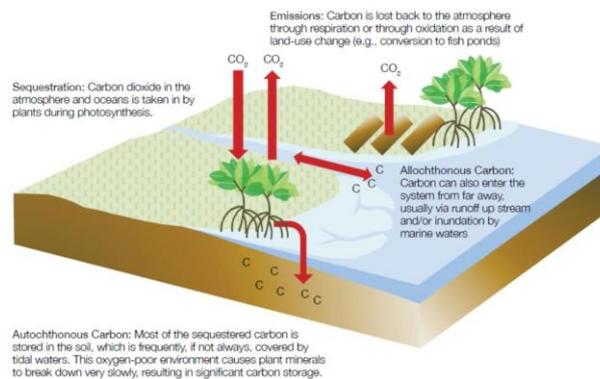
Jumlah cadangan karbon dipengaruhi dari jumlah biomassa yang dihasilkan oleh *mangrove*, sehingga penyerapan CO₂ sangat terikat dengan biomassa *mangrove*. Beberapa hal yang mempengaruhi nilai biomassa yaitu ukuran diameter dan kepadatan setiap spesies atau jenis pohon. Berdasarkan jejak karbon *mangrove* tersebut, dapat diperhitungkan jumlah jejak karbon yang dihasilkan pada penanaman *mangrove*. Untuk menghitung jumlah jejak karbon yang dihasilkan pada penanaman *mangrove*, rumus yang digunakan sebagai berikut:

$$\text{koefisien penyerapan karbon} \times \text{luas mangrove per hektar} \quad (2.28)$$

Mangrove merupakan penyusun utama hutan yang memiliki keterkaitan langsung dengan karbon dioksida (CO₂), karena proses fotosintesis yang menyerap CO₂ sebagai sumbernya. Jumlah pepohonan yang banyak pada area hutan membuat fungsi hutan sebagai penyerap karbon sangat diperlukan. Hal tersebut membuat nilai cadangan karbon maupun penyerapan karbon berbanding lurus dengan nilai biomassa.

a. Tutupan Tata Guna Lahan (*Mangrove*)

Tutupan lahan merupakan tutupan biofisik yang diamati di permukaan bumi, sedangkan tata guna lahan mengacu pada aspek fungsional tanah, sehingga menggambarkan tata kelola tanah yang diberlakukan. Tutupan lahan meliputi struktur buatan manusia, seperti bangunan, vegetasi, seperti hutan, lahan pertanian, dan makhluk hidup lainnya. (Prasetyo, 2019). Hutan dengan tutupan vegetasi yang melimpah mampu menyerap karbon dalam jumlah yang besar, salah satu jenis tumbuhannya yaitu *mangrove* (Ningsih, 2019).



Gambar 2.19 Dinamika Penyimpanan Karbon Pada *Mangrove* (Howard et al.,2014)

Dapat dilihat pada **Gambar 2.19** Dinamika Penyimpanan Karbon Pada *Mangrove* (Howard et al.,2014) *mangrove* memiliki kemampuan menyerap dan menyimpan karbon pada jaringan *mangrove* melalui fotosintesis. Proses fotosintesis menyerap CO₂ dan sebagian CO₂ dilepaskan akibat proses respirasi dan perubahan tata guna lahan, CO₂ lainnya disimpan di jaringan *mangrove* dan berubah menjadi karbon organik (Howard et al., 2014). Selain menyerap karbon, *mangrove* secara fisik juga dapat berfungsi melindungi daratan dari tsunami yang dapat memperlambat gelombang tsunami yang datang menuju daratan (Karminarsih, 2007).

Nilai *maning* merupakan nilai yang menyatakan pengaruh kekasaran pada suatu aliran air (Sanusi, 2022). Pada dasarnya, peran hutan *mangrove* dalam memperlambat gelombang tsunami diwakilkan menggunakan koefisien kekasaran, yang mewakili kepadatan dari hutan *mangrove* (Benazir, 2017). Terdapat model kekasaran ekuivalen dan model kekasaran konstan untuk merepresentasikan nilai kekasaran *maning*. Pada model kekasaran ekuivalen, nilai kekasaran *maning* disajikan sebagai hambatan hidrolik (Benazir, 2017). Model Kekasaran Ekuivalen telah digunakan untuk memodelkan perambatan tsunami melalui hutan, untuk

mewakili kekasaran yang setara, dan juga telah digunakan untuk mensimulasikan tsunami melalui ruang antar bangunan di daerah pesisir, dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

$$n_e = \sqrt{D^{4/3} \frac{C_D}{2gd_i} \frac{\theta}{100-\theta} + n_0^2} \quad (2.29)$$

Keterangan:

- d_i : Diameter Pohon
- θ : Persentase Area Bawah Pohon
- C_D : Koefisien Hambatan

Dengan C_D :

- $C_D = 1.2$ if $Re \leq 2 \times 10^5$
- $C_D = 1.2 - 0.5 \left(\frac{Re}{3 \times 10^5} - \frac{2}{3} \right)$ if $2 \times 10^5 \leq Re \leq 5 \times 10^5$
- $C_D = 0.7$ if $Re \geq 5 \times 10^5$

Variabel d_i merepresentasikan diameter pohon, sedangkan θ menunjukkan persentase area dasar yang tertutup oleh pohon dalam suatu satuan wilayah pada bidang simulasi. Sementara itu, C_D mengacu pada koefisien hambatan. Menurut Benazir (2017), nilai C_D bergantung pada angka Reynolds (Re).

Pada model kekasaran konstan digunakan untuk mewakili pengaruh hutan pesisir berdasarkan nilai koefisien kekasarannya (Benazir, 2017). Nilai *manning* untuk wilayah *mangrove* yang lebat sebesar 0,15 dan untuk wilayah *mangrove* dengan banyak danau dan sungai memiliki nilai *manning* sebesar 0,14 (Zhang et al., 2012). Variasi koefisien menunjukkan bahwa koefisien kekasaran tersebut mewakili hutan pantai yang bersifat spesifik terhadap lokasi. Dengan menggunakan persamaan non linear *Shallow Water Equation (SWE)* yang digunakan untuk simulasi tsunami, diperlukan nilai friksi permukaan dasar dalam arah x dan y, yang dapat dihitung dari nilai kekasaran *Manning* berikut:

$$n_0 = \sqrt{\frac{fD^{1/3}}{2g}} \rightarrow f = \frac{n_0^2 2g}{D^{1/3}} \quad (2.30)$$

Keterangan:

- n_0 : Kekasaran *Manning*
- f : Friksi permukaan dasar
- D : Total kedalaman air
- g : Percepatan gravitasi

Dari rumus di atas menunjukkan bahwa nilai koefisien gesekan akan bertambah seiring dengan berkurangnya kedalaman total air. Nilai kekasaran *manning* umumnya dianggap tetap untuk kondisi permukaan lahan tertentu. Dengan nilai n_0 dapat dilihat pada **Tabel 2.3** Koefisien Manning Tutupan Lahan

Tabel 2.3 Koefisien Manning Tutupan Lahan

Jenis	Koefisien <i>Manning</i> (n_0)	Referensi
Tanah	0,020	Liu et al. (2012)
Laut	0,013	
Bangunan	0,040	
Vegetasi	0,035	
Tambak	0,017	
<i>Mangrove</i>	0,15	Zhang et al. (2012)
<i>Seawall</i>	0,024	

Dari persamaan di atas, dapat dihitung nilai friksi permukaan dasar dalam arah x dan y dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{1}{2} \frac{f}{D^2} M \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.31)$$

$$\frac{\tau_y}{\rho} = \frac{1}{2} \frac{f}{D^2} N \sqrt{M^2 + N^2} \quad (2.32)$$

Keterangan:

$\tau_{x,y}$: Friksi permukaan dasar pada arah x dan y

ρ : Massa jenis air laut

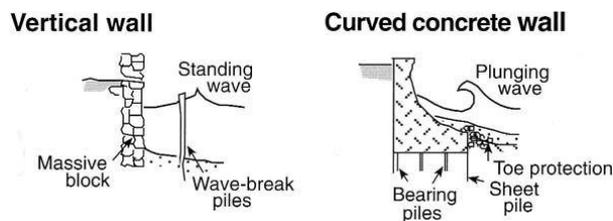
M, N : Debit fluks pada arah x dan y

b. Pelindung Pantai Tembok Laut (*Seawall*)

Bangunan pelindung pantai merupakan jenis infastruktur yang dibangun di pantai dan berfungsi sebagai pelindung pantai, serta untuk mengurangi besarnya gelombang yang sampai di pantai. Salah satu contoh bangunan pelindung pantai antara lain *seawall* (Pratikto et al., 2014). Pembangunan *seawall* dapat melindungi pantai dari erosi dan mengurangi dampak langsung dari kenaikan permukaan laut (Saputra, 2022). *Seawall* merupakan bangunan struktur berukuran besar yang dibuat secara vertikal dan sejajar dengan pantai, dibangun menggunakan berbagai

bahan seperti beton bertulang, batu, dan baja. *Seawall* biasanya berbentuk tegak atau melengkung, yang berguna untuk melimpahkan air ke arah laut kembali (Indriyani, 2019).

Berdasarkan bentuknya dapat dilihat pada **Gambar 2.20** Jenis Bangunan *Seawall* (situstekniksipil.com) *Seawall* dibedakan menjadi dua jenis, yaitu *vertical wall* dan *curved concrete wall*. *Vertical wall* merupakan *seawall* dengan bentuk vertikal dan terdapat tiang pemecah gelombang di depan blok batuan yang berukuran besar. Sedangkan *curved concrete wall* merupakan *seawall* yang terbuat dari beton, dilengkapi dengan pondasi tiang untuk memperkuat *seawall*, dengan bentuk melengkung yang dapat membawa gelombang kembali ke arah laut kembali.



Gambar 2.20 Jenis Bangunan *Seawall* (situstekniksipil.com)

2.7 Penelitian Terdahulu

Penelitian terdahulu penting karena membantu peneliti dalam memberikan dasar bagi penelitian ini. Melalui tinjauan penelitian sebelumnya, dapat membantu peneliti dalam melihat berbagai pandangan, metode, dan hasil yang ada, sehingga dapat memberikan kontribusi baru terhadap penelitian yang telah ada. Dengan demikian, penelitian ini didasarkan pada pengetahuan dan penemuan yang telah ada untuk menemukan hasil yang relevan. Pada penelitian ini, penelitian terdahulu dapat dilihat pada **Tabel 2.4**.

Tabel 2.4 Penelitian Terdahulu (1/2)

No.	Penulis	Isi Penelitian
1	Syamsidik et al. (2023)	<p>Penelitian ini menunjukkan nilai efektivitas dari Banda Aceh <i>Outer Ring Road</i> (BORR) atau jalan raya elevated untuk mengurangi dampak tsunami, yang diharapkan dapat mengurangi kecepatan arus dan ketinggian gelombang tsunami menggunakan model tsunami COMCOT. Hasil pada penelitian ini menunjukkan bahwa BORR dapat mengurangi area genangan tsunami hingga 22% (untuk gempa kekuatan 8,5 Mw) dan 9% (untuk gempa kekuatan 9,15 Mw). BORR juga dapat menurunkan kecepatan aliran hingga 72% di beberapa area. Struktur elevated road ini dapat membantu mitigasi tsunami kecil, meskipun tidak cukup untuk menghadapi tsunami besar tanpa tambahan perlindungan.</p>
2	Kenneth Vincent Chong (2024)	<p>Penelitian ini menunjukkan kerugian ekonomi yang diakibatkan oleh kerusakan bangunan akibat bencana tsunami di Kecamatan Labuan, Pandeglang, Banten, menggunakan model deterministik. Model ini memanfaatkan perhitungan numerik COMCOT untuk simulasi dengan tiga skenario tsunami pada patahan <i>megathrust</i> 1 dan 2. Simulasi numerik dengan COMCOT digunakan untuk penjalaran gelombang tsunami.</p>

Tabel 2.5 Penelitian Terdahulu (2/2)

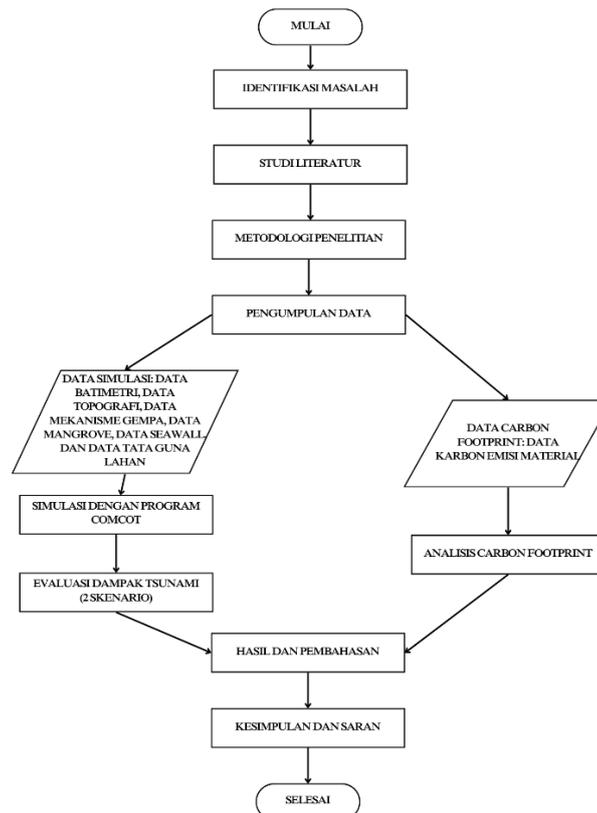
3	Supendi et al. (2022)	<p>Penelitian ini menunjukkan potensi gempa <i>megathrust</i> dan tsunami di sepanjang pesisir selatan Jawa Barat dan Sumatera bagian tenggara. Hasil identifikasi menunjukkan adanya celah seismik di wilayah tersebut yang menunjukkan potensi akumulasi tegangan pada antarmuka subduksi lempeng. Dilakukan kombinasi pemodelan tsunami berdasarkan skenario gempa <i>megathrust</i> dengan magnitudo maksimum hingga 8,9 Mw. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tinggi tsunami maksimum mencapai 34 meter di pantai selatan Sumatera dan Jawa.</p>
4	Nateghi et al. (2016)	<p>Penelitian ini menunjukkan analisis statistik mengenai efektivitas <i>seawall</i> dan hutan pesisir dalam mitigasi dampak tsunami di Iwate dan Miyagi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa <i>seawall</i> yang lebih tinggi dari 5 meter efektif dalam mengurangi tingkat kematian dan kerusakan bangunan selama tsunami. Keberadaan hutan pesisir juga berkontribusi dengan penurunan tingkat kematian dan kerusakan, baik memberikan perlindungan fisik langsung maupun menghambat barang yang terbawa arus. Penggunaan berbagai model memberikan hasil bahwa ketinggian tsunami, luas area hutan pesisir, dan ketinggian <i>seawall</i> sangat berpengaruh terhadap kerusakan dan tingkat kematian.</p>

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian merupakan suatu metode ilmiah untuk pengumpulan data yang memiliki tujuan mendeskripsikan, membuktikan, mengembangkan, dan menemukan pengetahuan dan teori untuk memahami, memecahkan, dan mengantisipasi masalah dalam kehidupan manusia (Sugiyono, 2012). Pada penelitian ini, dilakukan metode penelitian berupa diagram alir yang berguna untuk memvisualisasikan tahapan proses penelitian, serta membantu komunikasi dengan pembaca dalam penelitian, yang dapat dilihat pada **Gambar 3.1**. Metode penelitian yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode kuantitatif yang menggunakan data sekunder sebagai sumber data.



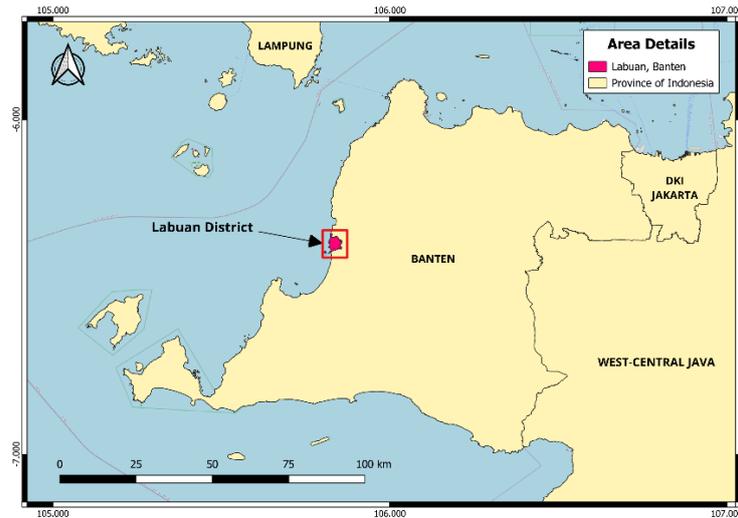
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.2 Bentuk Penelitian

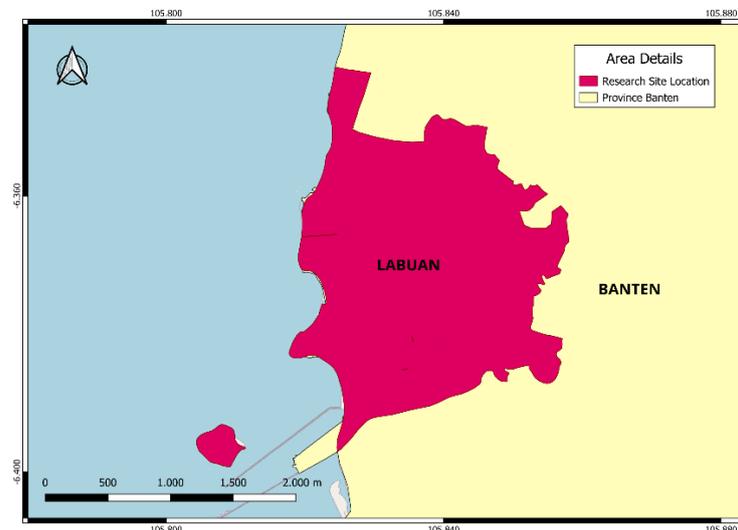
Dalam penelitian tugas akhir ini, dilakukan analisis jejak karbon pada kombinasi pertahanan pantai untuk proteksi akibat bencana tsunami yang disebabkan oleh gempa tektonik. Penelitian ini dilakukan untuk analisis penyebaran bencana tsunami yang berlokasi di Kecamatan Labuan, Banten dengan menggunakan metode numerik pada program COMCOT dan jumlah jejak karbon yang dihasilkan dari kombinasi pertahanan pantai untuk proteksi akibat bencana tsunami. Data yang digunakan pada program COMCOT adalah data sekunder yang diperoleh dari penelitian terdahulu. Dari hasil simulasi pada program COMCOT, didapatkan penjalaran gelombang tsunami di Kecamatan Labuan, Banten, baik tanpa menggunakan pelindung kombinasi pantai (*mangrove* dan *seawall*) maupun dengan menggunakan pelindung kombinasi pantai (*mangrove* dan *seawall*). Setelah dilakukan simulasi pada program COMCOT, dilakukan perhitungan jejak karbon dengan adanya pelindung kombinasi pantai (*mangrove* dan *seawall*).

3.3 Lokasi Penelitian

Penelitian ini berfokus pada jumlah jejak karbon yang dihasilkan tanpa adanya pelindung kombinasi pantai (*mangrove* dan *seawall*) dan adanya pelindung kombinasi pantai (*mangrove* dan *seawall*) yang berlokasi di Kecamatan Labuan, Kabupaten Pandeglang, Provinsi Banten, Indonesia dapat dilihat pada **Gambar 3.2** Kecamatan Labuan terdiri dari 9 desa dengan total luas sebesar 15,65 km². Pada **Gambar 3.3** dapat dilihat bahwa secara geografis, Kecamatan Labuan berada di pesisir pantai yang berbatasan langsung di sebelah Barat dengan Selat Sunda (BPS, 2023).



Gambar 3.2 Peta Lokasi Kecamatan Labuan



Gambar 3.3 Peta Lokasi Penelitian

3.4 Metode Pengumpulan Data

Salah satu metode yang penting dalam melakukan penelitian yaitu pengumpulan data, yang kemudian diolah untuk menemukan hasil penelitian. Dalam pengumpulan data pada penelitian ini, diperlukan kebutuhan data yang sesuai dengan topik penelitian ini, yaitu hasil jejak karbon terhadap pelindung kombinasi pantai (*mangrove* dan *seawall*). Kebutuhan data pada penelitian ini menggunakan jenis data sekunder, yaitu data yang tidak langsung memberikan hasil kepada pengumpulan data, tetapi didapatkan dari sumber yang dapat mendukung penelitian, seperti data dari penelitian terdahulu (Sugiyono, 2019).

3.4.1 Data Spasial

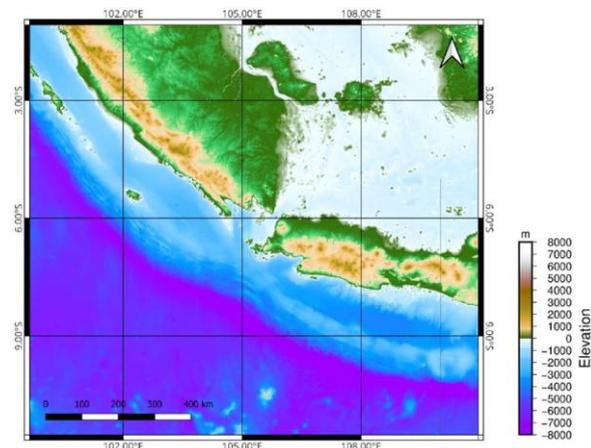
Data spasial atau data geografis merupakan suatu data yang berhubungan dengan lokasi atau tempat di bumi (Prihantara, 2023), juga dapat menunjukkan lokasi geografi (Hajar, 2021). Data spasial diambil berdasarkan hasil analisis data yang ada di lapangan (Prihantara, 2023). Pada penelitian ini, data spasial diolah kemudian akan menghasilkan informasi berbentuk visual, yang dibagi menjadi dua bentuk data yaitu:

1. Data Batimetri

Data batimetri merupakan data yang memberikan informasi mengenai kedalaman perairan dalam bentuk peta (Sarono, 2022). Data ini juga diartikan sebagai pengukuran dan pemetaan wilayah dasar laut, yang penting dalam kegiatan pemanfaatan di wilayah perairan (Masrukhin, 2014). Dalam data batimetri, dapat menggambarkan bentuk konfigurasi pada dasar laut dan dinyatakan dengan angka kedalaman serta garis atau kontur kedalaman (Munthe, 2020). Pada penelitian ini, data batimetri diambil dari data Batimetri Nasional (BATNAS).

2. Data Topografi

Data topografi merupakan data dalam bentuk gambaran peta yang berisi informasi mengenai kondisi permukaan tanah serta informasi ketinggian yang digambarkan melalui garis kontur, yaitu garis bidang yang merupakan lokasi kedudukan titik dengan ketinggian sama dengan bidang acuan tertentu (Handoyo, 2004). Pada penelitian ini, data topografi diambil dari *Digital Elevation Model National* (DEMNAS) seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 3.4**.



Gambar 3.4 Peta Topografi dan Batimetri (BATNAS dan DEMNAS)

3. Data Citra Satelit

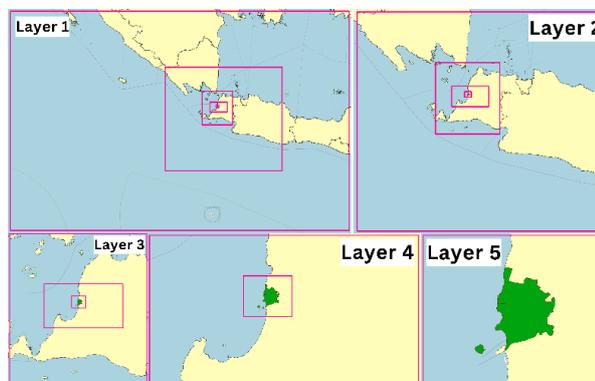
Citra satelit merupakan visualisasi citra dengan menggunakan berbagai jenis panjang gelombang untuk merekam dan mendeteksi energi dari elektromagnetik yang dihasilkan, yang merupakan gambaran dari objek yang diamati (Farizka, 2023). Pada penelitian ini, data citra satelit digunakan untuk tata guna lahan dan data ini diambil dari *website Earth Explorer United States Geological Survey (USGS)* dengan jenis citra satelit yang digunakan adalah Landsat 8, hasilnya dapat dilihat pada **Gambar 3.5**.



Gambar 3.5 Citra Satelit Lokasi Penelitian (*earthexplorer USGS*)

3.4.2 Parameter Tsunami

Dalam penelitian ini, metode yang dilakukan untuk melakukan simulasi gelombang tsunami adalah metode *multilayer*, dimaksudkan untuk mendapatkan hasil simulasi gelombang tsunami yang lebih akurat. Pada simulasi gelombang tsunami ini menggunakan jumlah *layer* sebanyak 5 (lima) *layer*, hasil *layer* dapat dilihat pada **Gambar 3.6** dengan detail *layer* dapat dilihat pada **Tabel 3. 1**.



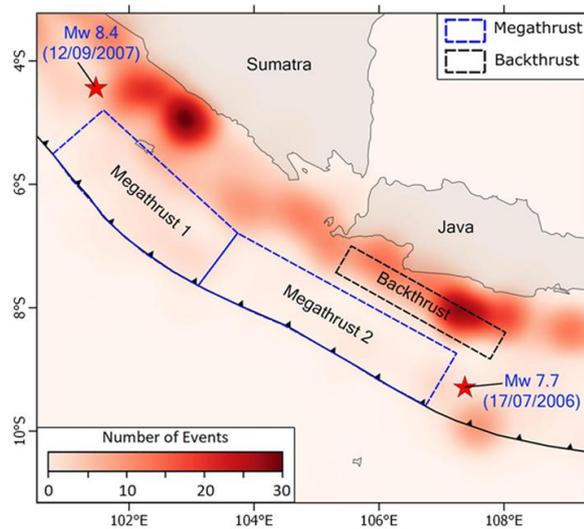
Gambar 3.6 Bentuk *Multilayer* Area untuk Program COMCOT

Tabel 3. 1 Informasi Parameter Simulasi untuk Program COMCOT

<i>Layer</i>	1	2	3	4	5
Lingkup <i>longitude</i> (°)	101.20E – 110.81E	103.85E – 108.27E	105.25E – 106.40E	105.54E – 106.20E	105.77E – 105.89E
Lingkup <i>latitude</i> (°)	110.09S – 2.77S	8.82S – 4.89S	7.08S – 5.80S	6.59S – 6.22S	6.42S – 6.32S
Ukuran <i>grid</i> (m)	925	308.33	102.78	25.69	5.14
Jumlah <i>grid</i>	998 x 1153	1593 x 1418	1464 x 1381	1686 x 1579	1625 x 1362
<i>Parent grid</i>	<i>None</i>	<i>Layer 1</i>	<i>Layer 2</i>	<i>Layer 3</i>	<i>Layer 4</i>
<i>Ratio to parent grid</i>	<i>None</i>	3	3	4	5
<i>Coordinate System</i>	<i>Spherical</i>	<i>Spherical</i>	<i>Spherical</i>	<i>Spherical</i>	<i>Cartesian</i>
<i>SWE type</i>	<i>Linear</i>	<i>Linear</i>	<i>Linear</i>	<i>Linear</i>	<i>Nonlinear</i>
<i>Time Step (second)</i>	1	0.333	0.111	0.028	0.0006

3.4.3 Data Sumber Patahan

Pada penelitian ini, simulasi penjalaran gelombang tsunami menggunakan *megathrust 1* dan *megathrust 2* yang dapat dilihat pada **Gambar 3.7**. Penelitian ini melakukan perbandingan dampak dari *megathrust 1* dan *megathrust 2* apabila tidak terdapat pelindung kombinasi pantai (*seawall* dan *mangrove*) dan terdapat pelindung kombinasi pantai (*seawall* dan *mangrove*) pada Kecamatan Labuan, Banten, berdasarkan skenario penelitian yang telah dilakukan oleh Supendi et al (2022). Dalam penelitian untuk simulasi penjalaran gelombang tsunami ini, distribusi *slip* diasumsikan menjadi homogen sehingga segemen terganggu secara simultan, kemudian besaran kecepatan gangguan dan waktu naik terbatas diabaikan (Supendi et al., 2022). Dapat dilihat pada **Tabel 3.2** merupakan data parameter sumber patahan (Supendi et al., 2022) yang akan digunakan pada penelitian ini.



Gambar 3.7 Pemodelan Megathrust 1 dan 2

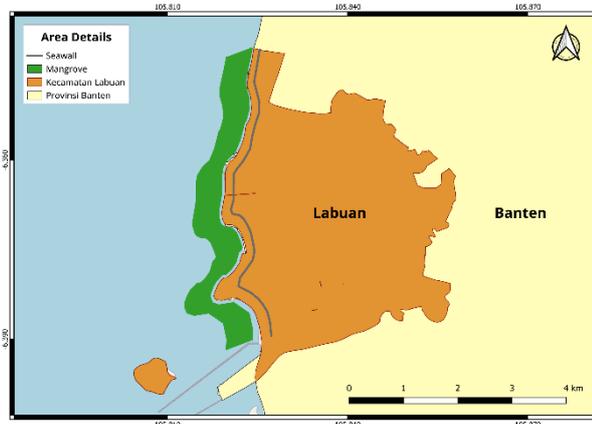
Tabel 3.2 Parameter Sumber Patahan (Supendi et al., 2022)

<i>Earthquake Parameters</i>	<i>Sunda Strait Segment</i>	<i>West-Central Java Segment</i>
Mw	8.9	8.9
Depth (km)	34	20.188
Length (km)	325	442
Width (km)	120	109
Max Disp (m)	15.926	21.678
Strike	297	297
Dip	18	18
Slip	24	20
Rake	104	103
Latitude	-6.1986	-8.2155
Longitude	102.2806	105.2478

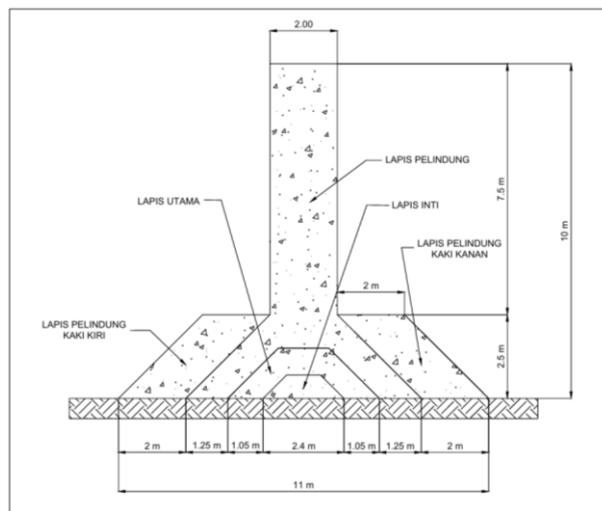
3.4.4 Data Pelindung Kombinasi Pantai

Pada **Gambar 3.8** Letak Pelindung Kombinasi Pantai (*Seawall* dan *Mangrove*) dapat dilihat letak bangunan pelindung kombinasi pantai (*seawall* dan *mangrove*) yang akan digunakan untuk menganalisis hasil perambatan gelombang tsunami dengan adanya pelindung kombinasi pantai (*seawall* dan *mangrove*). Pada pelindung *seawall*, data yang akan digunakan yaitu ukuran panjang, lebar, dan tinggi

seawall, terletak di daratan pesisir pantai dan hanya menggunakan *seawall* tanpa adanya *breakwater*, sebagaimana ditampilkan pada **Gambar 3.9** Struktur Bangunan Pelindung *Seawall*. Kemudian dilakukan perhitungan volume bangunan *seawall* untuk mengetahui jumlah bahan material yang akan digunakan, serta menghitung jejak karbon yang dihasilkan akibat adanya pembangunan pelindung *seawall*.

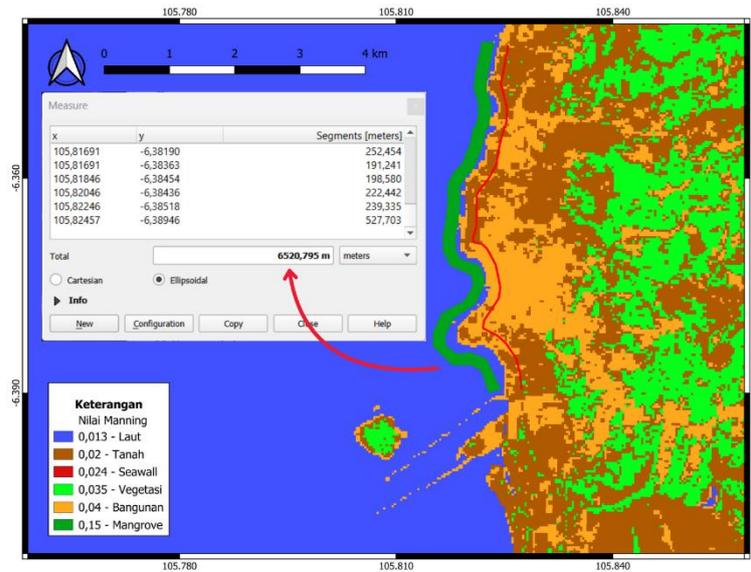


Gambar 3.8 Letak Pelindung Kombinasi Pantai (*Seawall* dan *Mangrove*)

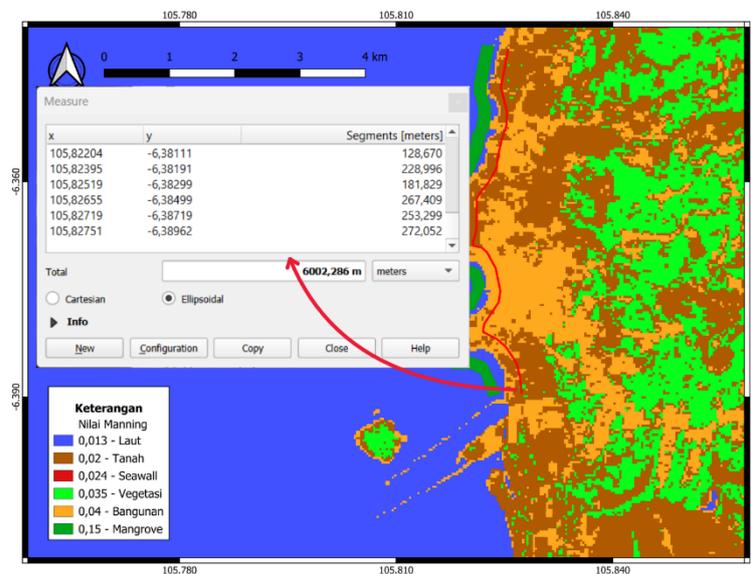


Gambar 3.9 Struktur Bangunan Pelindung *Seawall*

Pada penelitian ini, luas *mangrove* yang digunakan yaitu sebesar 120,85 hektar, dengan lebar sekitar 200 meter dan panjang sekitar 6 kilometer. Perhitungan ukuran *mangrove* menggunakan perangkat lunak QGIS yang dapat dilihat pada **Gambar 4. 1**. Sedangkan untuk bangunan *seawall*, panjang yang digunakan sekitar 6 kilometer. Pengukuran panjang *seawall* juga menggunakan perangkat lunak QGIS sebagaimana dapat dilihat pada **Gambar 4. 2**.



Gambar 4. 1 Panjang Mangrove



Gambar 4. 2 Panjang Seawall

Pada pelindung *mangrove* menggunakan data luas lahan *mangrove* dengan jenis homogen untuk wilayah pesisir Kecamatan Labuan, Banten. Selain itu, pelindung *mangrove* pada simulasi perambatan gelombang tsunami diwakilkan dengan koefisien kekasaran yang akan digunakan pada perangkat lunak COMCOT pada persamaan *Shallow Water Equation* (SWE). Nilai koefisien kekasaran yang akan digunakan pada perangkat lunak COMCOT dapat dilihat pada **Tabel 2.3** Koefisien Manning Tutupan Lahan. Model kekasaran yang digunakan pada penelitian ini yaitu model kekasaran konstan, karena pada persamaan model kekasaran konstan hanya memperhitungkan nilai koefisien kekasaran tanpa

memperhitungkan besaran koefisien hambatan, yang dapat memperhitungkan karakteristik kekasaran yang berbeda (Kadivar et al.,2021). Pada penelitian ini, *mangrove* yang digunakan adalah jenis homogen atau jenis seragam sehingga digunakan model kekasaran konstan, karena memiliki karakteristik kekasaran yang sama.

Pada **Gambar 3.8** dapat dilihat bahwa *mangrove* ditanam di daerah pesisir pantai, dengan jenis yang digunakan mengacu pada Error! Reference source not found.. Menurut Didik et al. (2021), *mangrove* jenis *Soonerita Alba* dan *Rhizophora Stylosa* cocok ditanam di daerah pesisir pantai. Keduanya tumbuh dengan baik di Teluk Jor, Lombok Timur, di mana *Soonerita Alba* menunjukkan dominasi tertinggi pada semua tahap pertumbuhan dan *Rhizophora Stylosa* berhasil berkembang dalam program revegetasi. Ini menunjukkan bahwa kedua jenis tersebut mampu beradaptasi dengan baik di daerah pesisir.

3.4.5 Data Jejak Karbon

Jejak karbon pada penelitian ini digunakan untuk mengetahui karbon yang diserap dan karbon yang dihasilkan akibat adanya pelindung kombinasi pantai (*mangrove* dan *seawall*), *mangrove* berfungsi sebagai pereduksi karbon akibat pelepasan karbon dari pelindung *seawall*. Pada pelindung *seawall*, salah satu sumber penghasil karbon berasal dari material bangunan yang digunakan. Berdasarkan penelitian terdahulu, emisi karbon yang dilepaskan dari bahan material sebesar 387 kgCO₂/m³ menurut Nielsen (2008). Pada penelitian ini, perhitungan jejak karbon *seawall* dilihat berdasarkan jumlah bahan material yang akan digunakan untuk setiap luasan yang kemudian dikalikan dengan tinggi *seawall*.

Sedangkan pada pelindung *mangrove*, perhitungan jejak karbon dilihat berdasarkan jumlah karbon yang diserap untuk setiap hektar. Dapat dilihat pada **Tabel 2.3**, maka perhitungan jejak karbon *mangrove* untuk setiap hektar memiliki total jejak karbon sebesar 212,94 ton/ha/hari. Pada penelitian terdahulu tersebut, luas lahan *mangrove* sebesar 57,3 hektar dengan jumlah *mangrove* 1.004 pohon untuk setiap hektar, sehingga total jejak karbon yang diserap pada lahan tersebut sebesar 12.196,61 ton/ha/hari.

3.5 Metode Analisis Data

Metode analisis data merupakan tahap dalam menganalisis data, metode untuk mengartikan hasil dari analisis, dan didukung oleh data yang dikumpulkan untuk membuat analisis menjadi lebih mudah, tepat, dan akurat. Metode ini disebut juga kegiatan untuk menelaah, menafsirkan, dan memverifikasi data agar sebuah penelitian memiliki tujuan dan nilai ilmiah (Hartono, 2018). Pada penelitian ini, metode analisis data sebagai berikut:

3.5.1 Analisis Tutupan Tata Guna Lahan dengan Citra Satelit

Analisis tutupan tata guna lahan digunakan untuk mengklasifikasikan persebaran jenis penggunaan lahan di Kecamatan Labuan, Pandeglang. Hasil dari analisis ini digunakan untuk mengidentifikasi nilai *manning* yang akan digunakan pada *input* simulasi program COMCOT. Analisis ini menggunakan perangkat lunak QGIS. Pada proses visualisasi tutupan tata guna lahan, digunakan metode indeks spektral untuk menganalisis tutupan lahan berdasarkan indeks spektral yang dihasilkan, dengan menggunakan data dari citra satelit. Pada data citra satelit, terdapat beberapa indeks spektral, antara lain indeks vegetasi (NDVI), indeks perbedaan air yang dinormalisasi (MNDWI), indeks bangunan perbedaan normal (NDBI), dan indeks tanah kosong (BSI).

Pada penelitian ini, untuk pelindung *mangrove* dilakukan modifikasi data koefisien *manning* yang didapatkan dari proses analisis tata guna lahan menggunakan perangkat lunak QGIS. QGIS memiliki subsistem manipulasi data, yaitu dengan cara mengubah data koefisien *manning* yang didapatkan sebelumnya dari data citra satelit seperti laut, bangunan, tambak, ataupun tanah kosong, menjadi *mangrove*. Pada daerah *mangrove* yang telah direncanakan pada **Gambar 3.8** yang ditunjukkan dengan poligon berwarna hijau akan diberikan nilai koefisien *manning* sebesar 0,15. Dengan begitu, daerah yang dimanipulasi tersebut akan berubah menjadi informasi baru, yaitu dari daerah perairan menjadi daerah vegetasi.

3.5.2 Simulasi Tsunami dengan Pemodelan Numerik

Pemodelan numerik yang digunakan pada penelitian ini adalah perangkat lunak Model *Cornell Multigrid Coupled Tsunami* (COMCOT). Model COMCOT digunakan untuk memodelkan perambatan gelombang tsunami dari sumber hingga mencapai pesisir pantai. Pada perangkat lunak ini, akan mensimulasikan perambatan

karakteristik yang akan dihasilkan dari gelombang tsunami. Data yang digunakan pada perangkat lunak ini antara lain, data topografi, data batimetri, data parameter gempa bumi, dan koefisien *mannings* yang kemudian akan menghasilkan estimasi mengenai ketinggian dan kedalaman gelombang tsunami. Pada penelitian ini, digunakan lempeng *megathrust 1* dan *megathrust 2*, dengan skenario yang akan dilakukan sebanyak dua skenario, yaitu tanpa menggunakan pelindung kombinasi (*seawall* dan *mangrove*) dan menggunakan pelindung kombinasi (*seawall* dan *mangrove*). Simulasi dengan perangkat lunak COMCOT ini menggunakan bentuk pemodelan dua dimensi horizontal untuk menampilkan gambaran mengenai perambatan gelombang tsunami dari pusat gempa ke wilayah pesisir, dengan menggunakan persamaan *Shallow Water Equations* (SWE). Pada penelitian ini, simulasi dengan perangkat lunak COMCOT ini akan memberikan gambaran perambatan gelombang tsunami untuk wilayah Kecamatan Labuan, Banten, dengan menggunakan pelindung kombinasi pantai maupun tanpa menggunakan pelindung kombinasi pantai.

3.5.3 Perhitungan Jejak Karbon pada Pelindung Kombinasi Pantai

Pada penelitian ini, perhitungan jejak karbon pada pelindung kombinasi pantai untuk *mangrove* dan *seawall*. Perhitungan jejak karbon ini digunakan untuk mengetahui jumlah karbon yang dapat diserap dan dilepaskan akibat dari pelindung kombinasi pantai. Pada pelindung *mangrove*, digunakan data untuk menghitung jejak karbon yang diserap, yaitu data luas *mangrove* homogen untuk wilayah pesisir Kecamatan Labuan, Banten. Kemudian dilakukan perhitungan untuk penyerapan karbon berdasarkan data penyerapan karbon pada penelitian terdahulu. Pada hasil yang didapatkan untuk pelindung *mangrove* yaitu berupa jumlah jejak karbon yang dapat diserap oleh *mangrove* akibat aktivitas di sekitar wilayah pesisir. Untuk pelindung *seawall*, digunakan data berupa volume bangunan *seawall* yang akan dibangun sepanjang wilayah pesisir Kecamatan Labuan, Banten. Perhitungan untuk jejak karbon yang dihasilkan pada pelindung *seawall* mengacu pada data emisi karbon penelitian terdahulu dilihat dari material bangunan pelindung *seawall*. Hasil yang didapat dari perhitungan jejak karbon untuk pelindung *seawall* adalah jumlah karbon yang dilepaskan dari pembangunan *seawall* berdasarkan material bangunan yang digunakan. Pada penelitian ini, adanya pelindung *mangrove* ditujukan untuk mereduksi hasil lepasan karbon akibat dari pembangunan pelindung *seawall*, dan

diharapkan dapat mencapai nilai karbon netral. Dari kedua data jejak karbon pada pelindung kombinasi tersebut, dilakukan perhitungan analisis pelindung kombinasi pantai agar mencapai karbon netral.

BAB IV

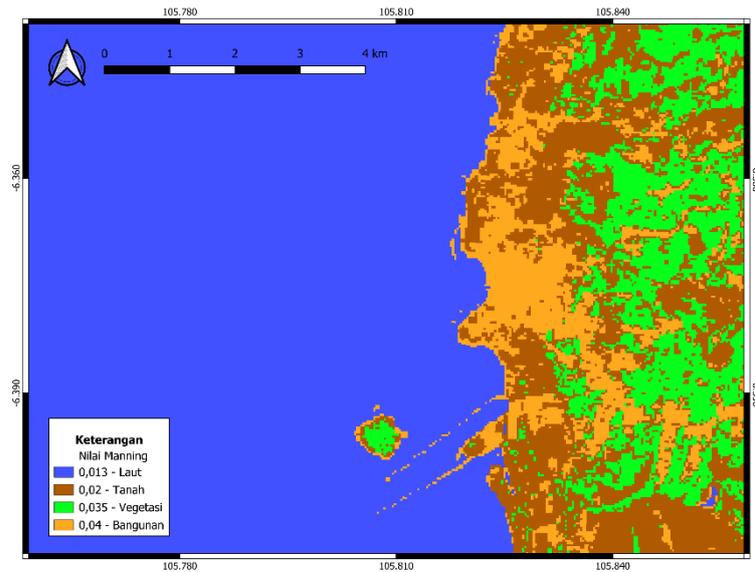
HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Analisis Tutupan Tata Guna Lahan

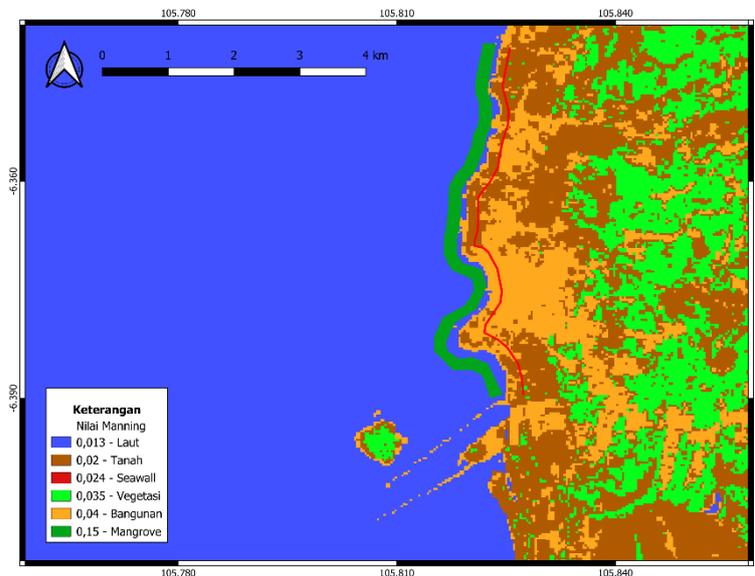
Tutupan tata guna lahan yang diwakilkan menggunakan koefisien *manning* berperan memperlambat gelombang tsunami. Pada penelitian ini, data citra satelit yang diambil berdasarkan **Gambar 3.5** yang kemudian proses klasifikasi tutupan tata guna lahan dianalisis dengan bantuan perangkat lunak QGIS (*Quantum Geographic Information System*) menggunakan *plugins* tambahan, yaitu *Semi Automatic Classification* yang dapat membantu dalam pengelompokan setiap wilayah berdasarkan zona warna yang ditentukan. Klasifikasi ini dimulai dengan pemilihan suatu zona warna pada wilayah tertentu, yang kemudian wilayah dengan warna yang sama akan secara otomatis dikelompokkan sesuai dengan karakteristiknya.

Pada perangkat lunak QGIS, dapat memberikan penamaan zona wilayah dari setiap warna yang ditentukan. Zona wilayah tersebut yang kemudian dimasukkan nilai *manning* dari setiap warna, termasuk pelindung kombinasi (*seawall* dan *mangrove*) pantai sebagai bangunan tambahan pada lokasi penelitian Kecamatan Labuan. Dapat dilihat pada **Gambar 4. 3** dan **Gambar 4. 4** zona warna di Kecamatan Labuan yang diklasifikasikan sebagai berikut:

1. Warna Biru, merepresentasikan laut dengan koefisien *manning* sebesar 0,013;
2. Warna Cokelat, merepresentasikan tanah dengan koefisien *manning* sebesar 0,02;
3. Warna Merah, merepresentasikan *seawall* dengan koefisien *manning* sebesar 0,024;
4. Warna Hijau Muda, merepresentasikan vegetasi dengan koefisien *manning* sebesar 0,035;
5. Warna Cokelat Muda, merepresentasikan bangunan dengan koefisien *manning* sebesar 0,04; dan
6. Warna Hijau Tua, merepresentasikan *mangrove* dengan koefisien *manning* sebesar 0,15.



Gambar 4. 3 Tutupan Tata Guna Lahan Tanpa Pelindung Kombinasi



Gambar 4. 4 Tutupan Tata Guna Lahan dengan Pelindung Kombinasi

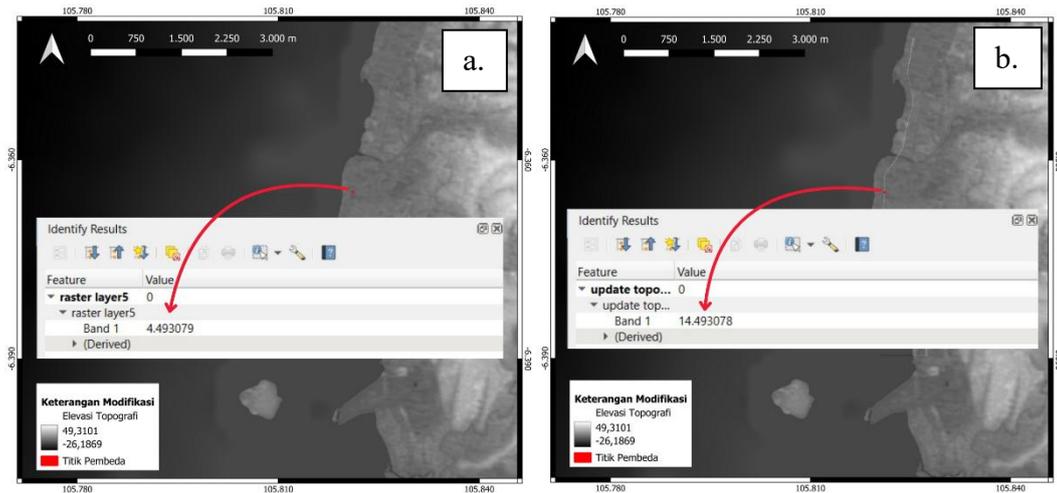
Pada **Gambar 4. 3** merupakan hasil dari analisis tutupan tata guna lahan menggunakan perangkat lunak QGIS tanpa adanya tambahan pelindung kombinasi (*seawall* dan *mangrove*) pantai. Sedangkan, pada analisis tutupan tata guna lahan dengan adanya pelindung kombinasi (*seawall* dan *mangrove*) pantai dapat dilihat pada **Gambar 4. 4**. Luas zona setiap warna diperhitungkan menggunakan perangkat lunak QGIS, seperti pada **Tabel 4. 1**.

Tabel 4. 1 Luas Tutupan Tata Guna Lahan dengan Pelindung Kombinasi

Dengan Pelindung Kombinasi				Tanpa Pelindung Kombinasi		
Class	Luas			Luas		
	m ²	ha	%	m ²	ha	%
0,013	42916211,87	4291,62	61,58	43944731,89	4394,47	63,05
0,02	3895850,08	389,59	5,59	3980259,50	398,03	5,71
0,035	4755001,65	475,50	6,82	4708544,31	470,85	6,76
0,04	16855632,86	1685,56	24,19	17059908,40	1705,99	24,48
0,024	62214,64	6,22	0,09	0	0	0
0,15	1208532,98	120,85	1,73	0	0	0
Total	69693444,18	6969,34	100,00	69693444,10	6969,34	100,00

Dari **Tabel 4. 1** luas zona warna di wilayah sebelum adanya pelindung kombinasi dan setelah adanya pelindung kombinasi, terdapat beberapa perubahan luas wilayah. Salah satu perubahan luas terjadi pada laut, dari sekitar 63% menjadi sekitar 61% yang diakibatkan dari pengalihan wilayah dari laut menjadi *mangrove*. Kemudian, pada bangunan mengalami perubahan luas dari sekitar 24,4% menjadi 24,2% akibat adanya pengalihan wilayah bangunan menjadi wilayah *seawall*.

Selain menambahkan nilai *manning* khususnya pada bangunan *seawall*, dilakukan juga modifikasi data topografi pada wilayah yang akan dibangun *seawall*. Proses modifikasi data topografi dilakukan pada perangkat lunak QGIS, yaitu dengan menaikkan elevasi wilayah yang akan dibangun *seawall* setinggi 10 meter dari elevasi eksisting pada wilayah tersebut. Proses ini menggunakan fitur *Rasterize* pada bangunan *seawall* yang telah dibuat, kemudian digabungkan dengan data topografi eksisting yang telah ada. Hasil yang telah dibuat dapat dilakukan pemeriksaan dengan menggunakan fitur *Identify Results*, berdasarkan elevasi dari data tersebut. Perbandingan hasil modifikasi data topografi dilakukan pada titik koordinat 6,364° LS dan 105,821° BT yang dapat dilihat pada **Gambar 4. 5** Modifikasi Data Topografi Pada *Seawall*: a). Sebelum Modifikasi dan b). Sesudah Modifikasi.



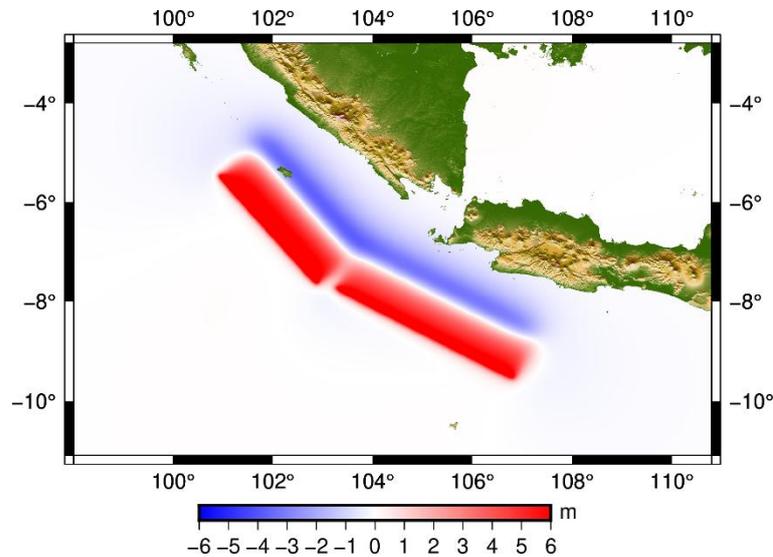
Gambar 4. 5 Modifikasi Data Topografi Pada *Seawall*: a). Sebelum Modifikasi dan b). Sesudah Modifikasi

4.2 Initial Condition

Initial condition (kondisi awal) tsunami adalah keadaan awal dari tinggi gelombang saat terjadi gempa bumi yang memicu tsunami (Harahap et al, 2019). Perhitungan tinggi gelombang menggunakan program COMCOT, kemudian didapatkan data *initial condition* berupa ketinggian gelombang tsunami pada titik awal terjadinya gempa bumi yang memicu tsunami. Perhitungan *initial condition* menggunakan data gempa bumi akibat patahan lempeng berdasarkan data parameter sumber patahan dari hasil penelitian Supendi et al. (2022) dengan magnitudo gempa sebesar 8,9 yang terlihat pada **Tabel 3.2** Parameter Sumber Patahan (Supendi et al., 2022). Data *initial condition* memberikan gambaran mengenai terbentuknya gelombang tsunami serta perambatannya melalui garis pantai. Simulasi untuk *initial condition* menggunakan data *Layer 1* yang terdapat pada **Tabel 3.2** Parameter Sumber Patahan (Supendi et al., 2022) mengacu pada lokasi penelitian dengan menggunakan program COMCOT. Selain data parameter sumber patahan, penelitian ini juga menggunakan data topografi yang memberikan informasi mengenai data ketinggian permukaan pada *Layer 1* yang digunakan untuk menunjukkan perubahan elevasi laut.

Pada pemodelan *initial condition* gelombang tsunami, terdapat penggunaan warna yang dapat menunjukkan ketinggian gelombang yang dihasilkan. Warna merah (*red area*) menunjukkan gelombang positif, dimana permukaan air laut naik di atas ketinggian normal akibat adanya gelombang tsunami. Sedangkan, warna biru (*blue area*) menunjukkan gelombang negatif, dimana permukaan air laut turun di bawah ketinggian

normal akibat adanya gelombang tsunami. Warna putih menunjukkan permukaan air laut berada di ketinggian normal.



Gambar 4.6 *Initial Condition* Simulasi Tsunami di Kecamatan Labuan, Pandeglang, Banten

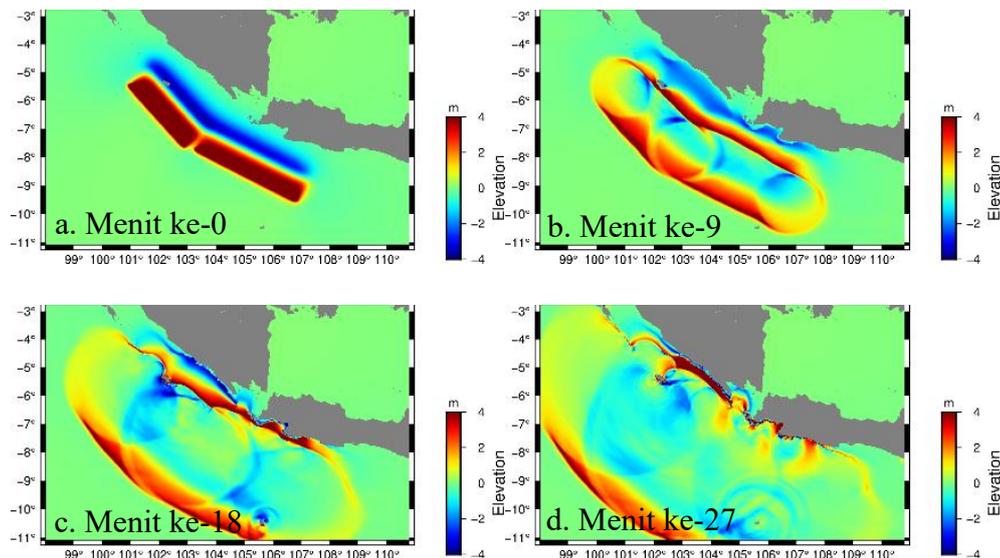
Pada **Gambar 4.6** *Initial Condition* Simulasi Tsunami di Kecamatan Labuan, Pandeglang, Banten menunjukkan *initial condition* tsunami akibat gempa dengan magnitudo sebesar 8,9 dapat terlihat dampak terhadap elevasi air laut. Pada *Megathrust 1*, memiliki *slip* sebesar 24 meter, dengan panjang patahan 325 km, dan lebar patahan 120 km, patahan ini menyebabkan peningkatan elevasi air laut sekitar 6 meter di sepanjang patahan (*red area*) dan penurunan air laut sekitar 3-4 meter (*blue area*). Pada *Megathrust 2*, memiliki *slip* sebesar 20 meter, dengan panjang patahan 442 km, dan lebar patahan 109 km, patahan ini menyebabkan peningkatan elevasi air laut sekitar 4-5 meter (*red area*) dan penurunan air laut sekitar 2-3 meter (*blue area*).

4.3 Penjalaran Gelombang Tsunami

Penjalaran gelombang tsunami adalah proses pergerakan dari gelombang tsunami akibat gangguan di dasar laut hingga jarak terjauh yang dapat ditempuh oleh gelombang tsunami. Penyebab adanya tsunami, antara lain gempa bumi bawah laut, aktivitas vulkanik, longsor yang terjadi di dasar laut, dan jatuhnya benda bermassa besar ke dalam laut. Dari penyebab terjadinya tsunami tersebut, kemudian mengakibatkan adanya gangguan keseimbangan air laut, yang menghasilkan adanya gelombang bergerak cepat di dalam laut dengan amplitudo rendah. Ketika mendekati perairan dangkal, kecepatan menurun, tetapi ketinggian gelombang akan meningkat. Tinggi gelombang yang meningkat akan naik ke daratan sehingga menyebabkan banjir, kemudian gelombang

akan kembali ke laut. Pada penelitian ini, digunakan lempeng *megathrust* 1 dan *megathrust* 2, dengan skenario yang digunakan sebanyak 2 skenario, yaitu tanpa menggunakan pelindung kombinasi (*seawall* dan *mangrove*) dan menggunakan pelindung kombinasi (*seawall* dan *mangrove*).

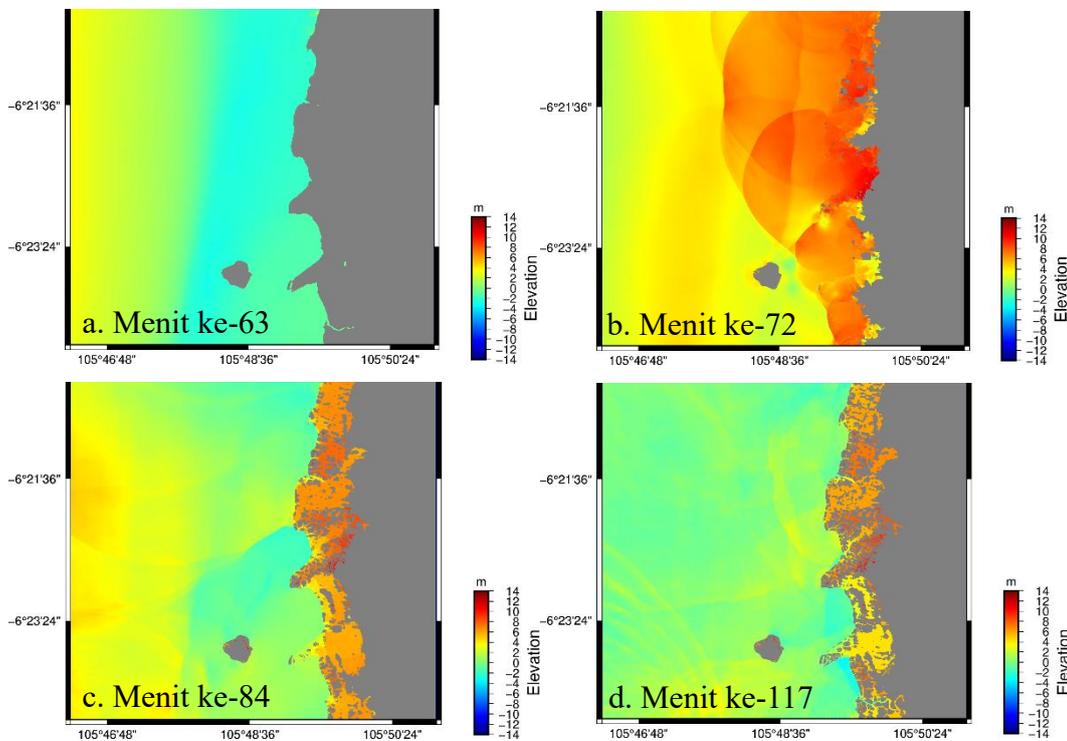
Simulasi penjalaran gelombang tsunami menggunakan perangkat lunak COMCOT dengan durasi simulasi selama 7200 detik (120 menit) dan interval waktu setiap 180 detik (3 menit). Pemilihan durasi simulasi dengan mempertimbangkan jarak pusat gempa hingga mencapai lokasi studi di Kecamatan Labuan. Jumlah *layer* yang digunakan sebanyak 5 *layer*, dimaksudkan untuk mendapatkan hasil penjalaran gelombang tsunami yang lebih akurat. Skenario 1 yaitu tanpa menggunakan pelindung kombinasi (*seawall* dan *mangrove*), penjalaran gelombang tsunami untuk skenario 1 untuk *layer* 1 dapat dilihat pada **Gambar 4.7**.



Gambar 4.7 Penjalaran Gelombang Tsunami Skenario 1 *Layer* 1

Pada **Gambar 4.7** Penjalaran Gelombang Tsunami Skenario 1 *Layer* 1 merupakan penjalaran gelombang tsunami pada Skenario 1 selama 117 menit pada *layer* 1 yang menunjukkan elevasi gelombang. Pada menit ke-0 merupakan patahan sumber gempa dengan warna merah menunjukkan kenaikan air laut, sedangkan warna biru menunjukkan penurunan elevasi pada permukaan laut. Pada menit ke-9 menunjukkan gelombang tsunami yang mulai menjalar menjauhi sumber gempa. Kenaikan dan penurunan air laut dipengaruhi oleh topografi dasar laut dan batimetri di wilayah tersebut. Pada menit ke-18 menunjukkan gelombang tsunami yang semakin mendekati pesisir pantai, dengan tinggi gelombang yang meningkat akibat kedalaman laut yang berkurang. Pada menit ke-27

gelombang tsunami telah mencapai ke daerah pesisir pantai dengan ketinggian air maksimum telah mencapai daratan, yang memungkinkan telah terjadi banjir di daerah pesisir pantai. Ilustrasi lebih jelasnya dapat dilihat pada **Gambar 4. 8** Penjalaran Gelombang Tsunami Skenario 1 *Layer 5* yang menunjukkan skenario 1 pada *layer 5*.

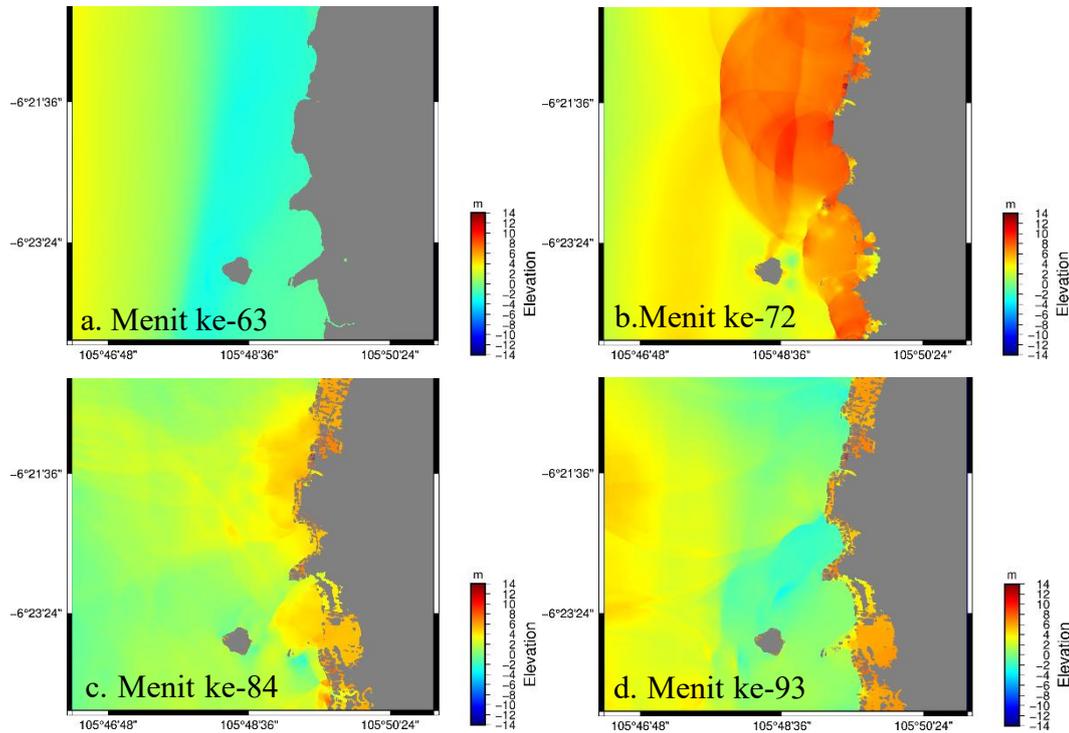


Gambar 4. 8 Penjalaran Gelombang Tsunami Skenario 1 *Layer 5*

Pada **Gambar 4. 8** Penjalaran Gelombang Tsunami Skenario 1 *Layer 5* menunjukkan penjalaran gelombang tsunami skenario 1 pada *layer 5*. Pada menit ke-63 menunjukkan terjadinya penurunan elevasi air laut yang ditandai dengan warna biru, kemudian diikuti dengan gelombang tsunami yang merupakan kenaikan elevasi air laut ditandai dengan warna kuning. Pada menit ke-72 menunjukkan kondisi gelombang tsunami yang telah mencapai pesisir pantai ditandai dengan warna oranye-merah dengan ketinggian maksimum yaitu sebesar 8-12 meter. Pada menit ke-84 menunjukkan jarak inundasi terjauh serta gelombang telah mulai kembali surut hingga mencapai akhir simulasi pada menit ke-117.

Selanjutnya, terdapat skenario 2 yaitu dengan menggunakan pelindung kombinasi (*seawall* dan *mangrove*). Berbeda dengan skenario 1, data topografi yang digunakan dalam skenario 2 telah mencakup keberadaan bangunan *seawall*. Kemudian saat proses pelaksanaan simulasi, pemilihan nilai kekasaran dalam program COMCOT menggunakan nilai kekasaran yang bervariasi sesuai dengan nilai manning yang telah

ditentukan sebelumnya. Hasil penjalaran gelombang tsunami untuk skenario 2 layer 5 dapat dilihat pada **Gambar 4. 9** Penjalaran Gelombang Tsunami Skenario 2 Layer 5.



Gambar 4. 9 Penjalaran Gelombang Tsunami Skenario 2 Layer 5

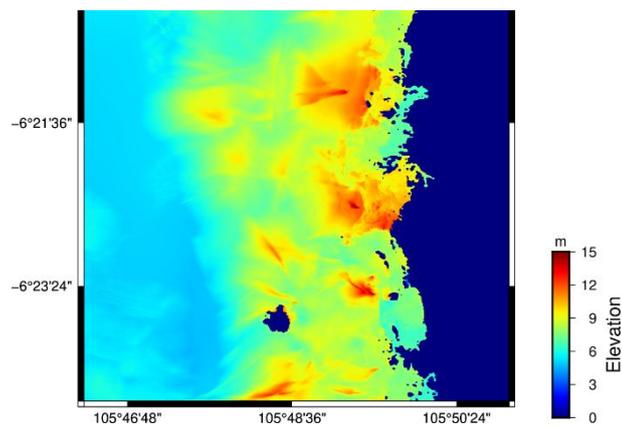
Pada menit ke-63 terjadi penurunan elevasi air laut sebesar 2 meter, kemudian diikuti dengan kenaikan elevasi air laut sebesar 4 meter. Pada menit ke-72 gelombang tsunami telah menghantam ke pesisir pantai ditandai dengan warna merah dengan ketinggian sebesar 8-12 meter tetapi telah terhalang oleh bangunan *seawall*. Pada menit ke-84 menunjukkan gelombang tsunami telah menurun hingga 4 meter yang ditandai dengan warna kuning. Pada menit ke-93 terjadi jarak inundasi terjauh serta gelombang tsunami yang semakin menurun sampai akhir simulasi yaitu menit ke-117.

Dengan adanya simulasi penjalaran gelombang tsunami yang memiliki dua skenario, terdapat perbedaan yang signifikan pada gelombang tsunami. Pada skenario 1 jarak inundasi lebih jauh dibandingkan dengan skenario 2. Hal ini dikarenakan pada skenario 2 terdapat pelindung kombinasi (*seawall* dan *mangrove*) pantai, sedangkan skenario 1 tidak memiliki pelindung kombinasi (*seawall* dan *mangrove*) pantai.

4.4 Ketinggian Maksimum Tsunami

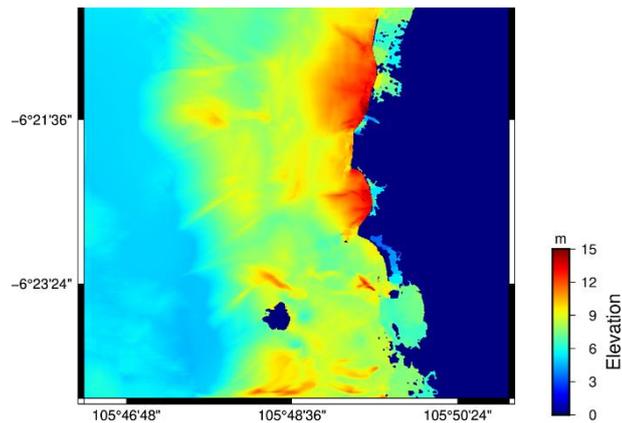
Ketinggian maksimum merupakan titik yang paling tinggi dari permukaan air laut yang berada di wilayah daratan pada saat terjadi tsunami. Semakin dangkal suatu wilayah,

maka semakin tinggi tsunami yang dihasilkan. Pada penelitian ini, ketinggian maksimum tsunami dapat diperoleh menggunakan program COMCOT selama proses penjalaran gelombang tsunami. Pada saat pelaksanaan simulasi untuk mengetahui ketinggian maksimum tsunami, waktu yang digunakan juga selama 7200 detik (120 menit) dengan interval waktu setiap 180 detik (3 menit). Fokus penelitian menggunakan *layer 5* yang dapat memberikan hasil akurat mengenai penjalaran gelombang tsunami. Selain itu, dapat terlihat jelas gelombang tsunami yang telah mencapai permukaan daratan serta ketinggian maksimum yang dihasilkan.



Gambar 4. 10 Ketinggian Maksimum Skenario 1

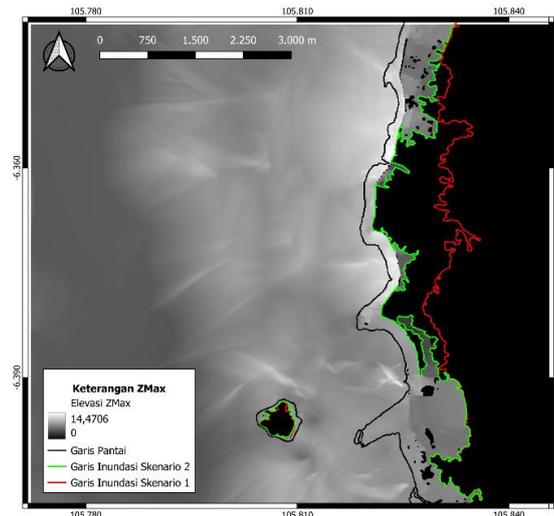
Dapat dilihat pada **Gambar 4. 10** merupakan ketinggian maksimum untuk skenario 1 pada *layer 5*. Data ketinggian maksimum didapatkan dari hasil penjalaran gelombang tsunami. Pada skenario 1 merupakan wilayah yang tidak memiliki perlindungan pantai, memiliki dampak terbesar dari bencana tsunami khususnya di daerah pesisir pantai. Ketinggian maksimum yang didapatkan akibat dari tsunami yaitu sebesar 15 meter yang ditandai dengan warna merah dan berada di pesisir pantai. Sedangkan, wilayah terjauh yang terkena dampak tsunami memiliki ketinggian 6 meter yang ditandai dengan warna biru muda.



Gambar 4. 11 Ketinggian Maksimum Skenario 2

Pada skenario 2, telah ditambahkan bangunan *seawall* serta dilakukan penanaman *mangrove* di pesisir sebagai perlindungan pantai. Hasil ketinggian maksimum yang didapatkan pada skenario 2 *layer 5* dapat dilihat pada **Gambar 4. 11**. Wilayah terjauh yang terkena dampak tsunami memiliki ketinggian 6 meter yang ditandai dengan warna biru muda. Sedangkan, ketinggian maksimum yang didapatkan akibat dari tsunami yaitu sebesar 15 meter yang ditandai dengan warna merah dan berada di pesisir pantai tetapi masih terhalang oleh adanya bangunan *seawall*.

Perbedaan antara skenario 1 dan skenario 2 terlihat pada jarak inundasi yang dihasilkan, serta wilayah yang terdampak akibat dari tsunami, seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 4.12**. Jarak inundasi dianalisis menggunakan perangkat lunak QGIS untuk mengetahui perbedaan skenario 1 dan skenario 2 berdasarkan garis inundasi dan luas inundasi. Pada skenario 1, garis inundasi menunjukkan bahwa bahwa jarak inundasi lebih jauh diukur dari garis pantai dibandingkan dengan skenario 2. Hal ini berarti wilayah yang terdampak akibat tsunami lebih luas, yang memiliki luas inundasi sekitar 751,72 hektar dianalisis menggunakan perangkat lunak QGIS. Sedangkan pada skenario 2, garis inundasi menunjukkan bahwa jarak inundasi lebih dekat diukur dari garis pantai dibandingkan dengan skenario 1. Luas inundasi pada skenario 2 sekitar 454,38 hektar. Dengan demikian, wilayah yang terdampak akibat tsunami pada skenario 2 berkurang sekitar 39,6% lebih sedikit dibandingkan dengan skenario 1. Adapun dalam penelitian ini, pengurangan luas inundasi pada ketinggian maksimum mencapai 39%, yang menunjukkan bahwa efektivitas yang lebih tinggi dibandingkan penelitian Jessica et al. (2022), yaitu sebesar 22% pada kondisi pasang tertinggi (*High Water Level*).

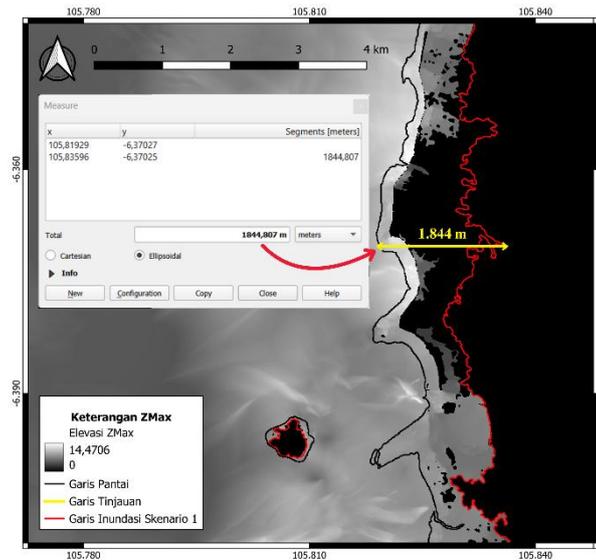


Gambar 4.12 Perbedaan Ketinggian Maksimum Skenario 1 dan Skenario 2

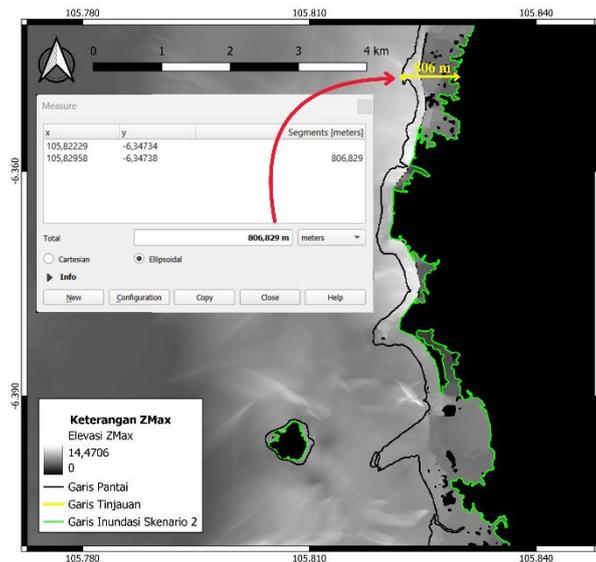
Pada **Gambar 4.12** menunjukkan peta elevasi ketinggian maksimum yang ditunjukkan dengan warna hitam untuk tinggi minimum hingga tinggi maksimum yang ditunjukkan dengan warna putih. Terdapat pula garis merah yang menunjukkan garis inundasi untuk skenario 1, sedangkan garis hijau menunjukkan garis inundasi untuk skenario 2, dan garis hitam menunjukkan garis eksisting pantai pada Kecamatan Labuan. Dilihat dari garis berwarna merah dan berwarna hijau dapat diketahui jarak maksimum maupun jarak minimum antara skenario 1 dan skenario 2.

4.5 Jarak Inundasi

Jarak inundasi adalah jarak terjauh yang dihantam oleh gelombang tsunami diukur dari garis pantai. Jarak ini dapat melihat wilayah daratan yang terkena dampak banjir karena tsunami, sehingga dapat diketahui wilayah yang paling terancam hingga yang paling sedikit terancam tsunami. Semakin rendah wilayah daratan, maka jarak inundasi semakin jauh diukur dari garis pantai. Hal tersebut dapat dilihat dari potongan melintang dari suatu wilayah tinjauan. Pada **Gambar 4. 13** dapat dilihat jarak inundasi maksimum pada skenario 1 sebesar 1,844 kilometer yang ditandai dengan garis berwarna kuning atau berada di titik koordinat $6,370^{\circ}$ LS serta $105,819^{\circ}$ BT - $105,836^{\circ}$ BT. Sedangkan, pada **Gambar 4. 14** dapat dilihat jarak inundasi maksimum pada skenario 2 sebesar 0,806 kilometer sepanjang garis yang ditandai dengan warna kuning atau berada di titik koordinat $6,347^{\circ}$ LS serta $105,822^{\circ}$ BT – $105,829^{\circ}$ BT. Pengurangan jarak inundasi maksimum tersebut disebabkan oleh adanya pelindung pantai pada skenario 2.

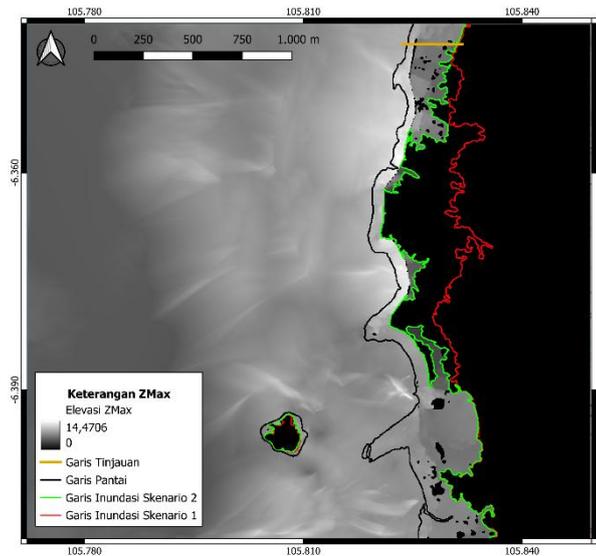


Gambar 4. 13 Jarak Inundasi Maksimum Skenario 1

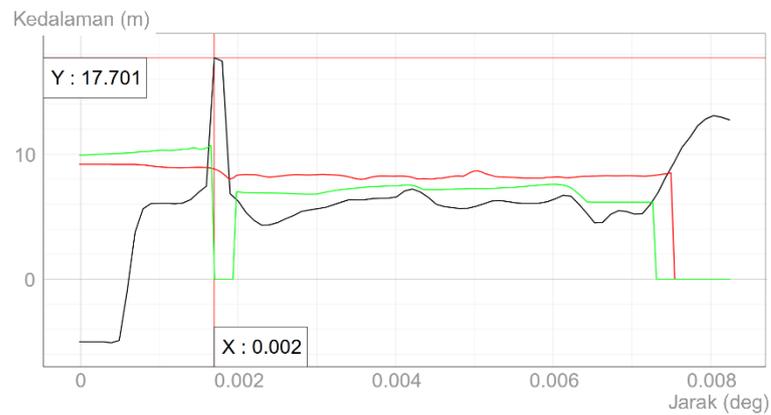


Gambar 4. 14 Jarak Inundasi Maksimum Skenario 2

Pada **Gambar 4.12** terdapat wilayah yang memiliki perbedaan tidak signifikan antara skenario 1 dan skenario 2. Dapat dilihat pada **Gambar 4. 15**, wilayah garis tinjauan yang berada di titik koordinat $6,342^{\circ}$ LS serta $105,823^{\circ}$ BT – $105,832^{\circ}$ BT memiliki elevasi eksisting topografi yang lebih rendah dari pada wilayah utara tinjauan tersebut. Pada grafik yang dapat dilihat pada **Gambar 4. 16** ditunjukkan elevasi eksisting topografi dengan garis tinjauan tersebut mengakibatkan gelombang tsunami menggenang di dataran yang lebih rendah sebelum akhirnya mencapai elevasi yang lebih tinggi.



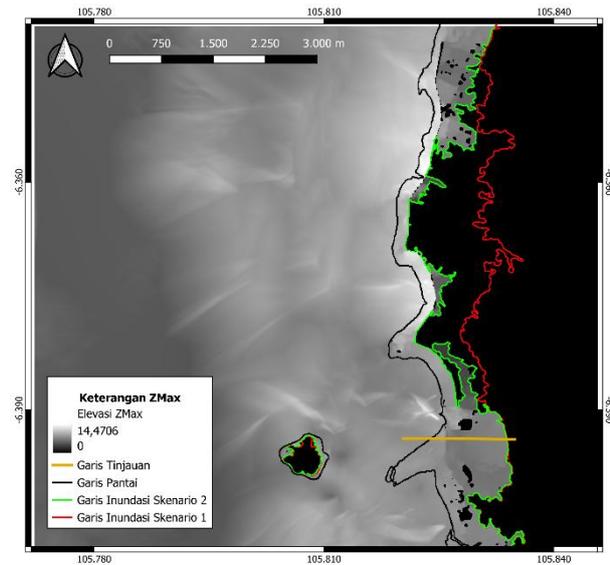
Gambar 4. 15 Tinjauan Wilayah Utara Kecamatan Labuan



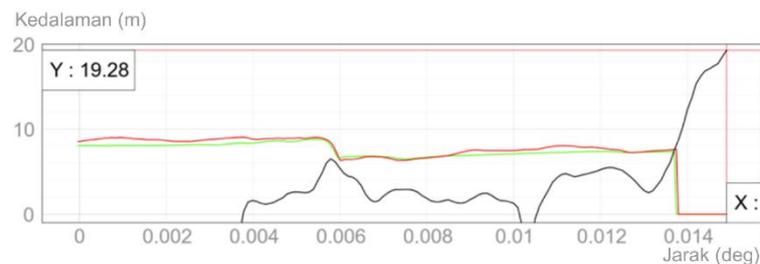
Gambar 4. 16 Potongan Melintang Wilayah Utara Kecamatan Labuan

Kemudian dilihat dari **Gambar 4.12** Perbedaan Ketinggian Maksimum Skenario 1 dan Skenario 2 juga terdapat wilayah yang tidak memiliki perbedaan signifikan antara skenario 1 dan skenario 2. Salah satunya pada titik koordinat $6,395^{\circ}$ LS serta $105,818^{\circ}$ BT – $105,836^{\circ}$ BT, wilayah tersebut merupakan wilayah PLTU (Pembangkit Listrik Tenaga Udara) yang tidak memungkinkan akan dibangun *seawall*. Menurut Seung Tai Jeong (2019), aktivitas pembangunan di sekitar sistem PLTU berpotensi mengganggu kinerja sistem tersebut, sehingga dapat menyebabkan penurunan efisiensi pada PLTU. Dapat dilihat pada

Gambar 4. 17 merupakan tinjauan dari wilayah PLTU. Berdasarkan grafik yang dapat dilihat pada **Gambar 4. 18** merupakan potongan melintang, gelombang tsunami merambat ke wilayah daratan karena tidak adanya bangunan *seawall* di wilayah tersebut.

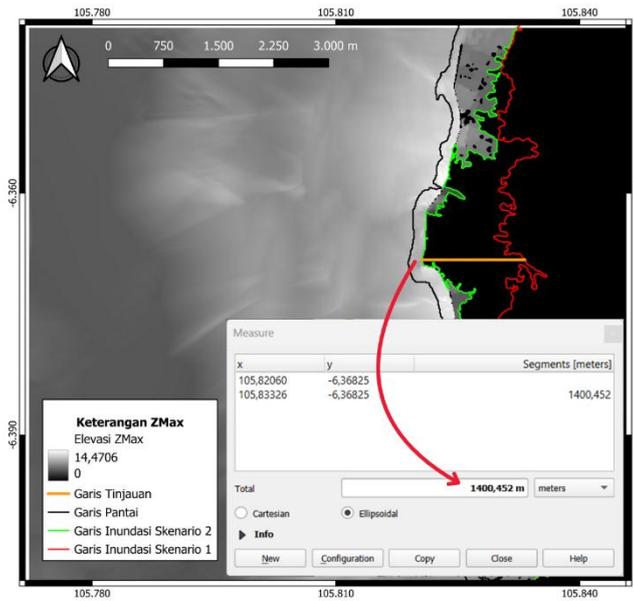


Gambar 4. 17 Tinjauan Wilayah PLTU

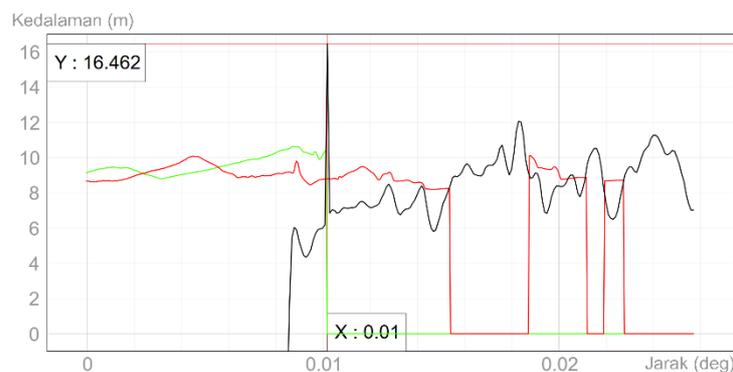


Gambar 4. 18 Potongan Melintang Wilayah PLTU

Selain wilayah yang tidak memiliki perbedaan signifikan, terdapat pula wilayah yang memiliki jarak inundasi yang sangat signifikan. Seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 4.19** pada titik koordinat $6,368^{\circ}$ LS serta $105,820^{\circ}$ BT – $105,833^{\circ}$ BT memiliki jarak inundasi yang sangat signifikan, perbedaannya mencapai 1,4 kilometer. Dapat dilihat pada **Gambar 4.20** hal ini disebabkan oleh gelombang tsunami tidak melewati bangunan *seawall* pada skenario 2, sehingga air laut tertahan pada bangunan *seawall*. Sedangkan pada skenario 1, gelombang tsunami terus menjalar ke wilayah daratan dikarenakan wilayah tinjauan tersebut memiliki dataran yang rendah sehingga air terus menjalar lebih jauh ke daratan. Pada grafik **Gambar 4.20**, gelombang tsunami pada skenario 2 memiliki ketinggian gelombang tsunami yang lebih tinggi daripada skenario 1. Hal ini disebabkan oleh adanya genangan air yang terbentuk sebelum akhirnya mencapai *seawall*. Sedangkan, pada skenario 1, ketinggian gelombang tsunami lebih rendah akibat dari gelombang tsunami yang tidak terhalang oleh *seawall* sehingga gelombang langsung mengalir menuju daratan.



Gambar 4.19 Perbedaan Jarak Inundasi Terjauh dari Skenario 1 dan Skenario 2



Gambar 4.20 Potongan Melintang dari Jarak Inundasi Terjauh

4.6 Estimasi Perhitungan *Carbon Footprint*

Carbon footprint atau jejak karbon merupakan ukuran dari total emisi karbon dioksida yang dihasilkan, baik secara langsung maupun tidak langsung, akibat suatu aktivitas atau yang terakumulasi sepanjang siklus hidup suatu produk. Pada penelitian ini, jejak karbon yang diperhitungkan adalah bahan material dari pembangunan *seawall* dan penyerapan dari hasil penanaman *mangrove*. Perhitungan jejak karbon pada penelitian ini, dilihat dari volume yang akan dibangun *seawall* dan ditanam *mangrove*.

Perhitungan jejak karbon untuk bangunan *seawall* dilakukan dengan mengalikan koefisien jejak karbon bahan material *seawall* dengan volume bangunan *seawall* yang akan dibangun. Pada penelitian ini, bahan material yang akan digunakan hanya beton dengan nilai emisi CO₂ sebesar 387 kgCO₂/m³ menurut Nielsen (2008). Perhitungan jejak

karbon berdasarkan bahan material *seawall* dilakukan dengan menghitung luas struktur bangunan *seawall* seperti pada **Gambar 3.9** Struktur Bangunan Pelindung *Seawall*. Perhitungan untuk bangunan *seawall* sebagai berikut:

Volume Bangunan *Seawall*

$$= \left(\frac{(6 \text{ m} + 11 \text{ m}) \times 2,5 \text{ m}}{2} + (2 \text{ m} \times 7,5 \text{ m}) \right) \times 6000 \text{ m}$$

$$= 217.500 \text{ m}^3$$

Jejak Karbon Bangunan *Seawall*

$$= 217.500 \text{ m}^3 \times 387 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$$

$$= 84.172.500 \text{ kgCO}_2$$

$$= 84.172,5 \text{ tonCO}_2$$

Hasil perhitungan jejak karbon dari pembangunan *seawall* menunjukkan nilai jejak karbon sebesar 84.172,5 tonCO₂ berdasarkan pada penelitian Nielsen (2008), dengan nilai jejak karbon *concrete* dan *steel* sebesar 387 kgCO₂/m³. Sedangkan, menurut Fantili et al. (2019), menyatakan bahwa nilai jejak karbon *concrete* dan *steel* sebesar 391,4 kgCO₂/m³. Jika dibandingkan menggunakan volume bahan material yang sama, hasil yang didapatkan berdasarkan nilai jejak karbon Fantili et al. (2019) sebesar 85.129,5 tonCO₂. Perbedaan dari hasil penelitian ini dengan nilai jejak karbon yang digunakan oleh Fantili et al. (2019) hanya sekitar 1,12%. Dapat disimpulkan bahwa hasil perhitungan berdasarkan nilai jejak karbon menurut Fantili et al. (2019) menghasilkan jejak karbon yang lebih tinggi dibandingkan dengan penelitian ini, yang berarti lebih banyak karbon dilepaskan akibat pembangunan *seawall*.

Kemudian untuk perhitungan jejak karbon *mangrove*, dilakukan dengan mengalikan koefisien penyerapan jejak karbon dengan luas *mangrove* setiap hektar. Pada penelitian ini, jenis *mangrove* dan kemampuan penyerapan *mangrove* yang digunakan dapat dilihat pada **Analisis Serapan Karbon Mangrove** (Ambat et al, 2022). Jenis *mangrove* yang digunakan adalah *Rhizophora Stylosa* dan *Soonerita Alba*, yang secara ekologis cocok ditanam di area dengan substrat berlumpur, berpasir, dan berbatu (Sina et al., 2015). Karakteristik tersebut sesuai dengan kondisi pesisir di Kecamatan Labuan, Pandeglang, sebagai lokasi penelitian. Perhitungan penyerapan jejak karbon *mangrove* dilakukan dengan menghitung luas *mangrove* yang telah dihitung menggunakan

perangkat lunak QGIS yaitu sebesar 120,85 hektar. Perhitungan untuk penyerapan jejak karbon *mangrove* untuk setiap tahun sebagai berikut:

Penyerapan Jejak Karbon *Mangrove* Menurut Ambat et al. (2022)

$$= \frac{232,8 \text{ tonCO}_2/\text{ha}}{12 \text{ tahun}}$$

$$= 19,4 \text{ tonCO}_2/\text{ha}/\text{tahun}$$

Setelah didapatkan nilai jejak karbon menurut Nielsen (2008) untuk setiap tahun, dapat diperhitungkan nilai jejak karbon pada penelitian ini, yaitu sebagai berikut:

Penyerapan Jejak Karbon *Mangrove*

$$= 120,85 \text{ ha} \times 19,4 \text{ tonCO}_2/\text{ha}/\text{tahun}$$

$$= 2.344,49 \text{ tonCO}_2/\text{tahun}$$

Berdasarkan informasi dari WRI Indonesia (2019), satu mobil pribadi yang menempuh jarak 20 km per hari dapat menghasilkan sekitar 1.300 kgCO₂/tahun. Hasil penyerapan karbon sebesar 2.344,49 tonCO₂ per tahun setara dengan jejak karbon yang dihasilkan oleh 1.800 mobil pribadi dalam tahun dengan jarak tempuh 20 km per hari. Hal ini menunjukkan bahwa penyerapan karbon tersebut mampu mengimbangi dampak emisi dari sektor transportasi, khususnya mobil pribadi. Perbandingan ini membuktikan pentingnya upaya penyerapan karbon sebagai langkah mitigasi perubahan iklim.

Berdasarkan perhitungan jejak karbon dari *mangrove* dan *seawall*, dapat dihitung nilai jejak karbon netral. Jejak karbon *mangrove* memiliki nilai positif karena *mangrove* berperan dalam penyerapan karbon. Sedangkan, jejak karbon *seawall* memiliki nilai negatif karena pembangunan *seawall* menghasilkan emisi karbon. Adapun perhitungan jejak karbon netral adalah sebagai berikut:

$$\text{Jejak Karbon Netral}$$

$$= +2.344,49 \text{ tonCO}_2 - 84.172,5 \text{ tonCO}_2$$

$$= -81.828,01 \text{ tonCO}_2$$

Berdasarkan perhitungan jejak karbon netral, dapat disimpulkan bahwa penelitian ini tidak dapat mencapai kondisi karbon netral, yaitu kondisi dengan emisi karbon bersih sebesar nol. Pada penelitian ini, pengurangan karbon yang dihasilkan hanya berkurang

sekitar 2.344,49 ton atau sekitar 2,79% dari total emisi karbon yang dihasilkan. Kemampuan *mangrove* dalam menyerap karbon tidak cukup menyeimbangi emisi karbon yang dihasilkan dari pembangunan *seawall*. Perluasan penanaman *mangrove* di wilayah pesisir Kecamatan Labuan, khususnya pelebaran kawasan *mangrove*, berpotensi meningkatkan kapasitas serapan karbon secara signifikan. Selain pelebaran area *mangrove*, strategi mitigasi dapat diperkuat dengan penanaman vegetasi tambahan di sekitar bangunan *seawall* maupun di area daratan sekitarnya yang memiliki potensi serupa dalam menyerap karbon. Kombinasi dari kedua pendekatan ini diharapkan mampu meningkatkan total serapan karbon dan secara efektif mereduksi emisi yang dihasilkan oleh keberadaan dan aktivitas di sekitar bangunan.

Meskipun pada penelitian ini kontribusi tahunan penyerapan karbon oleh *mangrove* relatif kecil dibandingkan total emisi karbon yang dihasilkan dari pembangunan *seawall*, dampaknya tidak dapat diabaikan dalam konteks jangka panjang. Penyerapan karbon yang terjadi secara perlahan namun konsisten memiliki potensi akumulatif yang signifikan terhadap pengurangan karbon. Hal ini menunjukkan bahwa konservasi area penanaman *mangrove* berskala kecil dapat memainkan peran penting dalam strategi mitigasi perubahan iklim. Seiring berjalannya waktu, penurunan emisi secara bertahap tersebut akan memberikan kontribusi nyata dalam mencapai karbon netral. Oleh karena itu, meskipun efek langsungnya tampak terbatas dalam skala tahunan, upaya pelestarian *mangrove* menjadi langkah strategis dan berkelanjutan yang akan memberikan manfaat besar bagi perubahan iklim dan keberlanjutan ekosistem pesisir di masa mendatang.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa pelindung kombinasi (*mangrove* dan *seawall*) pantai yang diterapkan di Kecamatan Labuan, Pandeglang memiliki efektivitas tertentu dalam mereduksi dampak tsunami, sekaligus menunjukkan kontribusi terhadap jejak karbon yang perlu dipertimbangkan dalam konteks mitigasi bencana yang berorientasi pada keberlanjutan, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Penyebaran gelombang tsunami tanpa adanya pelindung kombinasi pantai (*mangrove* dan *seawall*) di Pandeglang, Banten, berdasarkan hasil simulasi menggunakan program COMCOT menunjukkan bahwa kenaikan muka air yang menghantam pesisir Kecamatan Labuan mencapai 8-12 meter. Ketinggian maksimum yang dicapai setinggi 15 meter menghantam pesisir pantai, wilayah terjauh yang terkena dampak tsunami mencapai ketinggian 6 meter, serta luas wilayah inundasi sebesar 751,72 hektar.
2. Hasil simulasi penyebaran gelombang tsunami dengan keberadaan pelindung kombinasi pantai (*mangrove* dan *seawall*) menggunakan program COMCOT di Pandeglang, Banten, memperlihatkan bahwa gelombang tsunami yang menghantam pesisir Kecamatan Labuan mencapai 8-12 meter tetapi telah terhalang oleh *seawall*. Ketinggian maksimum di wilayah inundasi terjauh yang terkena dampak mencapai 6 meter, sedangkan ketinggian maksimum di pesisir pantai setinggi 15 meter tetapi telah terhalang oleh bangunan *seawall*. Luas wilayah inundasi akibat tsunami pada wilayah yang memiliki pelindung kombinasi (*mangrove* dan *seawall*) pantai yaitu sebesar 454,38 hektar.
3. Jumlah nilai *carbon footprint* yang dihasilkan dari proses pembangunan pelindung kombinasi pantai (*mangrove* dan *seawall*) terhadap mitigasi bencana tsunami di Pandeglang, Banten, menghasilkan nilai sebesar 84.172,5 tonCO₂ akibat dari pembangunan *seawall*. Sedangkan, nilai penyerapan karbon pada penanaman

mangrove menghasilkan nilai sebesar 2.344,49 tonCO₂ per tahun. Dengan demikian, dalam satu tahun, masih terdapat sisa emisi karbon sebesar 81.828,01 tonCO₂, yang berarti bahwa penyerapan karbon oleh *mangrove* hanya mampu mereduksi sekitar 2,79% dari total emisi tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa upaya mencapai kondisi karbon netral memerlukan waktu yang panjang dan strategi tambahan yang lebih menyeluruh.

5.2 Saran

Berdasarkan hasil analisis dan keterbatasan dalam penelitian ini, disarankan agar penelitian selanjutnya dapat melanjutkan dan memperdalam kajian terkait efektivitas pelindung kombinasi pantai (*mangrove* dan *seawall*) serta kontribusinya terhadap jejak karbon. Penelitian lanjutan diharapkan mampu mengeksplorasi variabel tambahan, metode pemodelan yang lebih rinci, serta cakupan wilayah yang lebih luas guna memperoleh gambaran yang lebih menyeluruh dalam konteks mitigasi bencana tsunami di wilayah pesisir. Beberapa saran yang dapat diberikan oleh penulis adalah sebagai berikut:

1. Disarankan agar dalam penelitian selanjutnya, bangunan *seawall* dirancang dengan variasi ketinggian untuk mengetahui secara lebih tepat sejauh mana perbedaan tinggi dapat memengaruhi efektivitasnya dalam meredam gelombang tsunami. Selain itu, perlu juga diperhatikan lebar dari konstruksi *seawall* agar tidak terlalu tipis, guna meminimalkan risiko kerusakan akibat gaya gelombang tsunami serta menjamin kekuatan struktur dan ketahanannya terhadap tekanan dari gelombang yang menghantam *seawall*.
2. Dilakukan perhitungan dan analisis yang lebih mendetail dengan mempertimbangkan keberadaan sungai dan bangunan lainnya di lokasi penelitian. Hal ini penting dilakukan karena elemen-elemen tersebut dapat menunjukkan hasil simulasi dan evaluasi efektivitas pelindung kombinasi pantai yang lebih akurat terhadap kondisi aktual di lapangan.
3. *Carbon footprint* yang digunakan dalam pembangunan *seawall* tidak hanya terbatas pada bahan material yang digunakan, tetapi juga mencakup faktor-faktor lain yang dapat berkontribusi terhadap emisi karbon, seperti transportasi material, penggunaan energi selama pembangunan, serta pemeliharaan dan pengoperasian *seawall* dalam

jangka panjang. Dengan demikian, evaluasi jejak karbon dapat memberikan gambaran yang lebih menyeluruh mengenai dampak lingkungan dari pembangunan *seawall*.

4. Untuk penelitian selanjutnya, disarankan agar digunakan nilai *mannig* yang bervariasi sesuai dengan jenis *mangrove* yang ada, mengingat setiap jenis *mangrove* memiliki karakteristik fisik yang berbeda yang dapat mempengaruhi kekasaran permukaan dan laju aliran air. Dengan mengadaptasi nilai *mannig* yang sesuai untuk setiap jenis *mangrove*, diharapkan hasil simulasi akan lebih akurat dalam menggambarkan peran *mangrove* dalam mengurangi kecepatan aliran air dan memperkirakan dampak lingkungan yang lebih realistis.

DAFTAR PUSTAKA

- Admaja, W. K., et al. (2018). Identifikasi dan Analisis Jejak Karbon (*Carbon footprint*) dari Penggunaan Listrik di Institut Teknologi Yogyakarta
- Akhund, S. (2022). *Analysis of Spatial Big Data for Geographical Information Systems*
- Ambat, Y. P. P., et al. (2022). Analisis Perhitungan Reduksi Karbon Dioksida (CO₂) Dengan Rancangan Penanaman Pohon Bakau (*Mangrove*) Di Area Pesisir Sekitar Pelabuhan Pelelangan Ikan Kecamatan Tuminting Sampai Pesisir Pantai Molas
- Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika. (2010). *Indonesia Tsunami Early Warning System Konsep dan Implementasi*. BMKG.
- Badan Pusat Statistik. (2023). Kecamatan Labuan dalam Angka, Kabupaten Pandeglang.
- Balai Besar Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Wilayah III. (2015). Pengetahuan Gempa Bumi.
- Bappenas. (2021). 7 Proyek Implementasi Pembangunan Rendah Karbon Indonesia.
- Benazir, et al. (2017). *Comparison of Methods for Simulating Tsunami Run-Up Through Coastal Forests*
- Bryant, E. (2008). *Tsunami The Underrated Hazard* (Second, Vol. 43, Issue March). Springer.
- Didik, S. et al. (2021). *Impact Of Revegetation Of Rhizophora Apiculata And Rhizophora Stylosa On The Development Of Mangrove Vegetation In Teluk Jor, East Lombok*.
- Fantili, A. P., et al. (2019). *The Carbon footprint of Normal and High-Strength Concrete Used in Low-Rise and High-Rise Buildings*
- Garini, S. A. (2020). Pengolahan Data *Micro Earhquake*.
- Hakim, I. N., et al. (2014). Perencanaan Perlindungan Pantai Sayung Demak. *Jurnal Karya Teknik Sipil*.
- Hidayat, N., et al. (1997). Gempa Bumi dan Mekanismenya.
- Indriyani, R. (2019). *Bangunan Seawall*.
- Iryanto, et al. (2020). *Numerical Modelling of Mangrove Merged with Seawall for Investigating Wave Mitigation Over Flat Topography*
- Jessika, Y., et al. (2022). Studi Laboratorium Bangunan Pantai Untuk Mereduksi Gelombang Tsunami Kasus Palu, Sulawesi Tengah.

- Jeong, S. T., et al. (2019). *Design and Construction of The Waterfront Retaining Wall For Cooling Water Intake Pump Station for Jimah East Power Plant, Malaysia.*
- Jihad, A., et al. (2023). *Reconstruction of the Indian Ocean Tsunami in 2004 in Sabang Based on the Current Land Cover for Tsunami Evacuation Sites Recommendations*
- Karminarsih, E. (2007). Pemanfaatan Ekosistem *Mangrove* bagi Minimasi Dampak Bencana di Wilayah Pesisir
- Li, X. et al. (2012). *Numerical modeling of the morphological change in Lhok Nga, west Banda Aceh, during the 2004 Indian Ocean tsunami: understanding tsunami deposits using a forward modeling method Nat Hazards*
- Mahendra, et al. (2021). Pentingnya Edukasi Tentang Mitigasi Bencana Bagi Masyarakat di Daerah Rawan Tsunami
- Majojo, et al. (2021). Kinerja Groin Terhadap Gelombang Dan Pasang Surut Di Pantai Kalasey Kecamatan Pineleng Kabupaten Minahasa Sulawesi Utara
- Nielsen, C. V. (2008). *Carbon footprint of Concrete Buildings Seen In The Life Cycle Perspective*
- Ningsi, R. et al. (2024). Analisis Rencana Anggaran Biaya Pekerjaan Pembangunan Pemecah Gelombang (*Breakwater*) Pantai Maligano, Desa Raimuna, Sulawesi Tenggara
- Ningsih, R. R., et al. (2021). *Carbons Stored in Land Use of Sub-Watersheds Khilau Sekampung Watersheds*
- Nurjanah, et al. (2022). Pentingnya Mitigasi Bencana Alam Longsor Lahan: Studi Persepsi Mahasiswa
- Orr, J. & Arnold, W. (2020). *A Brief Guide to Calculating Embodied Carbon*
- Parriaux, A., (2018). *Geology: Basics for Engineers, Second Edition, CRC Press, London.*
- Prahasta, E. (2005). Sistem Informasi Geografis.
- Prakoso, T. B. & Suprpto, D. (2017). Biomassa Kandungan Karbon dan Serapan Co₂ Pada Tegakan *Mangrove* di Kawasan Konservasi *Mangrove* Bedono, Demak
- Purbo, et al. (2008). Perencanaan Pengamananan Dari Bahaya Abrasi Di Kecamatan Kabupaten Demak

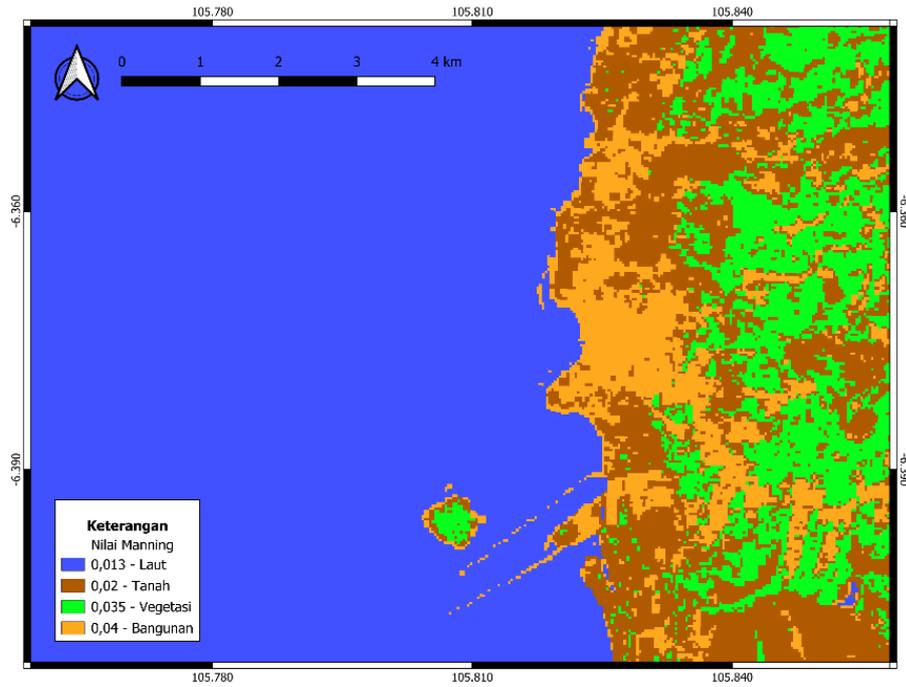
- Rasyif, T. M. (2014). *Data Base Development Of Estimated Time Of Arrival For Tsunami Disaster Mitigation At Southwestern Cities Of Aceh, Indonesia.*
- Rifandi, R. A. (2021). Pendugaan Stok Karbon dan Serapan Karbon pada Tegakan *Mangrove* di Kawasan Ekowisata *Mangrove* Desa Mojo Kabupaten Pematang.
- Rochman, H. N., et al. (2022). Aplikasi Sistem Informasi Geografis untuk Evaluasi Sistem Jaringan Drainase Di Sub DAS Kota Malang
- Sabaruddin, A., et al. (2011). *CO₂ Emission Greenhouse Gas Effect and Global Warming Building Energy*
- Sanusi, W., & Pratiwi, V. (2022). Evaluasi Koefisien Manning pada Berbagai Tipe Dasar Saluran.
- Shiki, T., Tsuji, Y., Minoura, K., & Yamazaki, T. (2008). *Tsunamiites - Features and Implications. In Tsunamiites - Features and Implications. Elsevier.*
- Sugito, N. T. (2008). Tsunami.
- Sugiyono. (2012). Metode Penelitian Kuantitatif, Kualitatif, dan R&D. Bandung: Alfabeta.
- Supendi, P. et al. (2023). *On the potential for megathrust earthquakes and tsunamis off the southern coast of West Java and southeast Sumatra, Indonesia. Natural Hazards, 116(1), 1315–1328.*
- Syamsidik, et al. (2019). *Assessing The Tsunami Mitigation Effectiveness Of The Planned Banda Aceh Outer Ring Road (BORR), Indonesia*
- UNESCO-IOC. Rangkuman Istilah Tsunami. Informasi Dokumen IOC No.1221. Paris, UNESCO, 2006
- Vitasari, M. Kerentanan Ekosistem *Mangrove* Terhadap Ancaman Gelombang Ekstrim/Abrasi Di Kawasan Konservasi Pulau Dua Banten.
- Wang, X. (2009). *User Manual For COMCOT Version 1.7*
- Worldometer. (2022). *CO₂ Emissions.*
- WRI Indonesia. (2019). Menghitung Jejak Karbon Pribadi Dapat Mendukung Aksi Iklim.
- Zhang, et al. (2012). *The Role of Mangroves in Attenuating Storms Surges*

LAMPIRAN

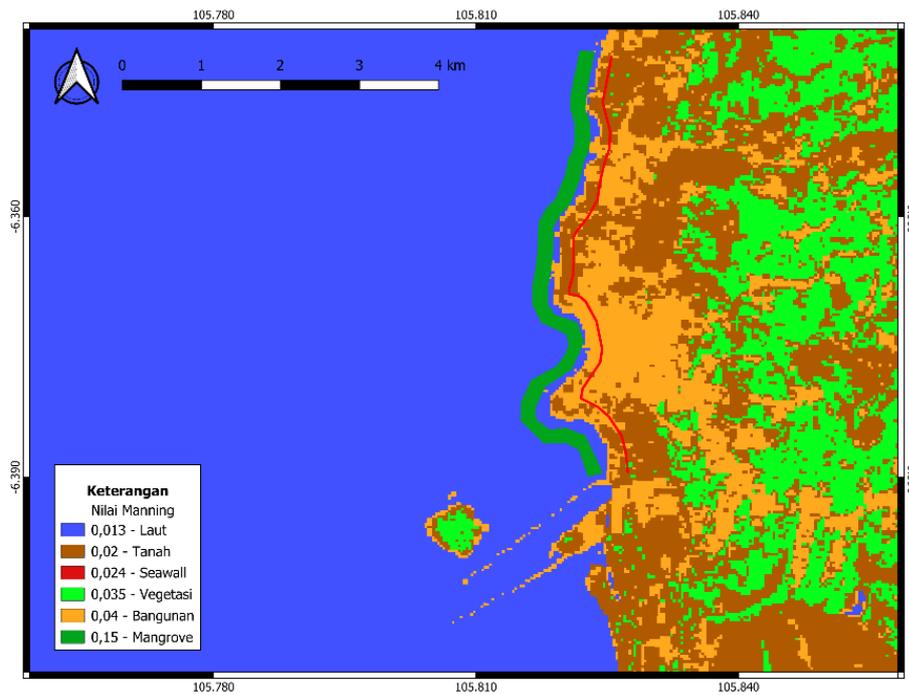
Lampiran 1 Tata Guna Lahan

1. Tutupan Tata Guna Lahan

a. Skenario 1

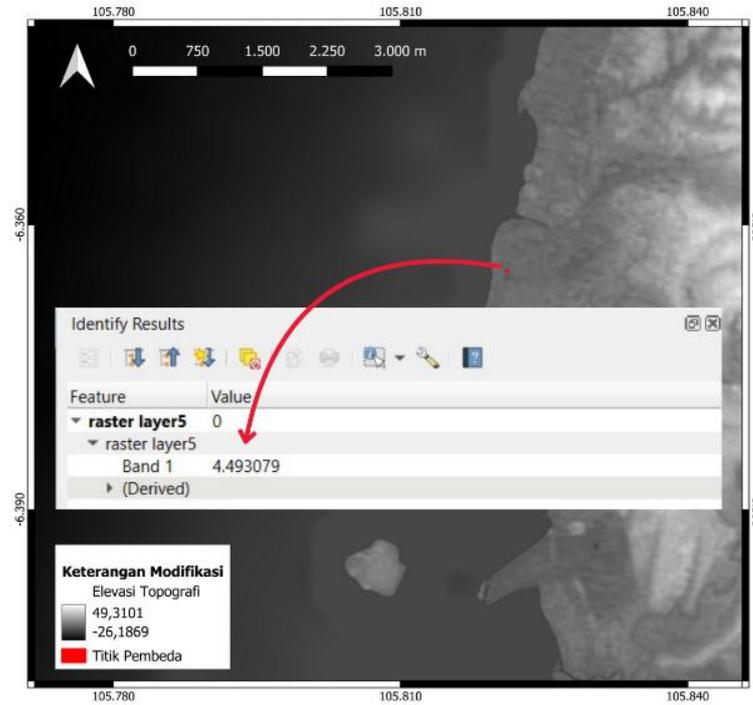


b. Skenario 2

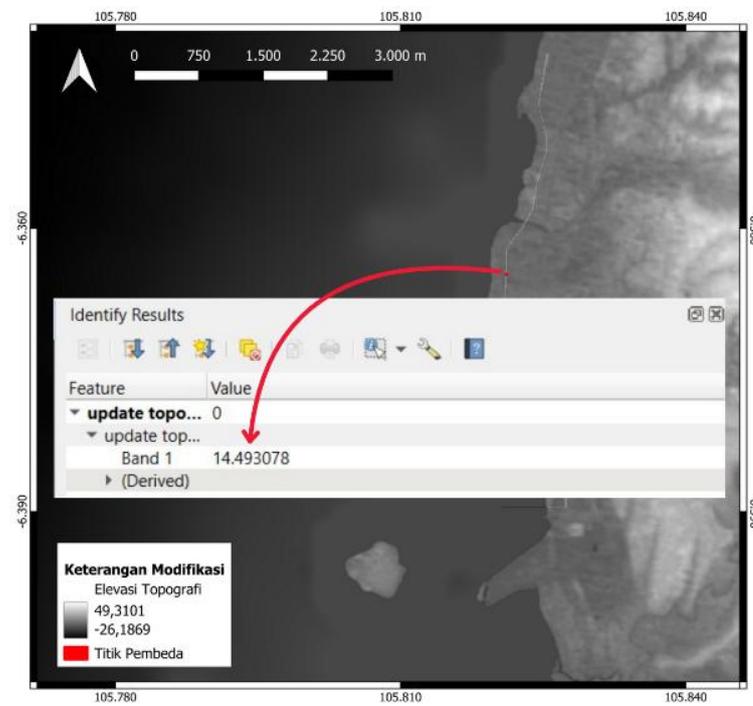


2. Modifikasi Topografi

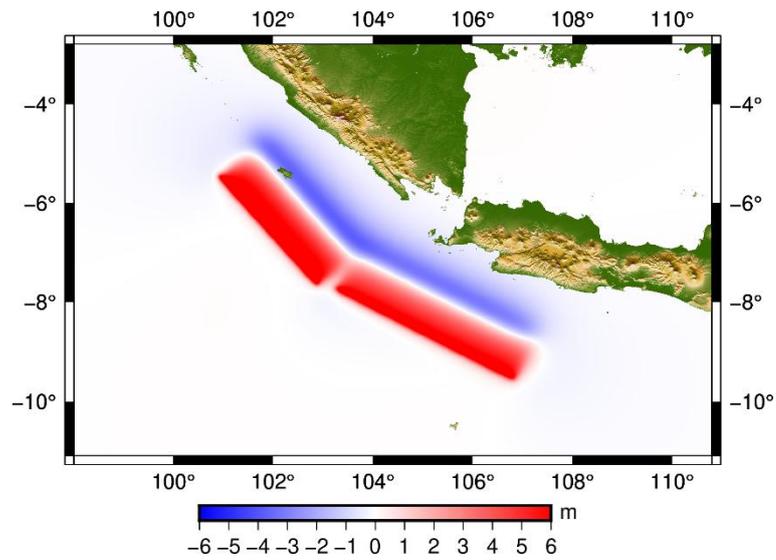
a. Skenario 1



b. Skenario 2



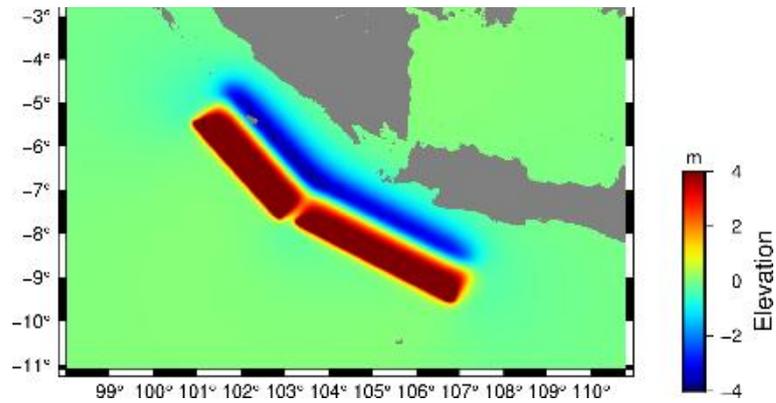
Lampiran 2 *Initial Condition*



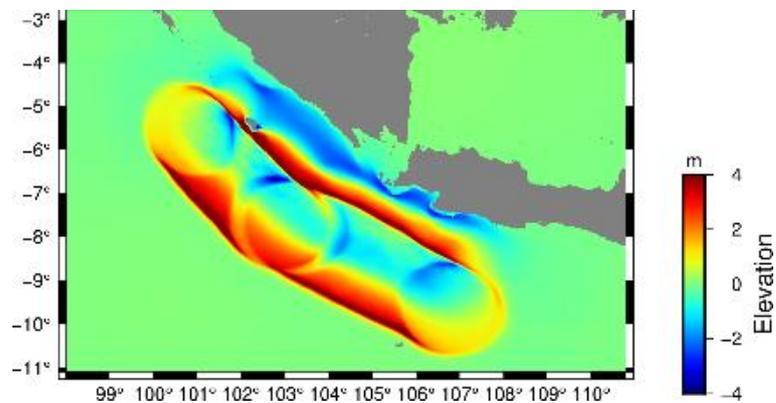
Lampiran 3 *Penjalaran Gelombang Tsunami Skenario 1*

1. *Layer 1*

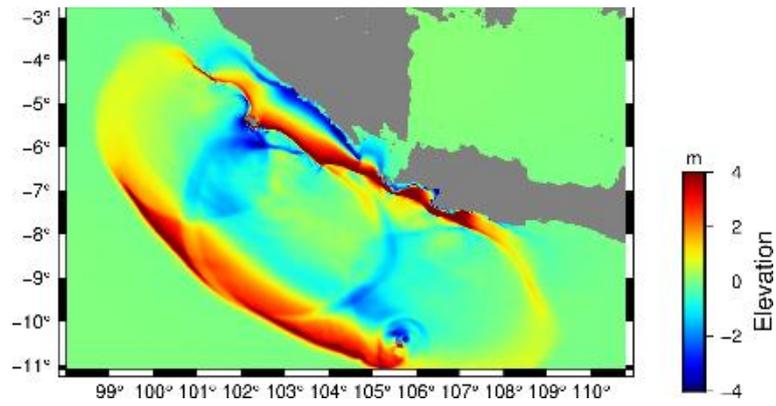
a. Menit ke-0



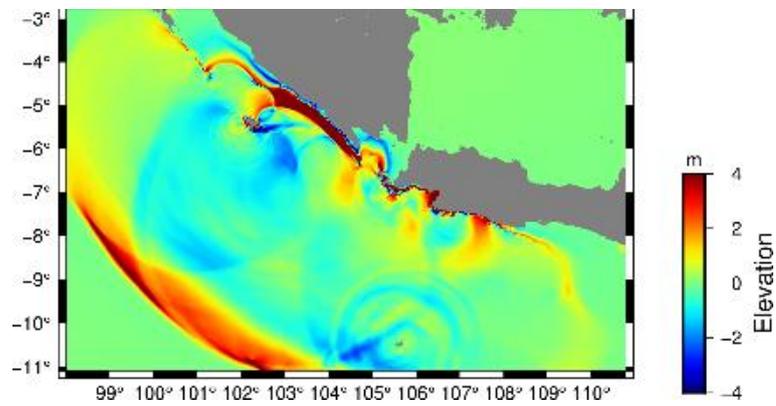
b. Menit ke-9



c. Menit ke-18

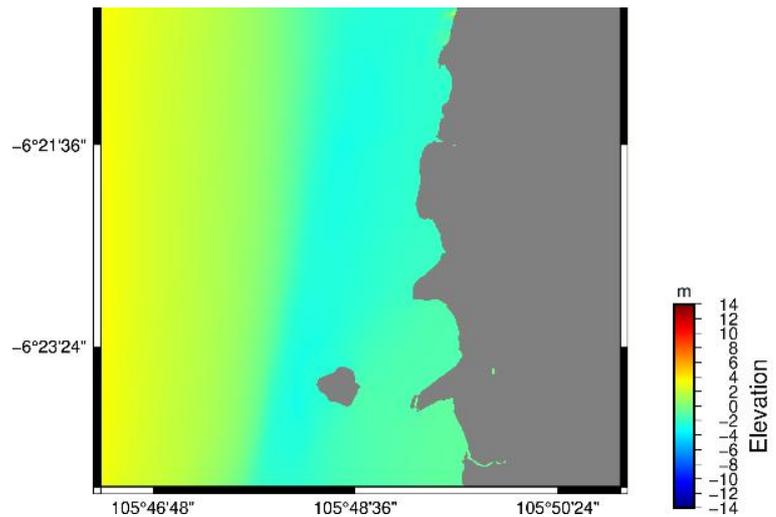


d. Menit ke-27

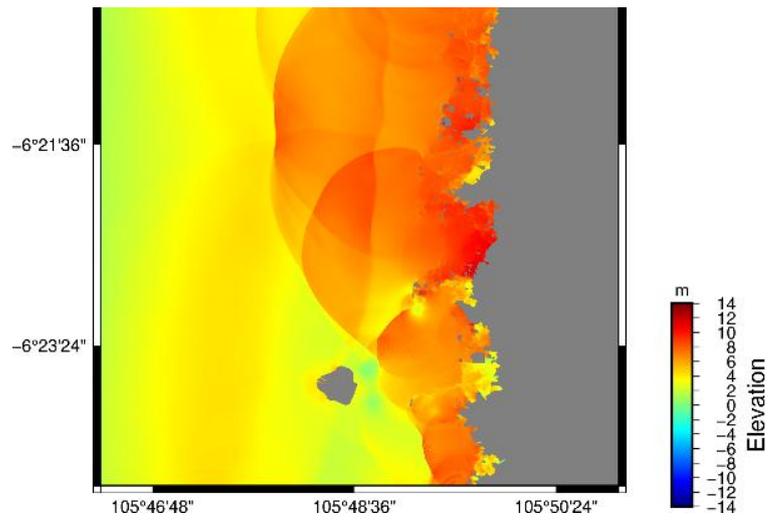


2. Layer 5

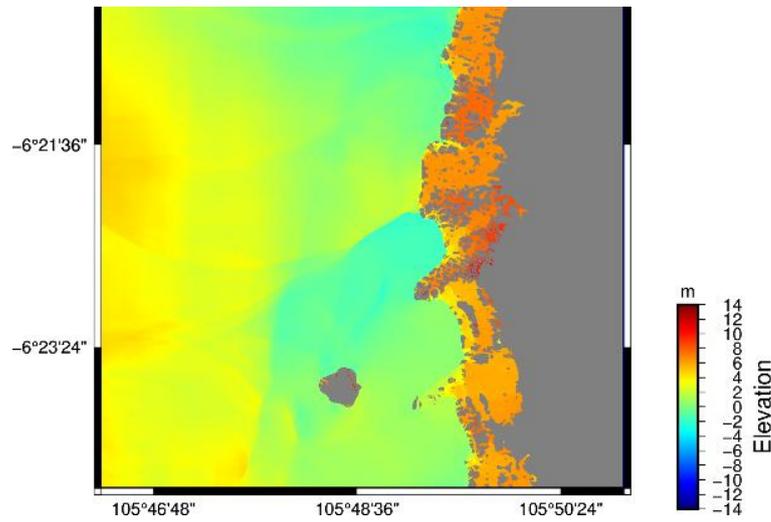
a. Menit ke-63



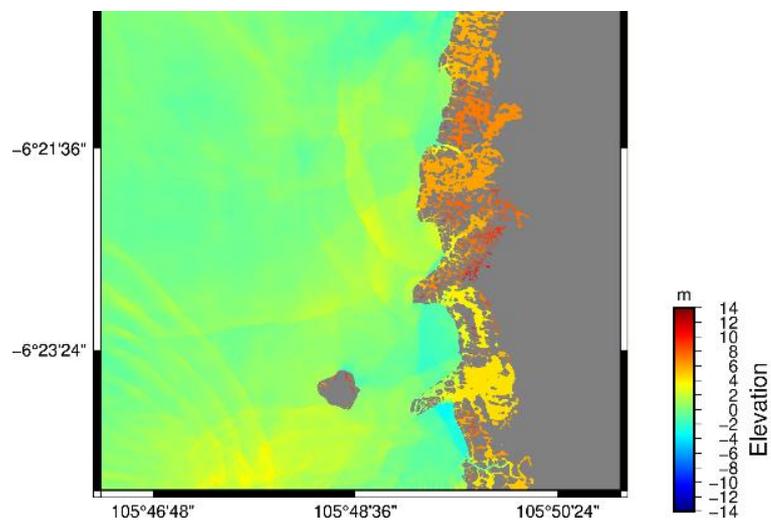
b. Menit ke-72



c. Menit ke-84

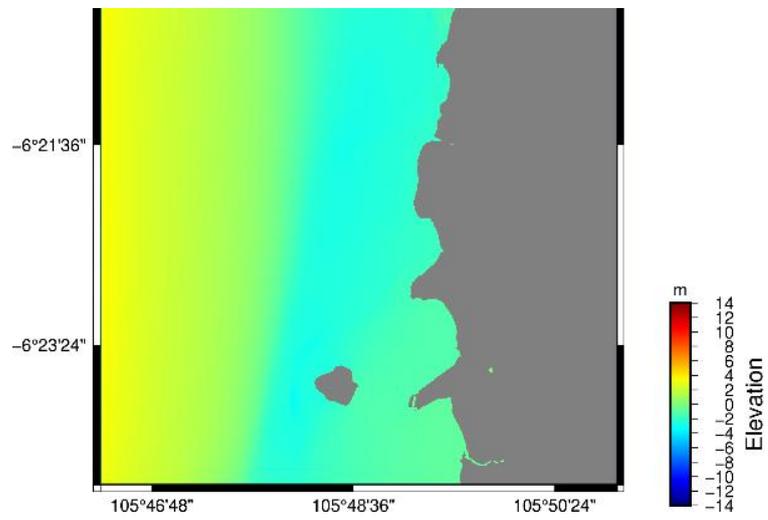


d. Menit ke-117

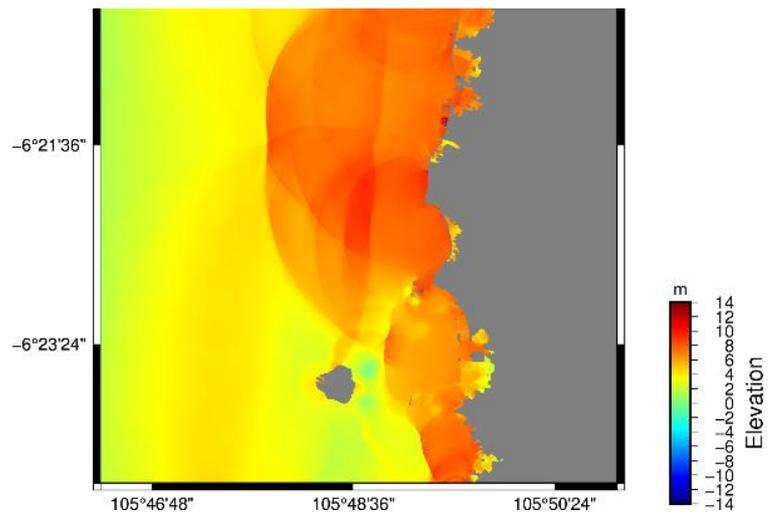


Lampiran 4 Penjalaran Gelombang Tsunami Skenario 2 Layer 5

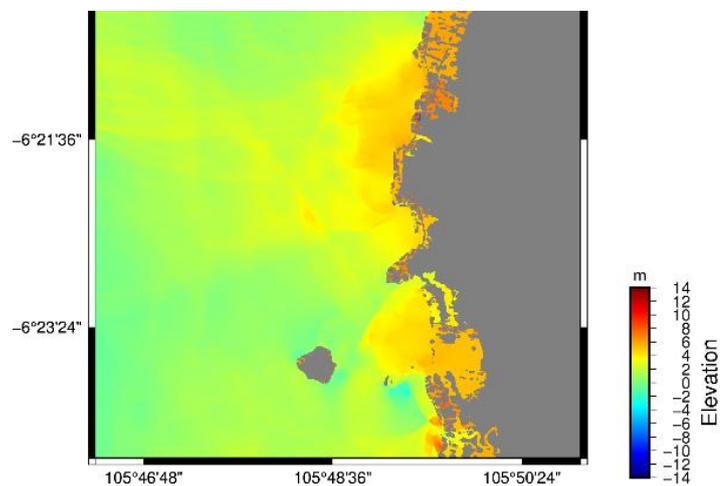
a. Menit ke-63



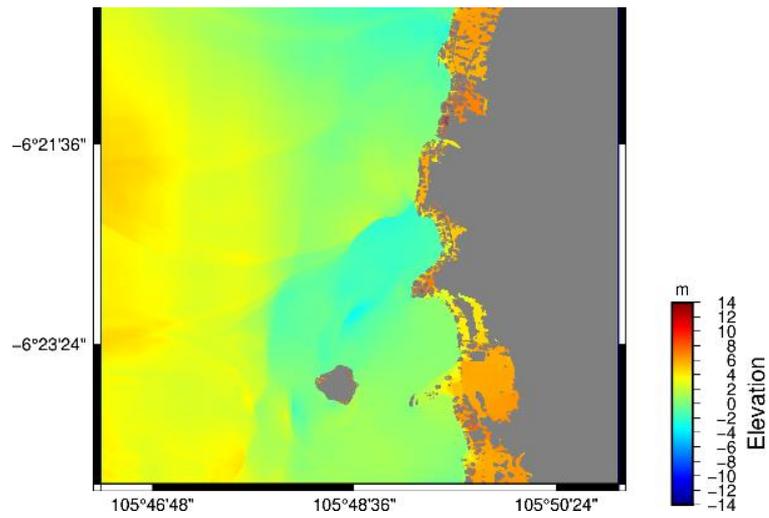
b. Menit ke-72



c. Menit ke-84

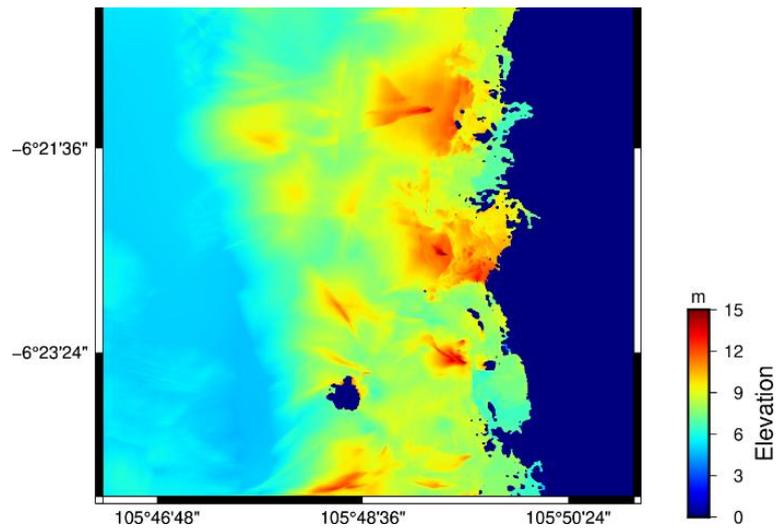


d. Menit ke-93

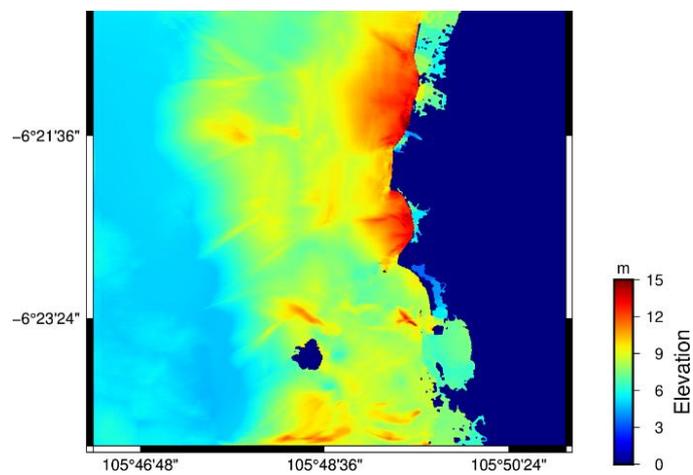


Lampiran 5 Ketinggian Maksimum

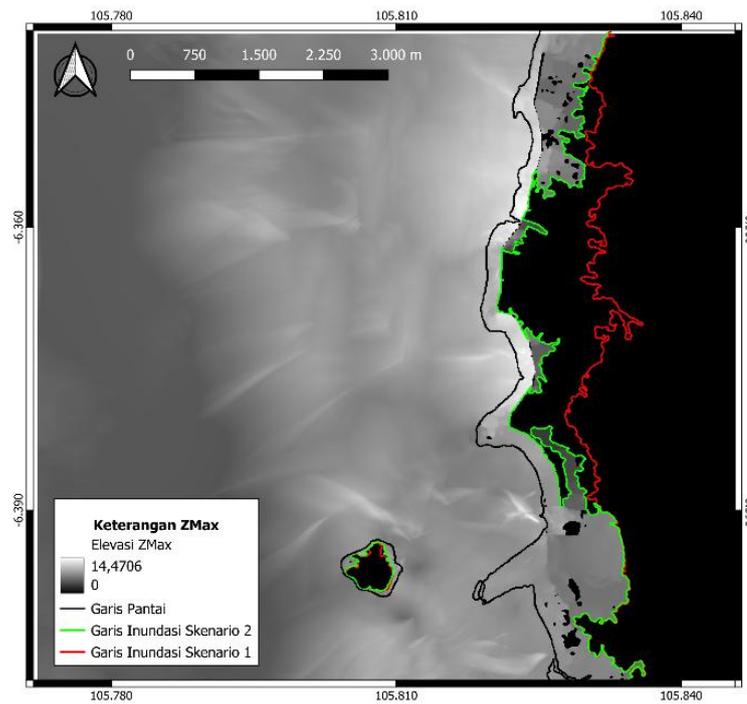
a. Skenario 1



b. Skenario 2

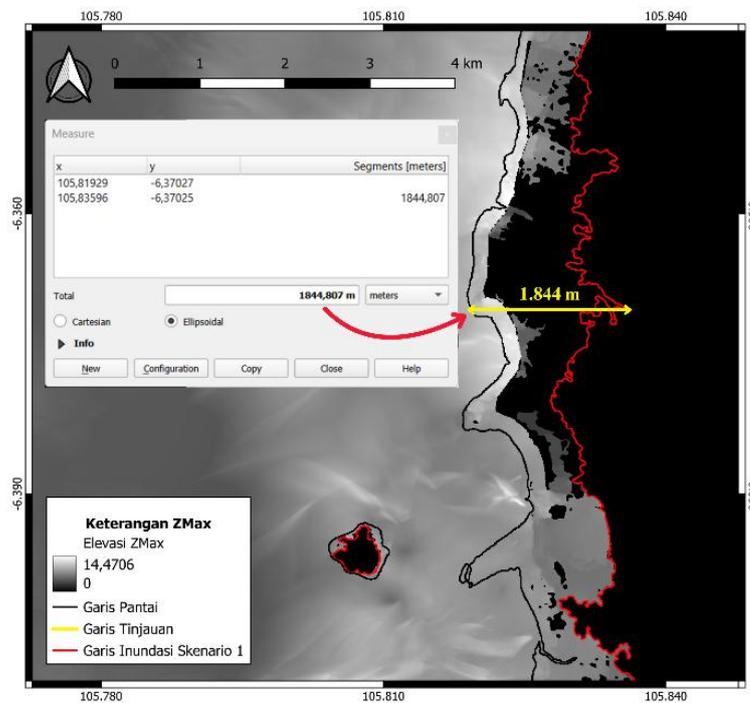


c. Perbandingan Ketinggian Maksimum antara Skenario 1 dan Skenario 2

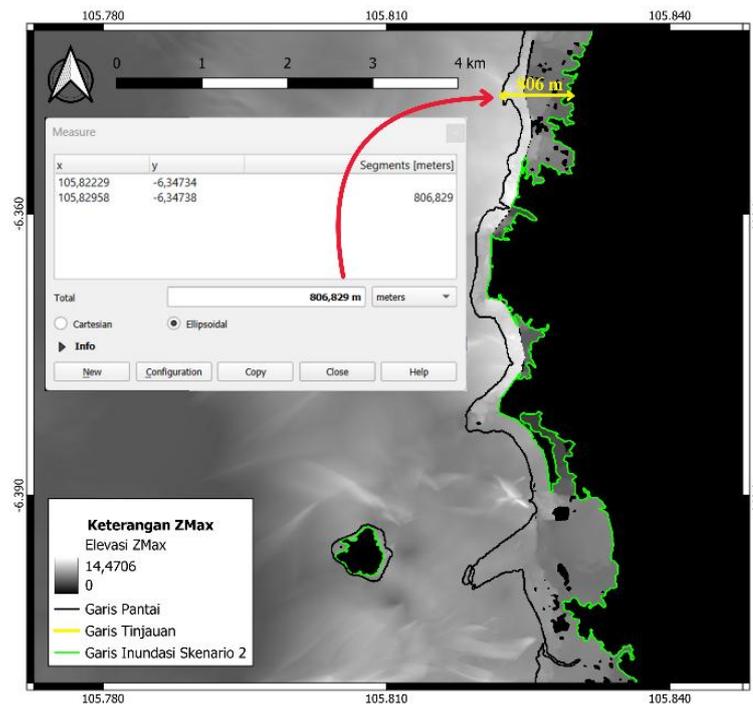


Lampiran 6 Jarak Inundasi

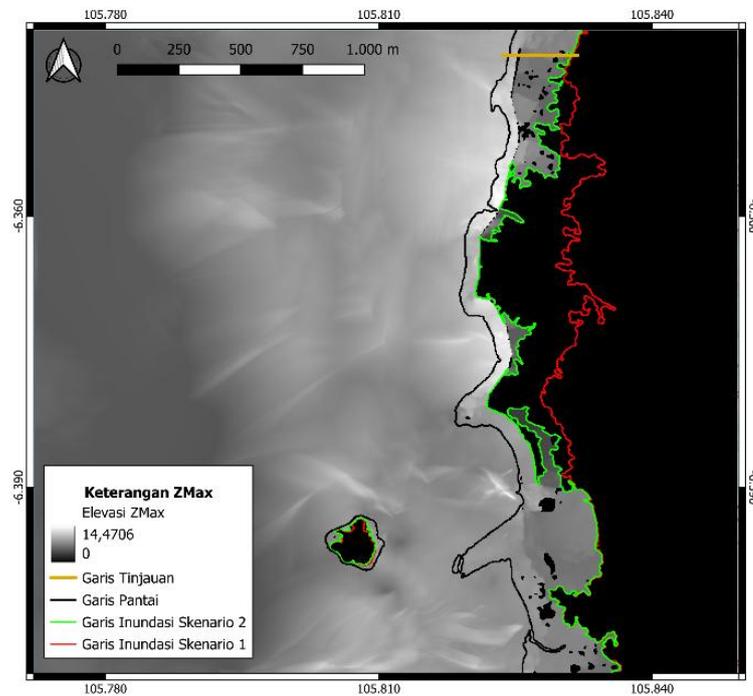
a. Skenario 1



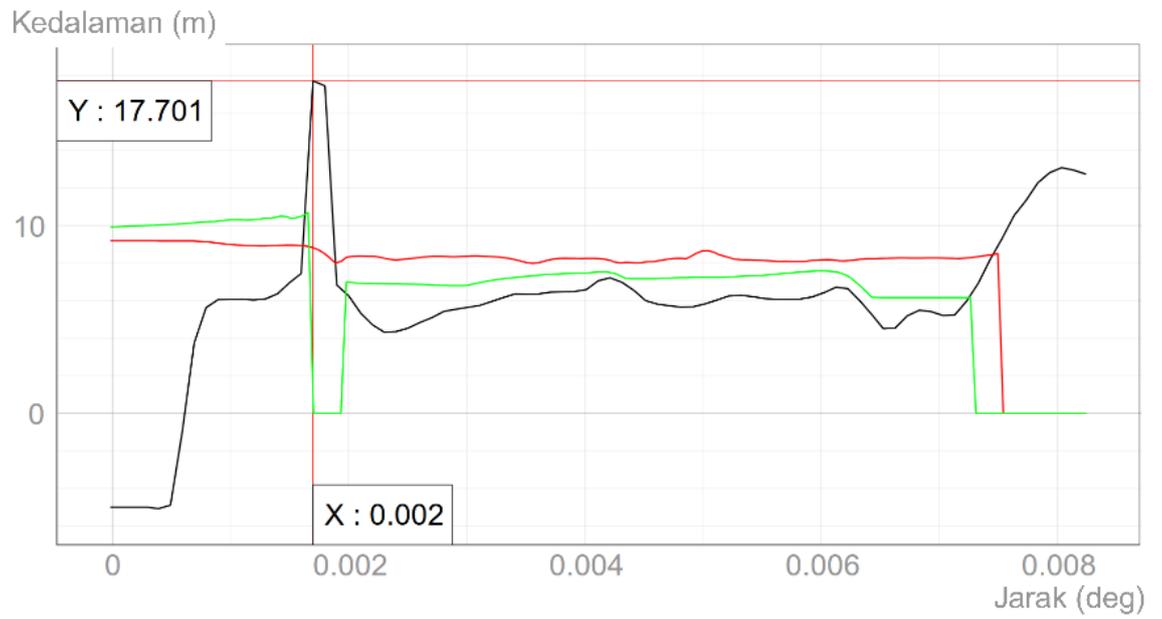
b. Skenario 2



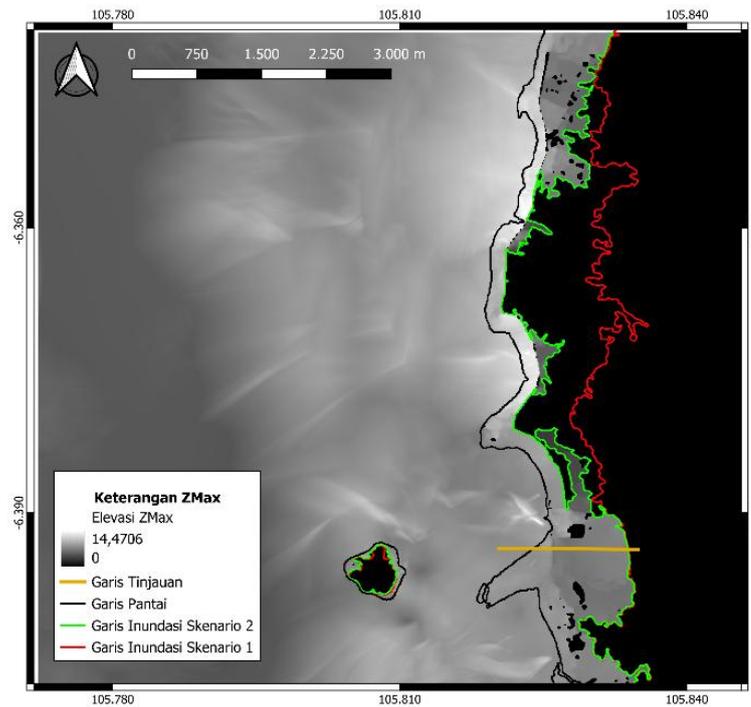
c. Tinjauan dari Jarak Inundasi Wilayah Utara Kecamatan Labuan antara Skenario 1 dan Skenario 2



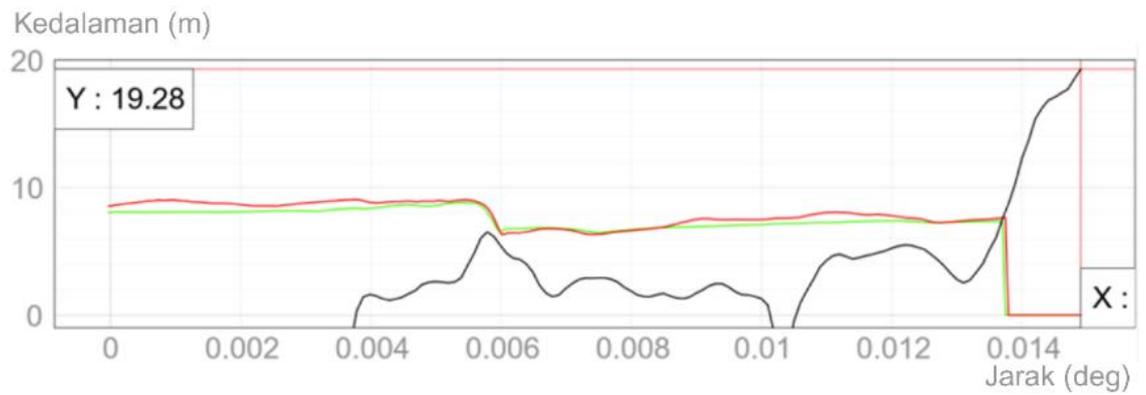
d. Grafik dari Jarak Inundasi Wilayah Utara Kecamatan Labuan antara Skenario 1 dan Skenario 2



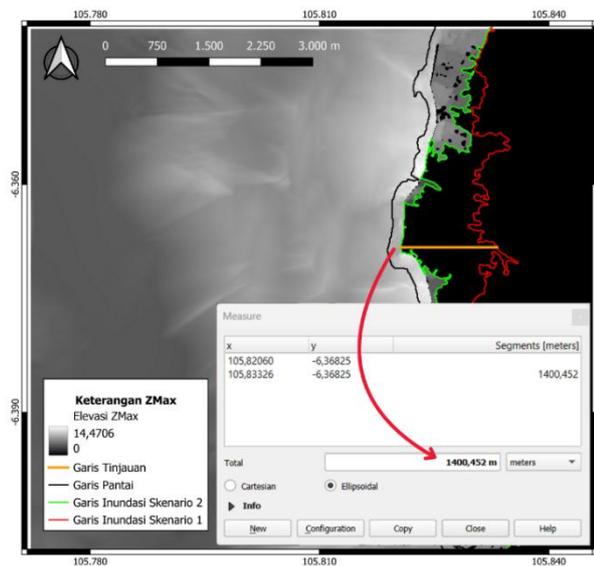
e. Tinjauan dari Jarak Inundasi Wilayah PLTU antara Skenario 1 dan Skenario 2



f. Grafik dari Jarak Inundasi Wilayah PLTU antara Skenario 1 dan Skenario 2



g. Tinjauan dari Jarak Inundasi Terjauh antara Skenario 1 dan Skenario 2



h. Grafik dari Jarak Inundasi Terjauh antara Skenario 1 dan Skenario 2

