

**PEMODELAN PENJALARAN GELOMBANG TSUNAMI
AKIBAT GEMPA SEBAGAI UPAYA MITIGASI BENCANA
DI WILAYAH PESISIR PANTAI JEMBER**

SKRIPSI

Diajukan untuk Memenuhi Sebagai Syarat
Guna Memperoleh Gelar Sarjana dalam Ilmu Fisika



SEPHIA FIRDAUS DILLA

1808026003

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI WALISONGO**

SEMARANG

2022

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertandatangan dibawah ini:

Nama : Sephia Firdaus Dilla

NIM : 1808026003

Jurusan : Fisika

Menyatakan bahwa skripsi yang berjudul:

**PEMODELAN PENJALARAN GELOMBANG TSUNAMI
AKIBAT GEMPA SEBAGAI UPAYA MITIGASI BENCANA DI
WILAYAH PESISIR PANTAI JEMBER**

Secara keseluruhan adalah hasil penelitian/ karya saya sendiri, kecuali bagian tertentu yang dirujuk sumbernya.

Semarang, 24/Agustus/2022

Pembuatan pernyataan



Sephia Firdaus Dilla
NIM: 1808026003

NOTA DINAS

Semarang, 24 Agustus 2022

Yth. Ketua Program Studi Fisika
Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Walisongo Semarang

Assalamu'alaikum wr.wb.

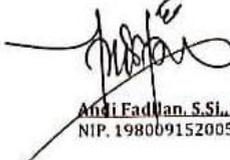
Dengan ini diberitahukan bahwa saya telah melakukan bimbingan, arahan, dan koreksi naskah skripsi dengan:

Judul : **Pemodelan Penjalaran Gelombang Tsunami Akibat Gempa
Sebagai Upaya Mitigasi Bencana Di Wilayah Pesisir Pantai
Jember**
Nama : **Sephia Firdaus Dilla**
NIM : **1808026003**
Jurusan : **Fisika**

Saya memandang bahwa naskah skripsi tersebut sudah dapat diajukan kepada Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo untuk diujikan dalam Sidang Munaqasyah.

Wassalamu'alaikum wr.wb.

Pembimbing I,



Andi Fadlan, S.Si., M.Sc.
NIP. 19800915200501106

NOTA DINAS

Semarang, 24 Agustus 2022

Yth. Ketua Program Studi Fisika
Fakultas Sains dan Teknologi
UIN Walisongo Semarang

Assalamu'alaikum wr.wb.

Dengan ini diberitahukan bahwa saya telah melakukan bimbingan, arahan, dan koreksi naskah skripsi dengan:

Judul : Pemodelan Penjalaran Gelombang Tsunami Akibat Gempa
Sebagai Upaya Mitigasi Bencana Di Wilayah Pesisir Pantai
Jember
Nama : Sephia Firdaus Dilla
NIM : 1808026003
Jurusan : Fisika

Saya memandang bahwa naskah skripsi tersebut sudah dapat diajukan kepada Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo untuk diujikan dalam Sidang Munaqasyah.

Wassalamu'alaikum wr.wb.

Pembimbing II,



Hartono, M.Sc.
NIP. 199009242019031006

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui ketinggian gelombang tsunami dan mitigasi bencana menggunakan data sekunder yaitu data GEBCO dan DEMNAS perangkat yang digunakan *software* COMCOT 1.7. Daerah penelitian ini meliputi Kabupaten Jember telah terjadinya tsunami pada tanggal 3 Juni 1994 dengan membahas magnitudo gempa 8,9 skala richter. Hasil pembahasan menunjukkan bahwa ketinggian maksimal gelombang 12 m dengan waktu tempuh 37,8 menit setelah terjadinya gempa. Ketinggian gelombang tsunami hasil pemodelan bervariasi. Ketinggian gelombang di Kecamatan Kencong mencapai 5,85 m, Kecamatan Wuluhan 6,20 m, Kecamatan Gumukmas 6,55 m, Kecamatan Puger 7,78 m, Kecamatan Tempurejo 7,73 m dan Kecamatan Ambulu 7,83 m. Pemodelan tsunami menghasilkan 4 peta dengan jumlah 14 titik kumpul di pesisir pantai Jember. Berdasarkan hasil analisis data dapat disimpulkan bahwa ketinggian gelombang tsunami tertinggi pada daerah Kecamatan Ambulu.

Kata Kunci: Tsunami, COMCOT, Mitigasi Bencana

KATA PENGANTAR

Segala Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT, yang melimpahkan rahmat, dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi dengan judul **“Pemodelan Penjalaran Gelombang Tsunami Akibat Gempa Sebagai Upaya Mitigasi Bencana Di Wilayah Pesisir Pantai Jember”**. Penulisan skripsi dilakukan guna memenuhi tugas dan persyaratan memperoleh gelar Sarjana Sains dalam Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Walisongo Semarang.

Penulis menyadari bahwa penulis skripsi ini tidak dapat terselesaikan tanpa bimbingan dan dukungan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Imam. Taufiq, M.Ag selaku Rektor Universitas Islam Negeri Walisongo Semarang.
2. Dr. H. Ismail, M.Ag selaku Dekan Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo Semarang.
3. Agus Sudarmanto, M.Si selaku Ketua Program Studi Fisika Fakultas Sains dan Teknologi UIN Walisongo Semarang.
4. Andi Fadllan, S.Si., M.Sc., selaku Dosen Pembimbing I yang senantiasa membimbing dalam proses penyusunan skripsi.

5. Hartono, M.Sc., selaku Dosen Pembimbing II yang senantiasa membimbing dalam proses penyusunan skripsi.
6. Muhammad Mahfud Muqoddas, S.Tr., selaku Pembimbing Lapangan di Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika Banjarnegara.
7. Segenap dosen dan staf Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Walisongo Semarang yang telah memberikan arahan dan bimbingan dalam proses penyusunan skripsi.
8. Alex Firdaus dan Jumirah (Almh), selaku orang tua penulis yang telah memberi dukungan dan doa sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
9. Kakak-kakakku Dessy Ari Lestari, Ervina Puspitasari, dan Alvian Ramdhani yang telah memberikan restu serta dukungan moril maupun materil serta yang tiada henti kepada penulis.
10. Sahabat-sahabatku serta teman seperjuangan Sasa, Siska, Bella dan Dilla yang selalu memberikan semangat, dukungan, bantuan, dan menjadi tempat keluh kesah penulis.
11. Teman-teman kos Berkah Samudra Bringin Meliya, Cino, Ripah, dan mba Hesti yang selalu memberikan semangat,

semangat, semangat serta dukungan, bantuan, dan tempat keluh kesah penulis.

12. Teman-teman Fisika 2018 yang telah bersedia menjadi teman diskusi serta saling memberikan semangat dan masukan dalam penyusunan skripsi.
13. Teman-teman GSC (Geophysics Study Club) dan IMF (Ikatan Mahasiswa Fisika) sebagai wadah bertukar informasi, wawasan juga pengalaman.

Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kata sempurna baik dari segi isi maupun metodologi. Oleh karena itu, kritik dan saran yang mendukung dari berbagai pihak sangat penulis harapkan. Penulis berharap penelitian ini dapat bermanfaat bagi pembaca dan semua pihak.

Semarang, 30 Juli 2022

Penulis

Sephia Firdaus Dilla

NIM. 1808026003

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	i
NOTA PEMBIMBING	ii
ABSTRAK	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
BAB I PENDAHULUAN	1
A. Latar belakang	1
B. Identifikasi Masalah	6
C. Batasan Masalah	6
D. Rumusan Masalah	6
E. Tujuan Penelitian	7
F. Manfaat Penelitian	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	8
A. Landasan Teori	8
1. Penyebab Terjadinya Tsunami	8
2. Aktivitas Lempeng Tektonik	12
3. Momen Seismik	13
4. Karakteristik Tsunami <i>Earthquake</i>	18
5. Simulasi Penjalaran Tsunami	18
6. Mitigasi Bencana	18

7. Software Comcot	33
B. Kajian Pustaka	34
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	37
A. Jenis Penelitian	37
B. Waktu dan Tempat Penelitian	37
C. Alat dan Bahan	37
D. Teknis Pengumpulan Data	38
E. Teknik Analisis Data	45
F. Diagram Alir Penelitian	45
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	46
A. Hasil	46
B. Pembahasan	64
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	67
C. Kesimpulan	67
D. B. Saran	67
DAFTAR PUSTAKA	69
LAMPIRAN	74

DAFTAR TABEL

Tabel	Keterangan	Halaman
Tabel 3.1	Perangkat Lunak Penelitian	38
Tabel 4.1	Titik ketinggian tsunami	59

DAFTAR GAMBAR

Gambar	Keterangan	Halaman
Gambar 1.1	Peta sebaran pusat gempa bumi dan tsunami di pulau Jawa yang berkekuatan > Mw 6.0 tahun 1990-2021	3
Gambar 1.2	Peta penduduk Jember (a) kecamatan puger, (b) dan (c) Kecamatan ambulu	4
Gambar 2.1	Hubungan antara kecepatan dan panjang gelombang terhadap kedalaman laut	10
Gambar 2.2	Ilustrasi istilah digunakan dalam pembahasan tsunami Jawa	11
Gambar 2.3	Pergerakan Lempeng Tektonik di wilayah Indonesia	12
Gambar 2.4	Parameter Sesar	16
Gambar 2.5	Bentuk Gerakan Sesar Dasar	18
Gambar 2.6	Staggered grid Comcot	24
Gambar 3.1	Tampilan awal GEBCO	39
Gambar 3.2	Tampilan batimetri pada global mapper	40
Gambar 3.3	Membuat grid/layer	40
Gambar 3.4	Mengexport file menjadi format *.asc.	41
Gambar 3.5	Kotak dialog Metadata	42
Gambar 3.6	Tampilan awal DEMNAS	42
Gambar 3.7	Download Data DEMNAS	43
Gambar 3.8	Data Topografi	43
Gambar 4.1	Data Batimetri	46
Gambar 4.2	Software COMCOT	47
Gambar 4.3	Program Comcot.exe	47
Gambar 4.4	Tampilan awal Octave	48

Gambar 4.5	Pengaplikasian Aplikasi Octave (a) Hasil plot init (b) Hasil plot maksimal	49
Gambar 4.6	Pemotongan grid	50
Gambar 4.7	Program plot snapshot	50
Gambar 4.8	Waktu tempuh penjalaran gelombang	52
Gambar 4.9	Snapshot layer 1	54
Gambar 4.10	Snapshot layer 4	55
Gambar 4.11	Nilai maximum tsunami amplitude wilayah jember	56
Gambar 4.12	Ketinggian air Kecamatan Kencong h 1	57
Gambar 4.13	Ketinggian air Kecamatan Gumukmas h 2	57
Gambar 4.14	Ketinggian air Kecamatan Puger h 3	58
Gambar 4.15	Ketinggian air Kecamatan Wuluhan h 4	58
Gambar 4.16	Ketinggian air Kecamatan Ambulu h 5	59
Gambar 4.17	Ketinggian air Kecamatan Tempurejo h 6	59
Gambar 4.18	Peta Rencana jalur Evakuasi Kecamatan Kencong	60
Gambar 4.19	Peta Rencana jalur Evakuasi Kecamatan Gumukmas	61
Gambar 4.20	Peta Rencana jalur Evakuasi Kecamatan Puger	62
Gambar 4.21	Peta Rencana jalur Evakuasi Kecamatan Ambulu	63
Gambar 4.22	Deformasi ketinggian pusat gempabumi	66

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran	Keterangan	Halaman
Lampiran 1	Lokasi penelitian	74
Lampiran 2	Peta topografi Kabupaten Jember	75
Lampiran 3	Titik kumpul evakuasi	76
Lampiran 4	Simulasi penjalaran grid/layer 2	79
Lampiran 5	Simulasi penjalaran grid/layer 3	80
Lampiran 6	Deformasi vertikal	82
Lampiran 7	Penurunan persamaan penggerak tsunami	86

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar belakang

Tsunami merupakan bencana alam yang bersifat destruktif dan menimbulkan banyak kerugian bagi masyarakat. Salah satunya adalah tsunami Pangandaran 17 Juli 2006 yang menewaskan 664 orang, melukai 498 orang, dan merusak 1.623 rumah dengan kekuatan gempa bumi 7,7 Skala Richter (Laksono dkk, 2022). Tidak hanya di Jawa tempat terjadinya tsunami, tetapi juga terjadi tsunami di Flores pada 12 Desember 1992, kerusakan harta benda hingga miliaran rupiah yang menewaskan sekitar 2.100 orang. (Wanda, 2018).

Tsunami disebabkan oleh gempa bumi di dasar laut. Gempa bumi dapat terjadi dari berbagai sumber, salah satunya patahan batuan/sesar (Baskara, 2017). Gempa yang dapat menimbulkan tsunami memiliki karakteristik dan kondisi yaitu, besarnya gempa lebih besar dari 6,5 skala richter dan parameter kedalaman gempa kurang dari 100 km di atas permukaan laut (Alfaris, 2020). Al-Quran menjelaskan bahwa bencana tsunami adalah gelombang ombak yang menghantam dan menerjang

daratan. Hal ini dibuktikan dengan firman Allah yang berbunyi:

وَإِذَا الْبِحَارُ فُجِّرَتْ

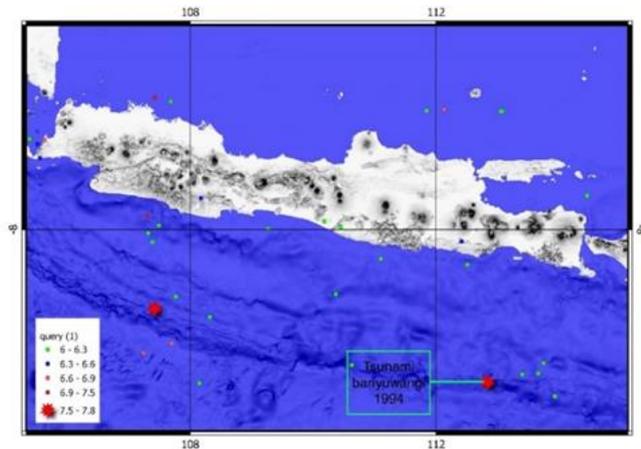
Artinya:

“Dan apabila lautan dijadikan meluap” (Q.S Al-Infithar 3).

laut meluap sebagian atas lainnya, lalu memenuhi permukaan bumi. Dan lautan yang ada di perkiakan tiga perempat dari permukaan bumi yang ada sekarang atau bahkan banyak (syaikh Amin bin Abdullah Asy-Syaqawi).

Indonesia terletak di wilayah aktif seismik dimana tsunami sering terjadi. Salah satu daerah rawan tsunami di Indonesia adalah pesisir selatan Jawa, seperti pesisir Jember, Jawa Timur. Pantai selatan Jawa tergolong kelompok rawan tsunami karena adanya pergerakan kerak bumi. Secara geologis, daerah tersebut berada pada pertemuan zona subduksi atau dua lempeng besar yang dapat bertabrakan (lempeng Eurasia dan lempeng Indo-Australia). Pergerakan lempeng di daerah ini sering menimbulkan gempa bumi yang dapat menimbulkan tsunami. (Faiqoh, 2013). Terdapat dua gempa yang menimbulkan tsunami berlangsung di kedalaman kurang dari 20 km. Parameter sumber primer nyaris indentik, yaitu dengan strike $\sim 278^\circ$ - 297° , dip $\sim 10^\circ$, dan slip $\sim 90^\circ$

(Kongko dan Schlurmann, 2010). Sumber titik gempa dapat dilihat seperti Gambar 1.1.



Gambar 1.1 Peta sebaran gempa bumi dan tsunami di pulau Jawa yang berkekuatan >6.0 Skala Richter tahun 1990-2021 (sumber: USGS)

Tanggal 3 Juni 1994 Tsunami berkekuatan 7,8 SR di pantai selatan Jawa Timur. Kejadian tersebut, menewaskan 250 orang, melukai 423 orang, merusak 1.500 rumah dan menenggelamkan atau merusak 278 kapal (Triyono dkk, 2019). Pusat gempa berada pada koordinat 10.477°LS dan 112.835°BT atau sekitar 249 km dari sebelah selatan Malang - Banyuwangi dengan kedalaman 18,4 km sehingga dapat diklasifikasikan sebagai gempa dangkal (Setiyono, 2019).

Kabupaten Jember memiliki ketinggian dataran yang bervariasi, namun sebagian besar wilayah selatan

Kabupaten Jember merupakan dataran rendah. Ada enam kecamatan yang berada di pesisir pantai Jember yang memiliki wisata bahari. Jika tsunami besar terjadi, maka akan berdampak besar bagi penduduk pesisir Jember. Tempat Pelelangan Ikan (TPI) merupakan salah satu tempat di kawasan Puger bagi wisatawan yang berkunjung ke Pantai Puger. Wilayah Pantai Jember dapat dilihat pada Gambar 1.2.



(a)

(b)



(c)

Gambar 1.2 Peta penduduk Jember. (a), (b) kecamatan puger dan (c) Kecamatan ambulu (sumber: google earth diakses tanggal 15 juni 2022)

Analisis bahaya tsunami di kabupaten Jember tepatnya di bagian pesisir perlu dilakukan sebagai mitigasi bencana sehingga dapat mengurangi korban jiwa.

Berdasarkan gempa bersejarah 3 Juni 1994, perambatan tsunami dapat dimodelkan dengan menjalankan skenario gempa yang lebih besar dari 8 skala Richter. Analisis tersebut dengan pemodelan tsunami dapat diharapkan dapat memodelkan tsunami sesuai dengan kondisi sekarang sehingga menghasilkan penyebaran gelombang tsunami dari sumber tsunami ke beberapa pantai selatan Jember. Software pemodelan tsunami telah banyak dibuat untuk memudahkan penelitian, software yang sering digunakan dalam penelitian tsunami yaitu software TUNAMI dan software COMCOT. Software TUNAMI (Tohoku University's Numerical Analysis Model for Investigation of Nearfield tsunami) fokus memodelkan tsunami yang dibangkitkan oleh deformasi bawah laut (Imamura, 2006). Software COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami) dapat memodelkan tsunami yang dibangkitkan oleh deformasi dasar laut dan longsoran bawah laut berdasarkan Persamaan Air Dangkal yang menerapkan skema *leap-frog* dengan sistem *multi-grid* hingga 12 sub level grid (Wang, 2011). Penelitian ini menggunakan software COMCOT karena sistem multi grid memungkinkan penggunaan banyak area simulasi untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi pemodelan. COMCOT merupakan generasi terbaru dengan antarmuka yang lebih

efisien, format data, dan pencocokan grid yang mudah dan dilakukan otomatis oleh COMCOT.

B. Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan di atas, maka dapat diidentifikasi bahwa masih jarangya penelitian tersebut terhadap tsunami dengan menggunakan pemodelan tsunami dan minimnya hasil riset jalur evakuasi terhadap tsunami di Kabupaten Jember.

C. Pembatasan Masalah

Sesuai dengan latar belakang dan identifikasi masalah, dalam penelitian ini dibatasi pemodelan tsunami berdasarkan sejarah gempa banyuwangi yang terjadi pada 03 Juni 1994 dengan magnitudo 8,9 SR berdasarkan Pusat penelitian Gempa Nasional (PusGen).

D. Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang di atas, maka bisa dirumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pemodelan penjalaran gelombang Tsunami *ocean modeling* akibat gempa tektonik pantai Jember tanggal 3 Juni 1994?

2. Berapa ketinggian gelombang tsunami di pesisir pantai Jember, berdasarkan pemodelan COMCOT?
3. Bagaimana jalur evakuasi upaya mitigasi bencana tsunami di pesisir pantai Jember?

E. Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini adalah:

1. Menemukan pemodelan penjalaran gelombang Tsunami *ocean modeling* akibat gempa tektonik pantai Jember tanggal 3 Juni 1994.
2. Mengetahui ketinggian gelombang tsunami di pesisir pantai Jember, berdasarkan pemodelan COMCOT.
3. Menentukan jalur evakuasi upaya mitigasi bencana tsunami di pesisir pantai Jember.

F. Manfaat Penelitian

Manfaat penelitian ini adalah memberikan informasi mengenai daerah yang terkena dampak tsunami yang mungkin terjadi, sehingga dapat digunakan sebagai acuan bagi masyarakat dan pemerintah untuk memitigasi bencana tsunami di masa mendatang yang terjadi di Kabupaten Jember.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

A. Landasan Teori

1. Penyebab Terjadinya Tsunami

Kata "tsunami" kata dalam bahasa Jepang yang dieja dalam dua kata, *tsu* yang melambangkan pelabuhan, dan *nami* yang melambangkan gelombang. Dapat diartikan sebagai "gelombang besar di pelabuhan" (sulistiawati, 2020). Tsunami didefinisikan rangkaian gelombang laut dengan periode panjang yang ditimbulkan adanya gerakan di dasar laut. Ada beberapa hal penyebab terjadinya tsunami, gempa bumi diikuti dengan dislokasi/perpindahan massa, tanah longsor di dalam laut, letusan gunung api di bawah laut atau gunung api pulau (Sutrisnawati, 2018). Aktivitas alam semacam ini adalah penyebab tsunami, yang mendorong massa air dalam jumlah besar. Berdasarkan persentase terjadinya tsunami yang umumnya disebabkan oleh gempa bumi menimbulkan tsunami dengan episentrum di laut dan merupakan gempa dangkal.

Ketinggian tsunami dihasilkan dari energi kinetik gelombang menjadi gelombang potensial. Dengan kata lain, energi yang hilang akibat perlambatan

ditransmisikan dalam bentuk kenaikan tinggi gelombang awal. Kecepatan tsunami yang sampai ke daratan di dapat 25-100 km/jam. Gelombang tsunami memiliki 100 - 2.000 detik (1,6 - 33 menit), dapat disebut jendela tsunami. Gelombang tsunami merambat dengan kecepatan 600-900 km/jam dibagian laut dalam, 100-300 km/jam di paparan benua, dan 36 km/jam di bagian pesisir (Sari, 2014).

Kecepatan tsunami tergantung pada kedalaman laut. Semakin dangkal laut, semakin lambat kecepatan tsunami. Gelombang progresif dengan nilai panjang gelombang yang jauh lebih tinggi dari nilai kedalaman air disebut gelombang dangkal atau gelombang panjang. Kecepatan rambat tsunami tergantung pada kedalaman dasar laut seperti persamaan (2.1) (Pandey, 2015).

$$c = \sqrt{gh} \text{ dan } \lambda = T \times c \quad (2.1)$$

Keterangan :

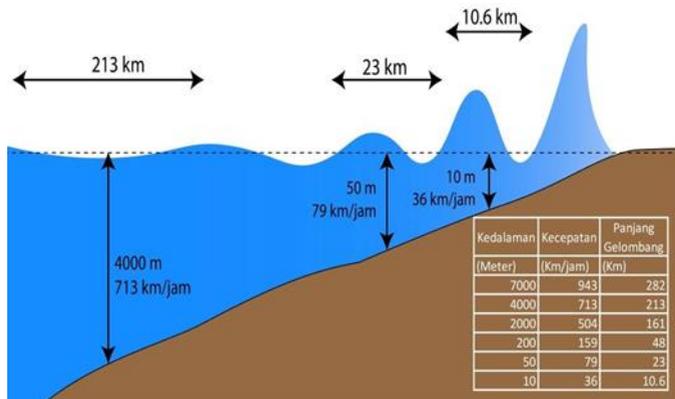
c : Kecepatan gelombang tsunami (m/s)

g : Percepatan gravitasi bumi (9,81 m/s²)

h : Kedalaman laut (m)

λ : panjang gelombang (m)

T : periode gelombang (detik)



Gambar 2.1. Hubungan antara kecepatan dan panjang gelombang terhadap kedalaman laut
(Sumber: Diposaptono dan Budiman, 2006)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa semakin besar kedalaman laut maka semakin besar kecepatan gelombang. Ketinggian gelombang sangat dipengaruhi oleh panjang gelombang. Tsunami memiliki panjang gelombang ribuan km/jam, seperti gelombang air dangkal. Suatu gelombang menjadi gelombang air dangkal atau *shallow water wave* Ketika perbandingan kedalaman air dengan panjang gelombangnya kecil dari 0,05 (Sugito,2008). Ketika gelombang tsunami menuju pantai, tsunami mengalami transformasi gelombang dengan menurunnya kecepatan penjalaran dan terjadi pengurangan panjang gelombang, sehingga tinggi gelombang menjadi lebih besar (Mahfud, 2018).

Untuk lebih jelasnya penjalaran tsunami dapat dilihat pada Gambar 2.1.



Gambar 2.2. ilustrasi istilah digunakan dalam pembahasan tsunami (BMKG, 2014)

Gelombang tsunami yang mendekati garis pantai kemudian akan masuk ke dalam daratan seperti Gambar 2.2 terdapat ilustrasi istilah yang digunakan dalam pembahasan tsunami sebagai berikut (muqqodas, 2018).

- a. *Run-up height* atau tinggi run-up adalah ketinggian tsunami pada titik inundasi maksimum ke daratan.
- b. Tinggi tsunami merupakan ketinggian tsunami di atas daratan dihitung dari referensi muka air laut.
- c. *Flow Depth* Kedalaman aliran adalah ketinggian tsunami yang berada di atas daratan, dihitung dari ketinggian topografi.

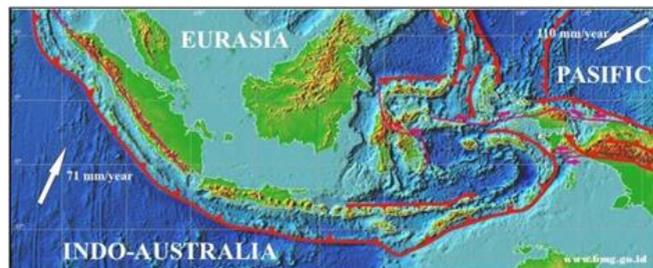
- d. Referensi muka air laut atau *Mean Sea Level* (MSL) adalah rata-rata nilai tinggi muka air laut dalam jangka waktu yang lama.
- e. *Inundasi* merupakan jarak maksimal tsunami secara horizontal sampai kedataran akibat penjalaran tsunami, ditarik dari garis pantai.

2. Aktivitas Lempeng Tektonik

Secara geografis Indonesia terletak di garis khatulistiwa antara 95° – 140° BT dan 6° LU – 11° LS. Secara tektonik Indonesia menempati tiga pertemuan lempeng besar kerak bumi yang masih aktif. Bergerak saling mendekat satu sama lain ke tiga lempeng tersebut yakni Lempeng Indo-Australia berada di selatan, lempeng Eurasia berada di utara, Lempeng Samudera Pasifik berada di timur (Haifani, 2013). Gambar 2.3 menunjukkan arah pergerakan di sekitar wilayah Indonesia. Pergerakan Lempeng Indo-Australia beraksi relatif ke utara serta bertumbukan dengan Lempeng Eurasia, Lempeng Pasifik beraksi ke barat sedangkan Lempeng Eurasia relatif diam.

Pulau Jawa merupakan bagian dari busur kepulauan sunda, yang terletak dari kepulauan Andaman dan Nikobar di bagian barat hingga mencapai pulau sumba (Setyowidodo, 2015). Busur Sunda merupakan hasil

dari interaksi lempeng samudra, yakni penunjaman lempeng Indo-Australia di bawah lempeng Benua Eurasia sepanjang Palung Sunda. Kecepatan penunjaman lempeng Indo-Australia yang bergerak ke utara di Pulau Jawa diperkirakan 7 cm/ tahun (Jannah, 2016). Zona subduksi sunda juga dikenal sebagai zona tektonik aktif yang mengontrol Sebagian besar aktivitas kegempaan di Pulau Jawa.



Gambar 2.3. Pergerakan lempeng tektonik di wilayah Indonesia (sumber: BMKG, diakses 28 Desember 2021 pukul 15:51 di :

http://inatews2.bmkg.go.id/new/tentang_eq.php)

3. Momen Seismik

Deformasi dasar laut yang dapat menyebabkan tsunami adalah deformasi arah vertikal (sesar naik atau turun). Pergerakan vertical dasar Samudra naik atau turun dengan cepat menjadi respon dari gempa bumi. Gempa harus memiliki momen seismik yang besar dan memiliki letak hiposentrum dangkal sebagai syarat untuk mendapatkan deformasi di dasar laut.

Momen seismik digunakan untuk menghitung jumlah energi yang dilepaskan oleh gempa dengan memperhitungkan perpindahan yang terjadi dalam slip di sepanjang patahan (Hadi, 2019). Persamaan umum untuk konversi momen seismik menjadi magnitudo adalah persamaan Well dan Coppersmith (1994) sebagaimana dinyatakan dalam (2.2) :

$$M_o = \mu DA \quad (2.2)$$

Keterangan:

M_o : Momen Seismik gempa (Nm)

μ : Modulus geser (3×10^{11} dyne/cm²)

D : Dislokasi (m²)

A : luas permukaan sesar (m²)

Adapun hubungan antara magnitudo gempa dengan momen seismik seperti persamaan (2.3) (Wells and Coppersmith, 1994).

$$M_w = \frac{2}{3} \log M_o - 10,7 \quad (2.3)$$

Keterangan:

M_w : momen magnitudo (Skala Magnitude)

M_o : Momen Seismik (Nm)

Persamaan tersebut menunjukkan bidang datar pada ellipoida, menggunakan Teknik proyeksi stereographic (wang, 2009). Dalam realita deformasi bawah laut terjadi pada permukaan bumi (ellipsoida).

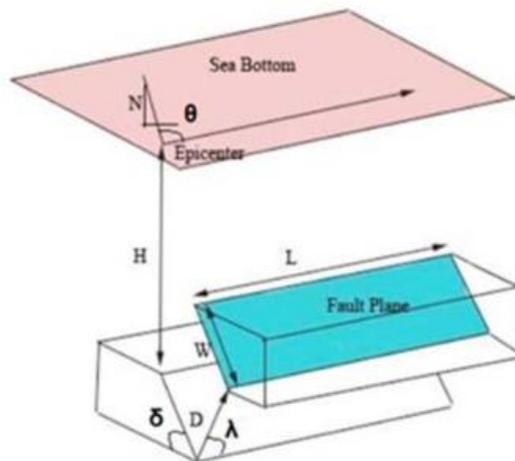
Proyeksi stereographic ini diterapkan dalam comcot, pada peta permukaan ellipsoidal bumi digunakan episceter sebagai titik bidang datar bumi dengan metode proyeksi ini di setiap lokasi pada permukaan bumi berkaitan dengan suatu bidang (x,y) . Pergeseran bumi dapat di evaluasi dalam teori bidang patahan elastis (Mahinsa and Smylie, 1971).

Momen sismik menghitung besarnya energi yang dilepaskan oleh gempa dengan memperhitungkan perpindahan yang terjadi di dalam slip di sepanjang sesar dan luas permukaan sesar yang mengalami slip. Magnitudo gempa tidak cocok untuk digunakan dalam gempa yang memiliki skala kecil, karena perpindahan dalam slipnya relatif lebih kecil atau bahkan kurang signifikan (ummi, 2020).

Sesar atau patahan diasumsikan dengan dua permukaan yang bergerak relative Ketika terjadi gempa bumi seperti dalam gambar 2.4. Arah bidang sesar ditentukan oleh parameter bidang sesar seperti *strike*, *dip*, dan *rake* (Nandasari, 2020).

- a. *Strike* (θ) adalah sudut yang dibentuk oleh arah sesar relatif terhadap arah utara (dihitung searah jarum jam), diukur dari arah utara ke arah timur.

- b. *Dip* (δ) adalah sudut dibentuk oleh bidang sesar dengan bidang horizontal, dan diukur pada bidang vertikal yang arahnya tegak lurus jurus patahan, besarnya 0° hingga 90° .
- c. *Rake* atau *slip* (λ) adalah sudut pergerakan *hanging wall* terhadap *strike* (-180° hingga $+180^\circ$). *Rake* bernilai positif untuk sesar naik dan bernilai negatif untuk sesar turun.



Gambar 2.4. Parameter sesar (Suntoko, 2019)

Well dan Coppersmith (1994) memberikan hubungan empiris antara moment magnitude, Panjang, luas, dislokasi dan lebar bidang patahan menggunakan parameter gempa bumi historis secara global. Persamaan yang berhubungan dengan sesar keatas dan

digunakan dalam penelitian ini dapat ditentukan dengan melakukan perhitungan berdasarkan persamaan *papazachos, et al* (2004), sebagai berikut (kurniawan, 2019):

Panjang patahan di permukaan bumi

$$\log L = -2,42 + (0,58 \times Mw) \quad (2.4)$$

Lebar patahan di permukaan bumi

$$\log W = -1,61 + (0,41 \times Mw) \quad (2.5)$$

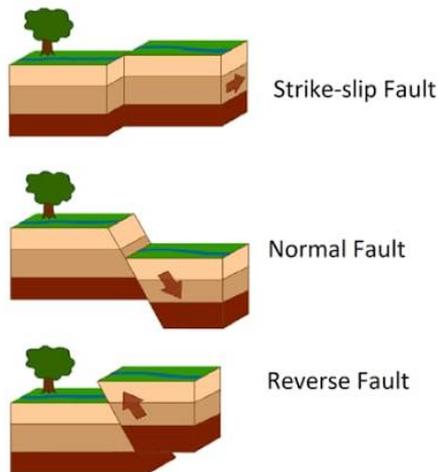
Maximum Displacement/Slip (MD)

$$\log MD = -1,38 + (1,02 \times \log L) \quad (2.6)$$

sesar adalah suatu rekahan pada batuan yang telah mengalami pergeseran sehingga terjadi perpindahan antara bagian yang berhadapan, dengan arah yang sejajar dengan bidang patahan (Jayadi, 2016). Pergeseran terjadi karena adanya gaya tektonik yang bekerja di dalam bumi. Secara umum sesar yang dinyatakan dalam proyeksi stereografik ada tiga macam bentuk sesar yaitu, sesar naik, sesar turun, dan sesar mendatar dapat dilihat pada gambar 2.5 sebagai berikut (Adha, 2018):

- a. Sesar naik (*Thrust fault*) Gerakan relatif ke atas terhadap blok dasar, dengan sudut kemiringan bidang sesar kurang dari 30°.

- b. Sesar turun (*normal fault*) Gerakan relatif turun terhadap blok dasar, dengan sudut kemiringan bidang sesar antara 30° hingga 90°
- c. Sesar mendatar (*strike slip fault*) yaitu sesar sesar yang pergerakannya sejajar terhadap arah jurus bidangnya.



Gambar 2.5. Bentuk gerakan sesar dasar
(Rahmawati, 2017)

4. Karakteristik Tsunami *Earthquake*

Gempa bumi dangkal yang terjadi pada zona *subduksi* dapat menimbulkan tsunami. Gempabumi yang membangkitkan tsunami berdasarkan lokasi pusat gempa bumi *hiposenter* yaitu *interpolate*, *outer*, *rise* dan *tsunami earthquake* (muqqodas, 2018). Gempa

bumi yang dapat menimbulkan tsunami disebut dengan *Tsunamigenic earthquake*, sedangkan gempa bumi yang menimbulkan tsunami yang lebih besar pada perkiraan energi gelombang seismiknya disebut *tsunami earthquake*. *Tsunami earthquake* memiliki magnitudo permukaan M_s yang lebih kecil dari pada magnitudo moment M_w .

Karakteristik dari *tsunami earthquake* di Indonesia (Pribadi, 2013)

- a. Sesar naik *thrust*
 - b. Energi seismic dan moment seismik yang sangat rendah
 - c. Durasi *rupture* yang lama
 - d. Magnitude yang sedang tapi menghasilkan gelombang tsunami yang tinggi
 - e. Memiliki kedalaman yang dangkal
5. Simulasi Penjalaran Tsunami

Model numerik berdasarkan persamaan air dangkal jauh lebih efisien dalam mensimulasikan tsunami lintas samudera karena skema numerik eksplisit yang umum digunakan dan tanpa perlu dipecahkan turunan orde tinggi yang terkait dengan nonlinier dan dispersi frekuensi (Wang, 2011).

Persamaan air dangkal diimplementasikan dengan koordinat Spherical dan Cartesian dalam Comcot untuk mensimulasikan proses penjalaran dan run-up tsunami. Dalam khusus cekungan di laut dalam, amplitudo gelombang tsunami jauh lebih kecil dari pada kedalaman air. Persamaan air dangkal linear dalam koordinat spherical digunakan untuk memodelkan evolusi tsunami sebagai berikut (Wang, 2011).

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (\cos \varphi Q) \right\} = -\frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{gh}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ = 0 \quad (2.8)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{gh}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} + fP = 0 \quad (2.9)$$

Dimana η elevasi permukaan air (m); (P, Q) menunjukkan komponen fluks volume dalam arah (x, y) ; (ψ, φ) merupakan latitude dan longitude; R jari-jari bumi; g percepatan gravitasi dan h kedalaman airnya. Syarat suku $-\frac{\partial h}{\partial t}$ yang mencerminkan efek dari variasi batimetri, suku tersebut dapat digunakan untuk memodelkan tsunami yang dibangkitkan oleh gerakan dasar laut seperti transien, tanah longsor bawah laut. f menyatakan koefisien gaya akibat rotasi bumi.

Ketika simulasi yang melibatkan wilayah yang relatif kecil efek rotasi tidak menonjol, persamaan air

dangkal dalam koordinat *Cartesian* dapat digunakan untuk memodelkan evolusi tsunami. Persamaan air dangkal linear dalam koordinat *Cartesian* juga mengimplementasikan dalam Comcot sebagai berikut.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \right\} = - \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.10)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial x} - fQ = 0 \quad (2.11)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gh \frac{\partial \eta}{\partial y} + fP = 0 \quad (2.12)$$

(P, Q) menunjukkan komponen fluks volume dalam arah (x, y) merupakan dari kecepatan dan kedalaman air $P = hu$ dan $Q = hv$.

Diketahui bahwa panjang gelombang menjadi lebih pendek dan amplitudanya menjadi lebih besar karena kedangkalan air saat tsunami merambat ke landas kontinen mendekati daerah pantai. Fenomena tersebut merupakan efek sholing. Akibatnya persamaan air dangkal linear secara bertahap menjadi tidak valid dan efek nonlinear akan mendominasi. Oleh karena itu, gaya inersia konvektif nonlinear dan gesekan bawah menjadi penting, sedangkan gaya Coriolis dan dispersi frekuensi berkurang. Persamaan air dangkal nonlinear termasuk efek gesekan dasar yang digunakan untuk menggambarkan gerakan gelombang di zona pantai. Dalam comcot, persamaan air dangkal nonlinear

mengimplementasikan dalam koordinat *Spherical* sebagai berikut.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \left\{ \frac{\partial P}{\partial \psi} + \frac{\partial}{\partial \varphi} (\cos \varphi Q) \right\} = - \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{P^2}{H} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{PQ}{H} \right) + \frac{gH}{R \cos \varphi} \frac{\partial \eta}{\partial \psi} - fQ + F_x = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{R \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \psi} \left(\frac{PQ^2}{H} \right) + \frac{1}{R} \frac{\partial}{\partial \varphi} \left(\frac{Q^2}{H} \right) + \frac{gH}{R} \frac{\partial \eta}{\partial \varphi} - fP + F_y = 0 \quad (2.15)$$

Dan persamaan dalam *Cartesian Coordinates* sebagai berikut:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \left\{ \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial Q}{\partial y} \right\} = - \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial P}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{P^2}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{PQ}{H} \right) + gH \frac{\partial \eta}{\partial x} + F_x = 0 \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{PQ}{H} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{Q^2}{H} \right) + gH \frac{\partial \eta}{\partial y} + F_y = 0 \quad (2.18)$$

Dimana H adalah total kedalaman air dan $H = \eta + h$; F_x dan F_y , mewakili gesekan bawah dalam arah (x,y), dan kedua sisi ini dievaluasi melalui rumus Manning. Dimana η koefisien kekerasan manning.

$$F_x = \frac{gn^2}{H^{8/3}} P(P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (2.19)$$

$$F_y = \frac{gn^2}{H^{8/3}} P(P^2 + Q^2)^{1/2} \quad (2.20)$$

Penyelesaian persamaan air dangkal dalam koordinat *spherical and cartesian* menggunakan skema

beda hingga *staggered leap-frog* (Cho, 1995). Elevasi muka air laut η dan fluks volume (P, Q) dalam ruang dan waktu. Gambar 2.6 menunjukkan system perpindahan permukaan air η dievaluasi di pusat sel grid dan volume komponen fluks P dan Q , dievaluasi di pusat tepi sel grid. Dalam *spherical coordinates*, melalui ekspansi di pusat sel ($i\Delta x, j\Delta y$) dimana η dievaluasi dan pada tingkat waktu $n\Delta t$ Ketika P dan Q dievaluasi di tepi ($i + 1/2, j$) dan ($i, j + 1/2$) dari sel grid. Skema beda hingga *staggered leap-frog* eksplisit untuk persamaan air dangkal linear, dengan kesalahan pemotongan diabaikan, dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\begin{aligned} & \frac{\eta_{ij}^{n+\frac{1}{2}} - \eta_{ij}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} + \left\{ \frac{1}{R \cos \varphi} \right\}_{ij} \frac{P_{i+\frac{1}{2},j}^n - P_{i-\frac{1}{2},j}^n}{\Delta \psi} + \\ & \left\{ \frac{1}{R \cos \varphi} \right\}_{ij} \frac{(\cos \varphi_{i,j+\frac{1}{2}}) Q_{i,j+\frac{1}{2}}^n - (\cos \varphi_{i,j-\frac{1}{2}}) Q_{i,j-\frac{1}{2}}^n}{\Delta \varphi} = \\ & - \frac{h_{ij}^{n+1/2} - h_{ij}^{n-1/2}}{\Delta t} \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$\frac{P_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} - P_{i+\frac{1}{2},j}^n}{\Delta t} + \left\{ \frac{gh}{R \cos \varphi} \right\}_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\eta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \eta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta \psi} - f Q_{i+\frac{1}{2},j}^n \quad (2.22)$$

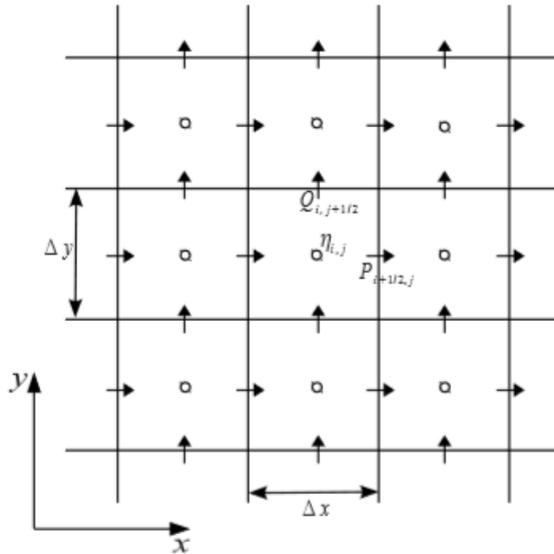
$$\frac{Q_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} - Q_{i,j+\frac{1}{2}}^n}{\Delta t} + \left\{ \frac{gh}{R} \right\}_{i,j+\frac{1}{2}} \frac{\eta_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - \eta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta \varphi} - f Q_{i,j+\frac{1}{2}}^n = 0 \quad (2.23)$$

Yang sering digunakan dalam simulasi tsunami lintas Samudra skala besar dan rekanan koordinat *Cartesian* menyatakan sebagai berikut,

$$\frac{\eta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - \eta_{i,j}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} + \frac{p_{i+\frac{1}{2},j}^n - p_{i+\frac{1}{2},j}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta x} + \frac{Q_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - Q_{i,j+\frac{1}{2}}^n}{\Delta y} = - \frac{h_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - h_{i,j}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} \quad (2.24)$$

$$\frac{p_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - p_{i+\frac{1}{2},j}^{n-\frac{1}{2}}}{\Delta t} + gh_{i+\frac{1}{2},j} \frac{\eta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \eta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x} = 0 \quad (2.25)$$

$$\frac{Q_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} - Q_{i,j+\frac{1}{2}}^n}{\Delta t} + gh_{i,j+\frac{1}{2}} \frac{\eta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \eta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y} = 0 \quad (2.26)$$



Gambar 2.6 Staggered grid setup di COMCOT

Sering digunakan untuk simulasi skala kecil. Skema numerik diatas memiliki kesalahan pemotongan dalam urutan $O(\Delta x^2, \Delta y^2, \Delta t^2)$.

Persamaan 2.21 da 2.24 yang diusulkan dalam skema leap-frog menghitung perpindahan permukaan bebas sel grid (i, j) pada waktu $(n + \frac{1}{2})$. Perhitungan ini sepenuhnya eksplisit dan memerlukan informasi tentang komponen fluks volume dan perpindahan permukaan bebas dari langkah waktu sebelumnya. Komponen fluks volume tidak dievaluasi pada lokasi yang sama dengan perpindahan permukaan bebas. Gambar 2.6 menunjukkan system grid perpindahan permukaan bebas, η dihitung dipusat sel grid (i, j) dan komponen fluks, P dan Q , diperoleh dipusat empat tepi sel grid, $P_{i-\frac{1}{2}}$, $P_{i+\frac{1}{2}}$, $Q_{ij-\frac{1}{2}}$, dan $Q_{ij+\frac{1}{2}}$. Persamaan momentum 2.22 - 2.23 dan 2.24 - 2.25, digunakan untuk menghitung komponen fluks volume, $P_{i+\frac{1}{2}}$ dan $Q_{i,j+\frac{1}{2}}$. Perhitungan untuk perpindahan permukaan bebas dan komponen fluks volume juga staggered dalam waktu. Perpindahan permukaan bebas dievaluasi pada tingkat waktu $t = (n - \frac{1}{2})\Delta t$ dan $t = (n + \frac{1}{2})\Delta t$ namun komponen fluks volume dihitung pada tingkat waktu $t = n\Delta t$ dan $t = (n + \frac{1}{2})\Delta t$.

Persamaan air dangkal nonlinear didiskritisasi dengan menggunakan persamaan skema beda hingga

leap-frog yang sama seperti persamaan air dangkal linear. Namun, persamaan nonlinear didiskritisasi dengan skema beda hingga melawan arah angin. Secara umum, skema melawan angin stabil secara kondisional dan memperkenalkan beberapa disipasi numerik. Tetapi jika gradien kecepatan di dalam fluida tidak terlalu besar dan jika kondisi stabilitas, $\sqrt{2gh\Delta t/\Delta x} < 1$. Dengan menggunakan skema melawan angin, suku-suku nonlinier dalam persamaan momentum dalam system koordinat *cartesian* didiskritisasi sebagai berikut:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{P^2}{H} \right\} = \frac{1}{\Delta x} \left\{ \begin{aligned} &\lambda_{11} \frac{\left(P_{i+\frac{3}{2},j}^n \right)^2}{H_{i+\frac{3}{2},j}^n} + \lambda_{12} \frac{\left(P_{i+\frac{1}{2},j}^n \right)^2}{H_{i+\frac{1}{2},j}^n} \\ &+ \lambda_{13} \frac{\left(P_{i-\frac{1}{2},j}^n \right)^2}{H_{i-\frac{1}{2},j}^n} \end{aligned} \right\} \quad (2.27)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} = \frac{1}{\Delta y} \left\{ \begin{aligned} &\lambda_{21} \frac{(PQ)_{i+\frac{1}{2},j+1}^n}{H_{i+\frac{1}{2},j+1}^n} + \lambda_{22} \frac{(PQ)_{i+\frac{1}{2},j}^n}{H_{i+\frac{1}{2},j}^n} \\ &+ \lambda_{23} \frac{(PQ)_{i+\frac{1}{2},j-1}^n}{H_{i+\frac{1}{2},j-1}^n} \end{aligned} \right\} \quad (2.28)$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{PQ}{H} \right\} = \frac{1}{\Delta x} \left\{ \begin{aligned} &\lambda_{31} \frac{(PQ)_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n}{H_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n} + \lambda_{32} \frac{(PQ)_{i,j+\frac{1}{2}}^n}{H_{i,j+\frac{1}{2}}^n} \\ &+ \lambda_{33} \frac{(PQ)_{i-1,j+\frac{1}{2}}^n}{H_{i-1,j+\frac{1}{2}}^n} \end{aligned} \right\} \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{Q^2}{H} \right\} = \frac{1}{\Delta y} \left\{ \begin{array}{l} \lambda_{41} \frac{\left(Q_{i,j+\frac{3}{2}}^n \right)^2}{H_{i,j+\frac{3}{2}}^n} + \lambda_{42} \frac{\left(Q_{i,j+\frac{1}{2}}^n \right)^2}{H_{i,j+\frac{1}{2}}^n} \\ + \lambda_{43} \frac{\left(Q_{i,j-\frac{1}{2}}^n \right)^2}{H_{i,j-\frac{1}{2}}^n} \end{array} \right\} \quad (2.30)$$

Dimana koefisien λ ditentukan dari

$$\begin{cases} \lambda_{11} = 0, \lambda_{12} = 1, \lambda_{13} = -1, \text{ if } P_{i+\frac{1}{2},j}^n \geq 0 \\ \lambda_{11} = 1, \lambda_{12} = -1, \lambda_{13} = 0, \text{ if } P_{i+\frac{1}{2},j}^n < 0 \end{cases} \quad (2.31)$$

$$\begin{cases} \lambda_{21} = 0, \lambda_{22} = 1, \lambda_{23} = -1, \text{ if } Q_{i+\frac{1}{2},j}^n \geq 0 \\ \lambda_{21} = 1, \lambda_{22} = -1, \lambda_{23} = 0, \text{ if } Q_{i+\frac{1}{2},j}^n < 0 \end{cases} \quad (2.32)$$

$$\begin{cases} \lambda_{31} = 0, \lambda_{32} = 1, \lambda_{33} = -1, \text{ if } P_{i,j+\frac{1}{2}}^n \geq 0 \\ \lambda_{31} = 1, \lambda_{32} = -1, \lambda_{33} = 0, \text{ if } P_{i,j+\frac{1}{2}}^n < 0 \end{cases} \quad (2.33)$$

$$\begin{cases} \lambda_{41} = 0, \lambda_{42} = 1, \lambda_{43} = -1, \text{ if } Q_{i,j+\frac{1}{2}}^n \geq 0 \\ \lambda_{41} = 1, \lambda_{42} = -1, \lambda_{43} = 0, \text{ if } Q_{i,j+\frac{1}{2}}^n < 0 \end{cases} \quad (2.34)$$

Rumus Manning digunakan untuk memodelkan gesekan bawah. Gesekan bawah didiskritisasi sebagai

$$F_x = v_x \left(P_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} + P_{i+\frac{1}{2},j}^n \right) \quad (2.35)$$

$$F_y = v_y \left(Q_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} + Q_{i+\frac{1}{2},j}^n \right) \quad (2.36)$$

Dimana v_x dan v_y diberikan oleh,

$$v_x = \frac{1}{2} \frac{gn^2}{\left(H_{i+\frac{1}{2},j}^n \right)^{7/3}} \left[\left(P_{i+\frac{1}{2},j}^n \right)^2 + \left(Q_{i+\frac{1}{2},j}^n \right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.37)$$

$$v_y = \frac{1}{2} \frac{gn^2}{\left(H_{i,j+\frac{1}{2}}^n\right)^{7/3}} \left[\left(P_{i,j+\frac{1}{2}}^n\right)^2 + \left(Q_{i,j+\frac{1}{2}}^n\right)^2 \right]^{1/2} \quad (2.38)$$

Untuk rumus manning, bentuk perbedaan hingga untuk persamaan kontinuita dan persamaan momentum dalam *Cartesian* koordinat sebagai berikut,

$$\eta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \eta_{i,j}^{n-\frac{1}{2}} - r_x \left(P_{i+\frac{1}{2},j}^n - P_{i-\frac{1}{2},j}^n \right) - r_y \left(Q_{i,j+\frac{1}{2}}^n - Q_{i,j-\frac{1}{2}}^n \right) \quad (2.39)$$

$$P_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} = \frac{1}{1+v_x\Delta t} \left\{ (1 - v_x\Delta t) P_{i+\frac{1}{2},j}^n - r_x g H_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} \left(\eta_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} - \eta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) - \frac{r_x}{1+v_x\Delta t} \left\{ \lambda_{11} \frac{\left(P_{i+\frac{3}{2},j}^n\right)^2}{H_{i+\frac{3}{2},j}^n} + \lambda_{12} \frac{\left(P_{i+\frac{1}{2},j}^n\right)^2}{H_{i+\frac{1}{2},j}^n} + \lambda_{13} \frac{\left(P_{i-\frac{1}{2},j}^n\right)^2}{H_{i-\frac{1}{2},j}^n} \right\} - \frac{r_x}{1+v_x\Delta t} \left\{ \lambda_{21} \frac{(PQ)_{i+\frac{1}{2},j+1}^n}{H_{i+\frac{1}{2},j+1}^n} + \lambda_{22} \frac{(PQ)_{i+\frac{1}{2},j}^n}{H_{i+\frac{1}{2},j}^n} + \lambda_{23} \frac{(PQ)_{i+\frac{1}{2},j-1}^n}{H_{i+\frac{1}{2},j-1}^n} \right\} \right\} \quad (2.40)$$

$$\begin{aligned}
Q_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} &= \frac{1}{1+v_y\Delta t} \left\{ (1 - v_y\Delta t)Q_{i+\frac{1}{2},j}^n - r_x g H_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} \left(\eta_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} - \right. \right. \\
&\left. \left. \eta_{ij}^{n+\frac{1}{2}} \right) \right\} - \frac{r_y}{1+v_y\Delta t} \left\{ \lambda_{31} \frac{(PQ)_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n}{H_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n} + \lambda_{32} \frac{(PQ)_{i,j+\frac{1}{2}}^n}{H_{i,j+\frac{1}{2}}^n} \right\} - \\
&\frac{r_y}{1+v_y\Delta t} \left\{ \lambda_{41} \frac{(Q_{i,j+\frac{3}{2}}^n)^2}{H_{i,j+\frac{3}{2}}^n} + \lambda_{42} \frac{(Q_{i,j+\frac{1}{2}}^n)^2}{H_{i,j+\frac{1}{2}}^n} \right. \\
&\left. + \lambda_{43} \frac{(Q_{i,j-\frac{1}{2}}^n)^2}{H_{i,j-\frac{1}{2}}^n} \right\} \quad (2.41)
\end{aligned}$$

Dimana $r_x = \frac{\Delta t}{\Delta x}$ dan $r_y = \frac{\Delta t}{\Delta y}$ pendekatan tersebut telah digunakan untuk mendorong tentang persamaan beda hingga.

$$H_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \left(H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + H_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (2.42)$$

$$H_{ij+\frac{1}{2}}^{n+\frac{1}{2}} = \frac{1}{2} \left(H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + H_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (2.43)$$

$$H_{i+\frac{1}{2},j}^n = \frac{1}{4} \left(H_{i,j}^{n-\frac{1}{2}} + H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + H_{i+1,j}^{n-\frac{1}{2}} + H_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (2.44)$$

$$H_{i,j+\frac{1}{2}}^n = \frac{1}{4} \left(H_{i,j}^{n-\frac{1}{2}} + H_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + H_{i,j+1}^{n-\frac{1}{2}} + H_{i,j+1}^{n+\frac{1}{2}} \right) \quad (2.45)$$

$$P_{i,j+\frac{1}{2}}^n = \frac{1}{4} \left(P_{i-\frac{1}{2},j}^n + H_{i-\frac{1}{2},j+1}^n + P_{i+\frac{1}{2},j}^n + P_{i+\frac{1}{2},j+1}^n \right) \quad (2.46)$$

$$Q_{i+\frac{1}{2},j}^n = \frac{1}{4} \left(Q_{i,j-\frac{1}{2}}^n + Q_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n + Q_{i,j+\frac{1}{2}}^n + Q_{i+1,j-\frac{1}{2}}^n \right) \quad (2.47)$$

Dalam koordinat *spherical*, persamaan air dangkal didiskritisasi sebagai berikut

$$\eta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} = \eta_{i,j}^{n-\frac{1}{2}} - \frac{1}{R \cos \varphi_{i,j}} \frac{\Delta t}{\Delta \psi} \left(P_{i+\frac{1}{2},j}^n - P_{i-\frac{1}{2},j}^n \right) - \frac{1}{R \Delta \varphi} \left(Q_{i,j+\frac{1}{2}}^n - Q_{i,j-\frac{1}{2}}^n \right) \quad (2.48)$$

$$P_{i+\frac{1}{2},j}^{n+1} = f_x \left\{ (1 - v_x \Delta t) P_{i+\frac{1}{2},j}^n - \left\{ \frac{gh}{R \cos \varphi} \right\}_{i+\frac{1}{2},j}^{n+\frac{1}{2}} \frac{\Delta t}{\Delta \psi} \left(\eta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \eta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \right\} - \frac{f_x}{R \cos \varphi_{i,j}} \frac{\Delta t}{\Delta \psi} \left\{ \begin{aligned} & \lambda_{11} \frac{\left(P_{i+\frac{3}{2},j}^n \right)^2}{H_{i+\frac{3}{2},j}^n} + \lambda_{12} \frac{\left(P_{i+\frac{1}{2},j}^n \right)^2}{H_{i+\frac{1}{2},j}^n} \\ & + \lambda_{13} \frac{\left(P_{i-\frac{1}{2},j}^n \right)^2}{H_{i-\frac{1}{2},j}^n} \end{aligned} \right\} - \frac{f_x \Delta t}{R \Delta \varphi} \left\{ \begin{aligned} & \lambda_{21} \frac{(PQ)_{i+\frac{1}{2},j+1}^n}{H_{i+\frac{1}{2},j+1}^n} + \lambda_{22} \frac{(PQ)_{i+\frac{1}{2},j}^n}{H_{i+\frac{1}{2},j}^n} \\ & + \lambda_{23} \frac{(PQ)_{i+\frac{1}{2},j-1}^n}{H_{i+\frac{1}{2},j-1}^n} \end{aligned} \right\} \quad (2.49)$$

$$Q_{i,j+\frac{1}{2}}^{n+1} = f_y \left\{ (1 - v_y \Delta t) Q_{i,j+\frac{1}{2}}^n - \frac{gH_{i,j+1/2}^{n+1/2}}{R} \frac{\Delta t}{\Delta \psi} \left(\eta_{i+1,j}^{n+\frac{1}{2}} - \eta_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} \right) \right\} - \frac{f_y}{R \cos \varphi_{i,j}} \frac{\Delta t}{\Delta \psi} \left\{ \begin{aligned} & \lambda_{31} \frac{(PQ)_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n}{H_{i+1,j+\frac{1}{2}}^n} + \lambda_{32} \frac{(PQ)_{i,j+\frac{1}{2}}^n}{H_{i,j+\frac{1}{2}}^n} \\ & + \lambda_{33} \frac{(PQ)_{i-1,j+\frac{1}{2}}^n}{H_{i-1,j+\frac{1}{2}}^n} \end{aligned} \right\}$$

$$-\frac{f_y \Delta t}{R \Delta \varphi} \left\{ \begin{array}{l} \lambda_{41} \frac{\left(Q_{i,j+\frac{3}{2}}^n\right)^2}{H_{i,j+\frac{3}{2}}^n} + \lambda_{42} \frac{\left(Q_{i,j+\frac{1}{2}}^n\right)^2}{H_{i,j+\frac{1}{2}}^n} \\ + \lambda_{43} \frac{\left(Q_{i,j-\frac{1}{2}}^n\right)^2}{H_{i,j-\frac{1}{2}}^n} \end{array} \right\} \quad (2.50)$$

Dimana $f_x = \frac{1}{(1+v_x \Delta t)}$ dan $f_x = \frac{1}{(1-v_y \Delta t)}$

Berdasarkan teori Mahinsa syarat awal elevasi muka air laut, Ketika pusat gempa terdapat patahan maka gelombang/ketinggian (η) awal tersebut merupakan syarat awal mendapatkan yang mendapatkan nilai untuk dimasukkan ke dalam numerik comcot.

Persamaan gesekan dasar yang dimodelkan menggunakan formula Manning (*Manning's formula*). Koefisien gesekan dasar (n) dalam COMCOT digunakan untuk merepresentasikan karakteristik permukaan profil batimetri dan topografi wilayah kajian. Prasetya et al. (2013) mengatakan bahwa koefisien yang dipilih dapat berupa nilai tunggal untuk mewakili seluruh area pada wilayah kajian atau bervariasi sesuai dengan karakteristik batimetri dan topografi. *Manning's roughness coefficient* yang digunakan untuk simulasi ini adalah 0.013 (Li et al, 2012).

Pengamatan tsunami sering digunakan dalam prosedur inversi untuk model distribusi slip sesar hingga konstruksi, atau model sumber tsunami dari elevasi air awal. Metode invers digunakan untuk memperkirakan distribusi slip pada bidang patahan, perpindahan dasar laut dan elevasi permukaan air yang sesuai dapat dihitung menggunakan linear elastic dislocation model (Okada, 1985). Model Comcot menggunakan *explicit leapfrog algorithm* untuk menghitung fluks momentum dan elevasi permukaan dan telah diparalelkan menggunakan bahasa pemrograman FORTAN (An Chao, dkk 2014).

6. Mitigasi Bencana

Mitigasi bencana adalah serangkaian upaya untuk mengurangi risiko bencana, baik melalui pembangunan fisik maupun penyadaran dan peningkatan kemampuan menghadapi ancaman bencana (Anggarasari, 2019). Dalam konteks bencana, dikenal dua macam yaitu (1) bencana alam yang merupakan suatu serangkaian peristiwa bencana yang disebabkan oleh faktor alam, yaitu berupa gempa, tsunami, gunung meletus, banjir, kekeringan, angin topan tanah longsor, dll. (2) bencana sosial merupakan

suatu bencana yang diakibatkan oleh manusia, seperti konflik sosial, penyakit masyarakat dan teror. Mitigasi bencana merupakan langkah yang sangat perlu dilakukan sebagai suatu titik tolak utama dari manajemen bencana (Dewi, R. S, 2019).

Ada empat hal terpenting dalam mitigasi bencana, yaitu:

- a. Tersedia informasi dan peta kawasan rawan bencana untuk tiap jenis bencana.
- b. Sosialisasi untuk meningkatkan pemahaman dan kesadaran masyarakat dalam menghadapi bencana, karena bermukim di daerah rawan bencana.
- c. Mengetahui apa yang perlu dilakukan dan dihindari, serta mengetahui cara penyelamatan diri jika bencana timbul.
- d. Pengaturan dan penataan kawasan rawan bencana untuk mengurangi ancaman bencana.

7. Software Comcot

COMCOT adalah suatu paket pemodelan tsunami yang mampu menreka ulang proses penjalaran gelombang tasunami saat peristiwa tsunami yang pernah terjadi. Model numerik berdasarkan persamaan air dangkal sangat efesien dalam menreka tsunami

lintas samudera karena penggunaannya yang eksplisit skema numerik, tidak perlu menyelesaikan turunan tingkat tinggi terkait dengan non linearitas dan dispersi frekuensi (Wang, 2009).

Gelombang tsunami dapat dibangkitkan berdasarkan input pembangkit gelombang, model deformasi dasar laut yang disebabkan oleh gempa bumi, dan longsor. COMCOT juga telah menggunakan sistem multi grid yang memungkinkan penggunaan banyak area simulasi untuk meningkatkan akurasi dan efisiensi pemodelan (Wang, 2009).

B. Kajian Pustaka

Berikut ini merupakan hasil penelitian yang relevan. Hasil penelitian ini dijadikan referensi peneliti yang digunakan dalam penelitian. Penelitian yang dilakukan oleh Susanto, dkk (2020) menunjukkan bahwa hasil waktu tiba atau *travel time* tsunami, gelombang paling cepat sampai pesisir pantai adalah pada waktu 7,17 menit di Kabupaten Mamuju daerah pantai Pandulu. Penelitian ini menggunakan software pemodelan tsunami TUNAMI-N2.

Penelitian yang dilakukan oleh Purnama, dkk (2019) menunjukkan bahwa hasil *run up* maksimum di Kabupaten Badung daerah Pantai Kuta adalah 21,16 m

sampai 55,6 m dengan waktu tiba tsunami 15 menit sampai 120 menit setelah terjadinya gempa bumi. Penelitian ini menggunakan Software TOAST dengan mengasumsikan magnitudo 9,6 Skala Richter.

Penelitian yang dilakukan oleh Chaeroni, dkk (2013) menunjukkan bahwa hasil simulasi tsunami dengan variasi skenario magnitude gempa 7,7 Mw, 8 Mw dan 8.3 Mw diperoleh hasil waktu tiba tsunami adalah 29 menit sampai 35 menit. Ketinggian maksimum gelombang tsunami mencapai 4,5 m sampai 25 m di Teluk Teleng, Pacitan. Penelitian ini menggunakan software modul hidrodinamik dari perangkat lunak MIKE21.

Penelitian yang dilakukan oleh Aperus, dkk (2016) menggunakan software L-2008 dan Travel Time Tsunami (TTT) dengan mengasumsi skenario magnitudo 8 Mw, 8,5 Mw dan 9 Mw. Penelitian ini diperoleh hasil ketinggian tsunami di Kecamatan Mana Kota Bengkulu menggunakan skenario gempa tersebut 8 Mw menghasilkan nilai 2,01 m, magnitudo 8,5 Mw menghasilkan nilai 4,05 m dan magnitudo 9 Mw menghasilkan nilai 9,31 m. Waktu tempuh gelombang tsunami adalah 20 menit 7 detik.

Hasil penelitian ini memiliki persamaan dan perbedaan penelitian terdahulu. Persamaan penelitian ini adalah pemodelan tsunami untuk mengetahui tinggi gelombang

akibat tsunami. Perbedaan yang paling menonjol adalah lokasi penelitian dan skenario gempa. Skenario gempa berdasarkan buku “Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017” atau di kenal sebagai PusGen (Pusat Studi Gempa Nasional) dengan magnitudo 8,9 Skala Richter. Parameter sesar strike, dip, slip dan depth ditentukan berdasarkan data parameter sesar dari website Global CMT.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

A. Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan jenis penelitian kuantitatif dengan menggunakan data sekunder. Data yang dibutuhkan adalah parameter gempa lokasi episenter, *strike*, *dip*, dan *slip* dengan mengasumsikan magnitudo 8,9 Skala Richter.

B. Tempat dan Waktu Penelitian

Tempat dan waktu Penelitian dilakukan di Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika (BMKG) Stasiun Geofisika Banjarnegara dan kemudian dilanjutkan di Universitas Islam Negeri Walisongo Semarang.

C. Alat dan Bahan

1. Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini dibagi menjadi dua, yaitu perangkat keras dan perangkat lunak. Sistem perangkat keras yang digunakan adalah perangkat komputer berupa satu unit Laptop Acer ES1-420 dengan spesifikasi *Processor* AMD E1-2500 APU with Radeon™ HD Graphics 1.40 GHz, memori RAM

4.00 *gigabyte*, dan kapasitas penyimpanan 500 *gigabyte*. Perangkat lunak yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan pada tabel 3.1.

Tabel 3.1 Perangkat Lunak Penelitian

No.	Perangkat Lunak	Fungsi
1	COMCOT	Pemodelan tsunami
2	Global Mapper	Pembuatan grid/layer pemodelan dan pemetaan
3	QGIS/Arcgis	Pembuatan peta
4	Video Editor	Pembuatan animasi penjalaran tsunami

D. Teknik dan Instrumen Pengumpulan Data

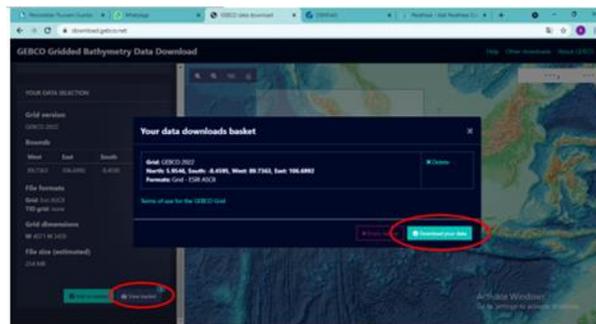
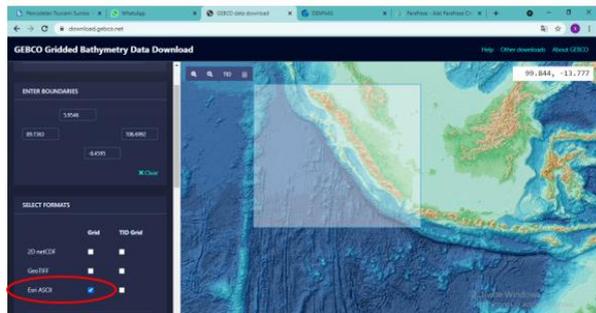
Data yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan data batimetri, dan data topografi. Teknik dan instrumen pengumpulan data tersebut dijelaskan sebagai berikut:

1. Data Batimetri

Data Batimetri merupakan kedalaman air danau atau dasar lautan. Data yang digunakan adalah *General Bathymetric Chart of the Ocean* (GEBCO) diambil dari website <https://download.gebco.net/> dan disimpan dalam format *.asc. Berikut cara mengunduh data batimetri ditunjukkan pada gambar 3.1

1) Buka situs web GEBCO di browser

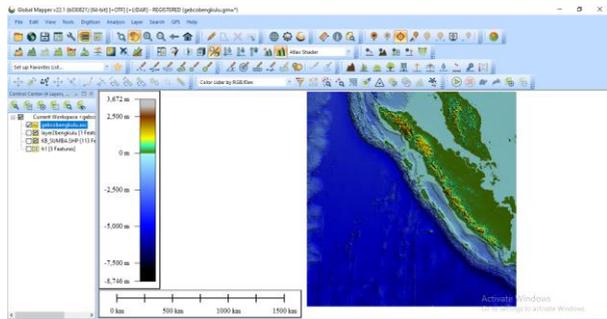
- 2) Wilayah dapat dipilih dengan menuliskan batas di Enter Boundaries atau dengan menahan Ctrl klik kiri dan geser.
- 3) Klik Add to basket untuk menambahkan data batimetri dari region yang dipilih.
- 4) Klik view basket download file batimetri dengan klik download your data.



Gambar 3.1 Tampilan awal GEBCO

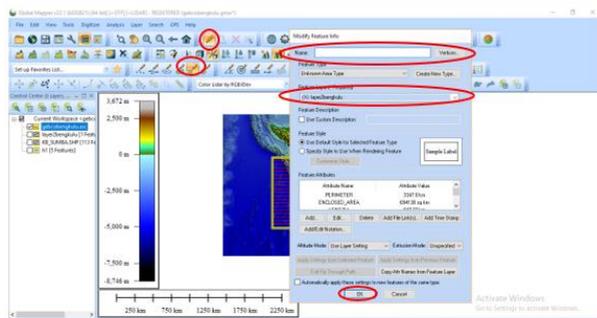
Tahap selanjutnya data tersebut perlu dibuat pemodelan untuk grid 1, grid 2 dan seterusnya sesuai dengan daerah penelitian. Pembuatan grid dapat

dilakukan dengan menggunakan aplikasi Global Mapper. Berikut tampilan data batimetri ditunjukkan pada Gambar 3.2.



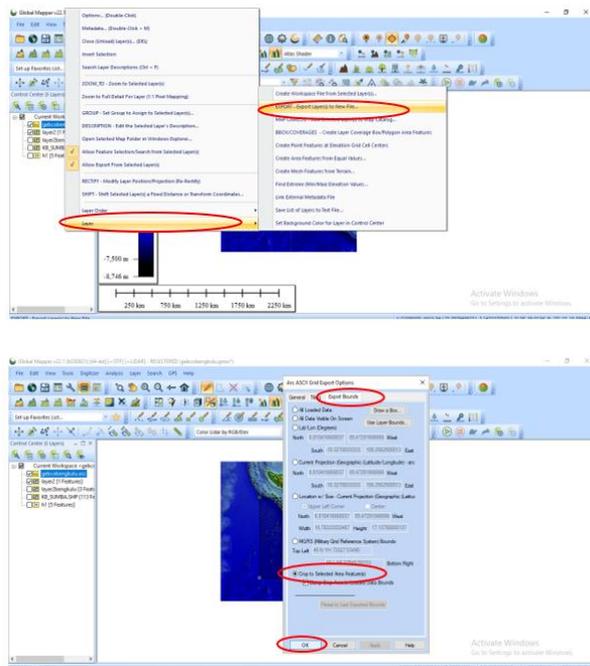
Gambar 3.2 Tampilan batimetri pada global mapper

Pembuatan grid baru dari grid sebelumnya dengan cara aktifkan Digitizer Tool dan Square Area Feature. Buat grid 2 lakukan dengan cara klik kiri sambil digeser. Setelah selesai akan muncul kotak dialog Modify Future Info, beri nama baru dengan mengisi bagian Name dan Feature layer ditunjukkan pada gambar 3.3



Gambar 3.3 Membuat grid/layer

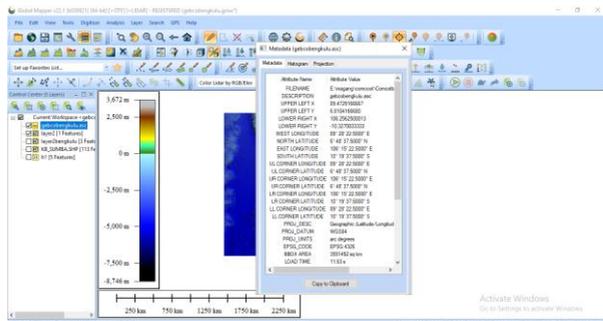
Simpan grid 2 yang telah dibuat dalam format *.asc. dengan cara klik kanan pada `gebcobengkulu.asc >> layer >> EXPORT`. Setelah muncul kotak Arc ASCII Grid Export Options pada menu Export Bounds pilih dan klik `Crop to Selected Area Feature` ditunjukkan pada gambar 3.4.



Gambar 3.4 Mengexport file menjadi format *.asc.

Gambar 3.5 menunjukkan metadata yang akan dijadikan input dalam pemodelan COMCOT. Untuk melihat batas koordinat dari grid yang telah dibuat,

dapat dilakukan dengan cara klik kanan pada layer >> Metadata.



Gambar 3.5 Metadata

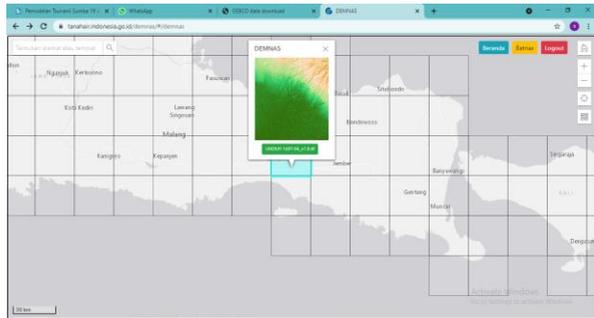
2. Data Topografi

Data topografi yang digunakan adalah data DEMNAS *Digital Elevation Model* diperoleh dari situs <https://tanahair.indonesia.go.id/demnas/> pada bagian selatan Jember. Berikut tampilan awal DEMNAS.



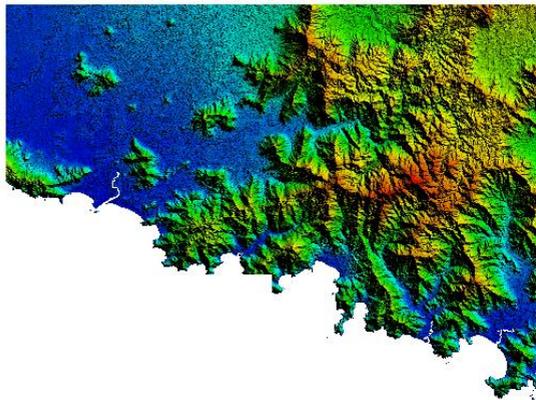
Gambar 3.6 Tampilan awal DEMNAS

Cara mengunduh data DEMNAS dengan cara klik pada bagian kolom kotak daerah penelitian >> klik unduh ditunjukkan pada gambar 3.7.



Gambar 3.7 Download Data DEMNAS

Berikut tampilan data topografi dari data DEMNAS dengan menggunakan aplikasi arcgis.

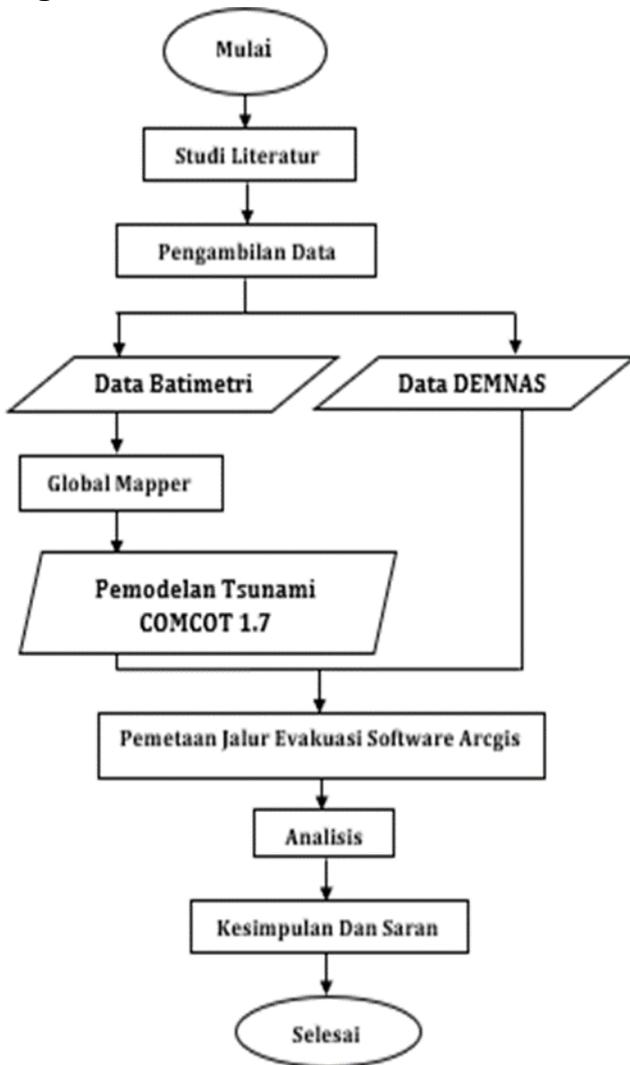


Gambar 3.8 Data topografi

E. Teknik Analisis Data

Teknik analisis data pemodelan tsunami dilakukan untuk mendapatkan ketinggian gelombang tsunami dengan pembuatan jalur evakuasi. Dari data gempa bumi mendapatkan nilai kedalaman gempa, magnitude, strike, dip, dan slip. Magnitude mengasumsikan dari Tim Studi Gempa Nasional (2017) yang bernilai 8,9 SR merupakan nilai *magnitude* maksimum. Perhitungan nilai *magnitude* maksimum menggunakan persamaan Well & Coppersmith (persamaan (2.2) dan (2.3)). Setelah mendapatkan nilai dijadikan *input* dalam Comcotctl.

F. Diagram Alir Penelitian



BAB IV

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

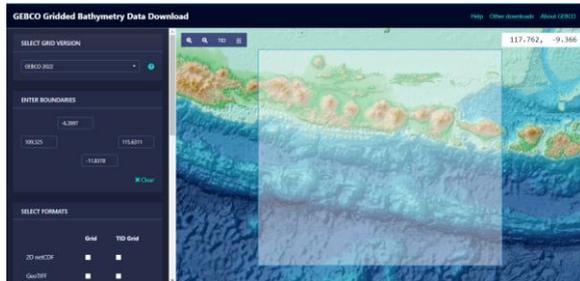
A. Hasil

Penelitian ini menghasilkan sebuah peta persebaran *run-up* tsunami di Jember. Peta ini akan digunakan untuk mengestimasi ketinggian tsunami di pantai Jember dan membuat jalur evakuasi sebagai penanggulangan bencana.

1. Penjalaran Gelombang Tsunami

a. Data Batimetri

Gambar 4.1 menunjukkan data dari GEBCO (<https://download.gebco.net/>) dan menyimpannya dalam format file *.asc untuk membuat file batimetri.

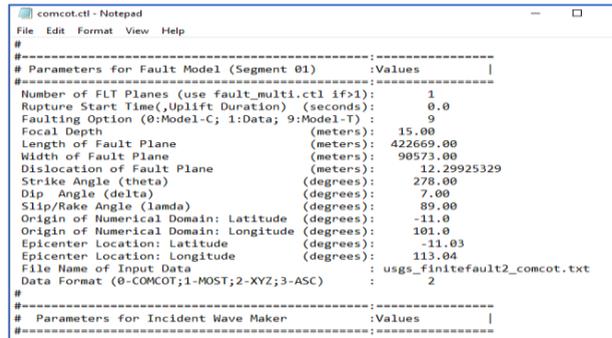


Gambar 4.1 Data Batimetri

b. Software comcot.ctl

File data *.asc dimasukkan ke dalam software Comcot.ctl untuk diubah pada bagian batimetri

dan sumber gempa. Gambar 4.2 menunjukkan tampilan software Comcot.



```

comcot.ctl - Notepad
File Edit Format View Help
#
#-----
# Parameters for Fault Model (Segment 01) :Values |
#-----
Number of FLT Planes (use fault_multi.ctl ifs=1): 1
Rupture Start Time(,Uplift Duration) (seconds): 0.0
Faulting Option (0:Model-C; 1:Data; 9:Model-T) : 9
Focal Depth (meters): 15.00
Length of Fault Plane (meters): 422669.00
Width of Fault Plane (meters): 90573.00
Dislocation of Fault Plane (meters): 12.29925329
Strike Angle (theta) (degrees): 278.00
Dip Angle (delta) (degrees): 7.00
Slip/Rake Angle (lambda) (degrees): 89.00
Origin of Numerical Domain: Latitude (degrees): -11.0
Origin of Numerical Domain: Longitude (degrees): 101.0
Epicenter Location: Latitude (degrees): -11.03
Epicenter Location: Longitude (degrees): 113.04
File Name of Input Data : usgs_finitefault2_comcot.txt
Data Format (0-COMCOT;1-MOST;2-XYZ;3-ASC) : 2
#
#-----
# Parameters for Incident Wave Maker :Values |
#-----

```

Gambar 4.2 Software Comcot

c. Menjalankan program Comcot.exe

Setelah software comcot telah siap kemudian running program comcot.exe tunggu hingga selesai. Berikut gambar 4.3 merupakan tampilan program Comcot.exe.



```

C:\Windows\system32\cmd.exe
.: \wagang\comcot\Comcotbengulu\comcot.exe
-----
COMCOT
*
*
* Cornell Multi-grid Coupled Tsunami
*
* version 1.7dev8
* updated on 2017-10-10
*
* Developed by
*
* Dr Xiaoming Wang
* Email:
*   xwang80@hotmail.com
*   xu4@cornell.edu
*   x.wang@gns.cri.nz
*
*-----
READING PARAMETERS FOR SIMULATION...
READING GENERAL INFORMATION.....
READING PARAMETERS FOR FAULT MODEL.....
READING PARAMETERS FOR GRID LAYER.....
READING PARAMETERS FOR GRID LAYER ID 1
PROCESSING INPUT PARAMETERS.....
PROCESSING BOUNDARY SETUP FOR GRID LAYERS ...
CHECKING SURF COORDINATES OF GRID LAYERS ...
READING GRID LAYERS AND NESTED GRID SETUP.....
CREATING OUTERMOST GRID LAYER - LAYER 1

```

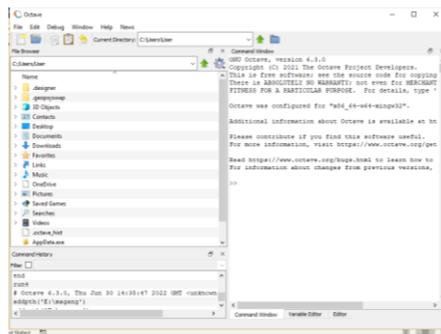
Gambar 4.3 Program Comcot.exe

Data yang akan dihasilkan proses running comcot dapat dilihat dalam folder hasilnya.

d. Menampilkan Aplikasi dengan Octave

Data hasil dari running `comcot.exe` untuk menampilkan data tersebut dengan cara menggunakan aplikasi Octave dapat di lihat pada gambar 4.4.

- 1) Copy alamat folder `comcot` ke Octave
- 2) Setelah alamat folder sudah tercopy kemudian di paste dalam Octave, maka ketik perintah berikut di console Octave:
`>> addpath ('alamat folder Octave codes')`



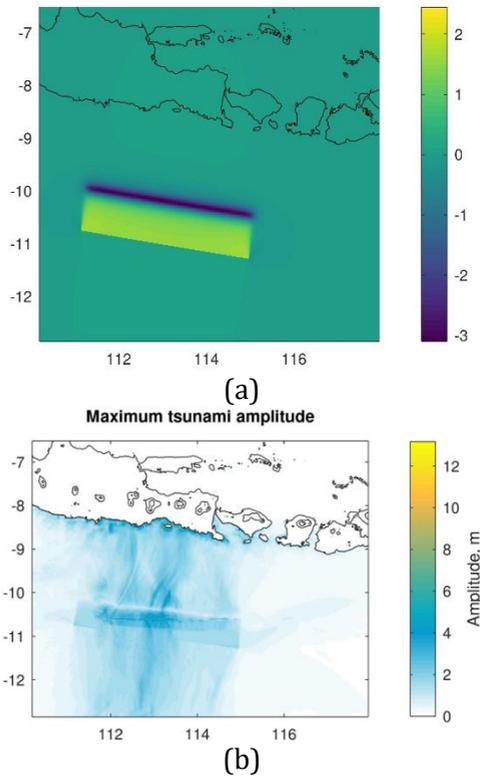
Gambar 4.4 Tampilan awal Octave

Masukkan perintah untuk menampilkan sumber tsunami.

```
>> comcot_plot_init ('01')
```

Masukkan perintah untuk menampilkan hasil simulasi

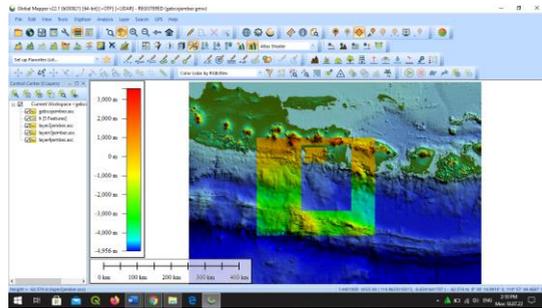
```
>> comcot_plot_zmax ('01')
```



Gambar 4.5 Pengaplikasian Aplikasi Octave (a) Hasil plot init (b) Hasil plot maksimal.

e. Membuat Grid/Layer Dengan Global Mapper

Membuat grid dapat dilihat pada teknik dan instrumen pengumpulan data. Gambar 4.6 menunjukkan hasil pemotongan grid terdapat 4 grid. Semakin banyak grid yang dibuat, maka pemodelan tsunami akan semakin detail.



Gambar 4.6 pemotongan grid

f. plot snapshot

Gambar 4.7 menunjukkan proses program plot snapshot memperlihatkan datangnya gelombang tsunami dengan cara ketik perintah di console Octave:

```
>> addpath ('alamat folder Octave codes')
```

Blok perintah yang akan di run >> klik kanan >> Evaluate Selection atau Blok perintah yang akan di run >>F9

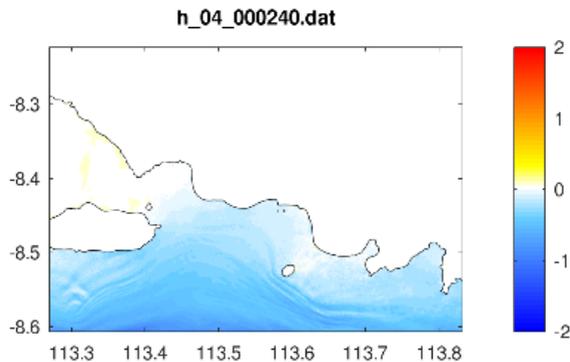
```

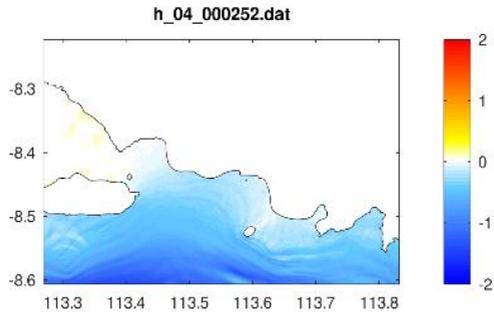
15 hold on
16 plot(data(1,1)/40,data(1,2)/100,'*');
17
18 addpath('E:\vaagang\codes\panga_jember');
19
20 custom_plot(data(1:4));
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
1000

```

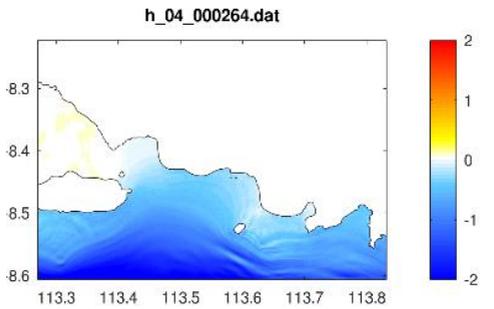
Gambar 4.7 program plot snapshot

Penjalaran gelombang tsunami menunjukkan bahwa tsunami merambat ke segala arah dari sumber gempa. Gambar 4.8 Hasil penelitian ini menunjukkan waktu tempuh penjalaran gelombang tsunami pada menit ke 04.00 memasuki beberapa wilayah yaitu Kecamatan Wuluhan, Kecamatan Ambulu, dan Kecamatan Tempurejo. Menit ke 04.02 memasuki wilayah Kecamatan Puger. Menit ke 04.04 memasuki area Kecamatan Gumukmas dan menit ke 06.08 memasuki Kecamatan Kencong dari waktu tempuh saat penjalaran gelombang tsunami adalah 37.08 menit.

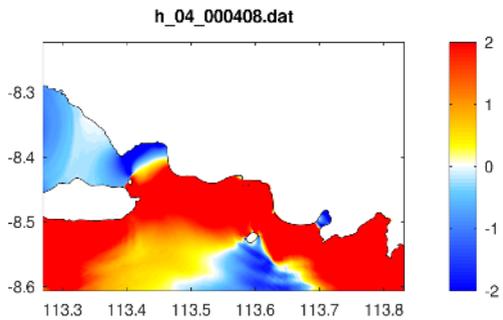




Waktu = 4,2 menit



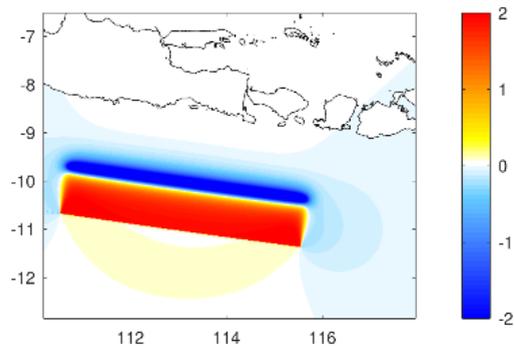
Waktu = 4,4 menit

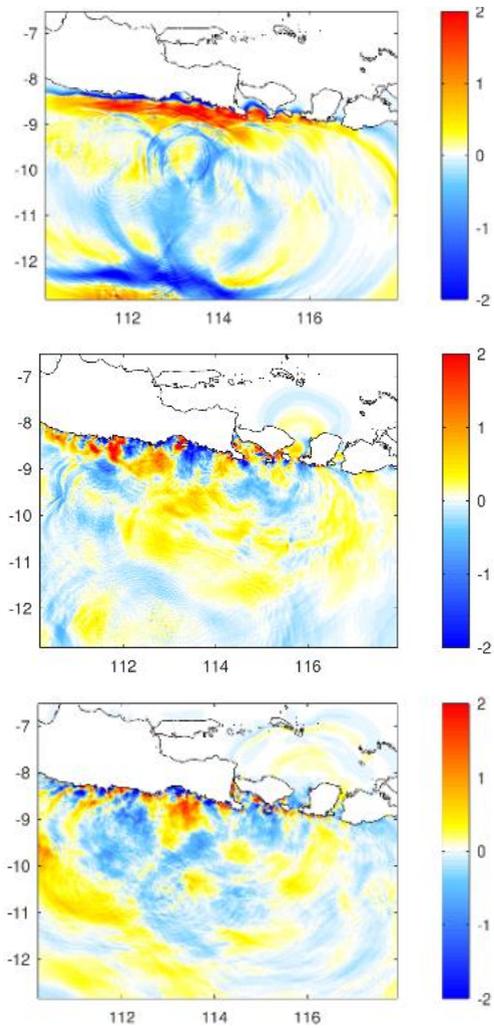


Waktu = 6,8 menit

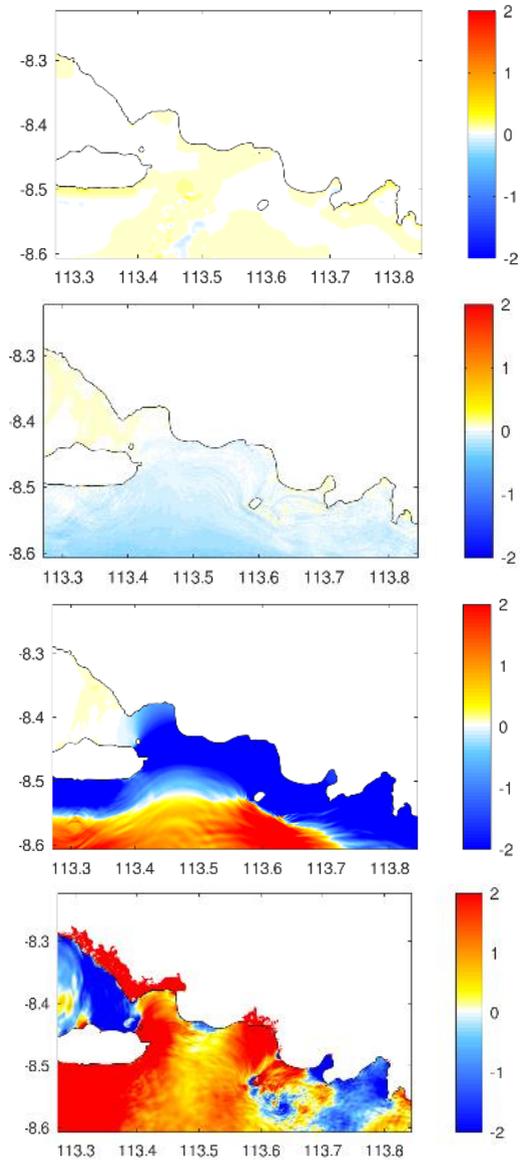
Gambar 4.8 Waktu tempuh penjarangan gelombang

Adanya perbedaan waktu dalam penjaralan gelombang tsunami yang disebabkan beberapa faktor antara lain kondisi kedalaman permukaan laut wilayah persebarannya yang berbeda-beda dan ketinggian lereng pantai di berbagai daerah sebaran. Ada Beberapa grid yang dihasilkan dalam penelitian ini yaitu grid 1 sampai grid 4 untuk grid 1 merupakan proses awal pemodelan gelombang tsunami ditunjukkan pada Gambar 4.9. grid 2 dan 3 ditunjukkan pada bagian lampiran. Sedangkan grid 4 merupakan titik fokus penelitian pemodelan penjaralan gelombang ditunjukkan pada gambar 4.10.





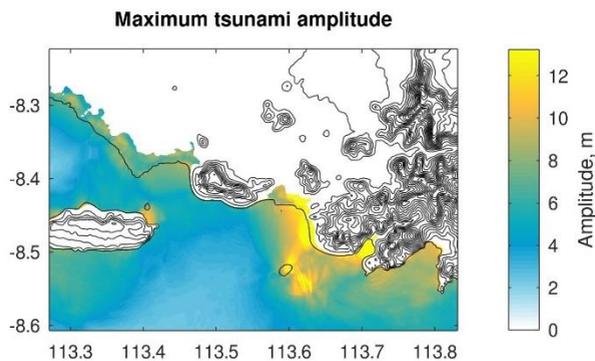
Gambar 4.9 Snapshot grid 1



Gambar 4.10 Snapshot layer 4

2. Ketinggian Gelombang Tsunami

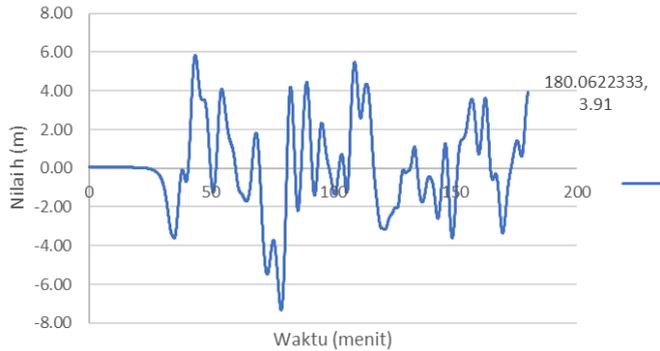
Gambar 4.11 menunjukkan bahwa nilai tsunami maksimum untuk berwarna kuning menunjukkan hasil 12 m dan untuk yang berwarna putih adalah 0 m menunjukkan bahwa amplitudo tsunami relatif terhadap titik nol permukaan laut semakin besar nilai amplitudo maka semakin besar tinggi gelombang, dan sebaliknya semakin kecil nilai amplitudo maka semakin kecil tinggi gelombang.



Gambar 4.11 nilai maximum tsunami amplitudo wilayah Jember

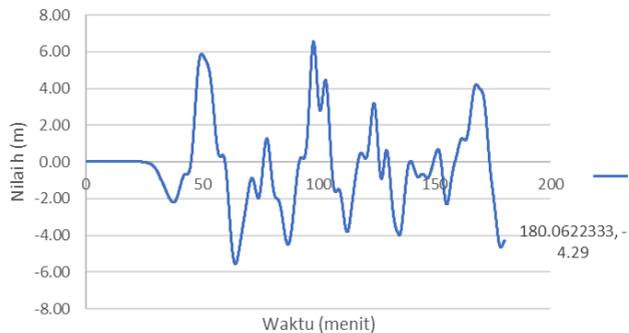
Data tersebut terdapat 6 area yaitu Kecamatan Kencong, Kecamatan Gumukmas, Kecamatan Puger, Kecamatan Ambulu dan Kecamatan Tempurejo yang menghasilkan nilai run-up tsunami. Dengan koordinat $113,3 LS - 8,4 BT$, dapat dilihat dalam

gambar 4.12 - 4.17 dan tabel data ketinggian air Tsunami 4.1.



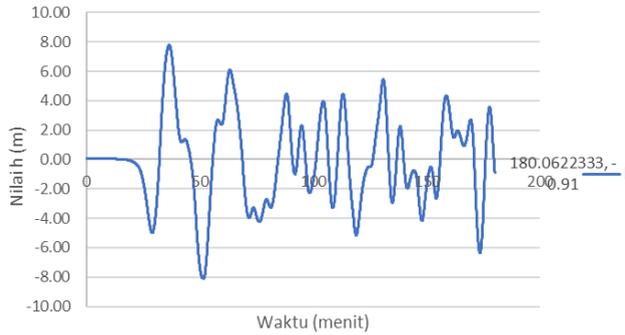
Gambar 4.12 Ketinggian air Kecamatan Kencong

Gambar 4.12 menunjukkan hasil data Ketinggian air dengan nilai maksimum h 5,58 m.



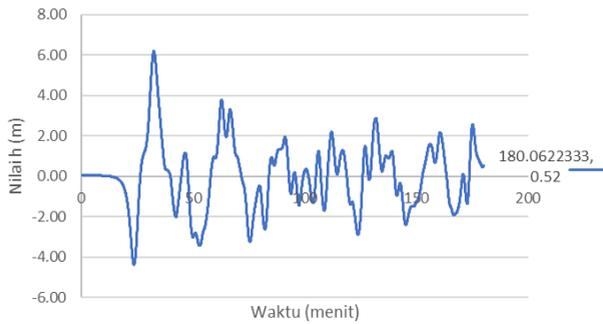
Gambar 4.13 Ketinggian air Kecamatan Gumukmas

Gambar 4.13 menunjukkan data Ketinggian air dengan nilai maksimum h 6,55m.



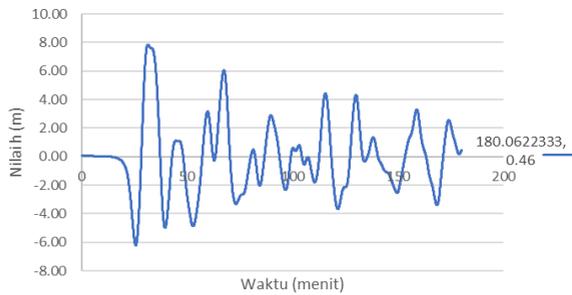
Gambar 4.14 Ketinggian air Kecamatan Puger

Gambar 4.14 menunjukkan data Ketinggian air dengan nilai maksimum h 7,78 m.



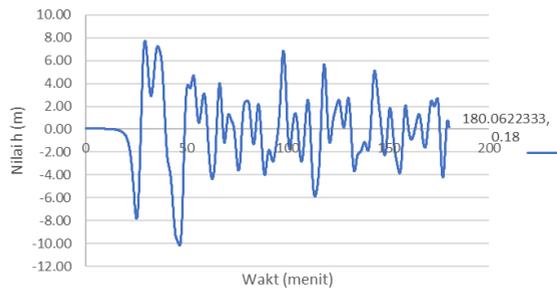
Gambar 4.15 Ketinggian air Kecamatan Wuluhan

Gambar 4.15 menunjukkan data Ketinggian air dengan nilai maksimum h 6,20 m.



Gambar 4.16 Ketinggian air Kecamatan Ambulu

Gambar 4.16 menunjukkan data Ketinggian air dengan nilai maksimum h 7,83 m.



Gambar 4.17 Ketinggian air Kecamatan Tumpurejo

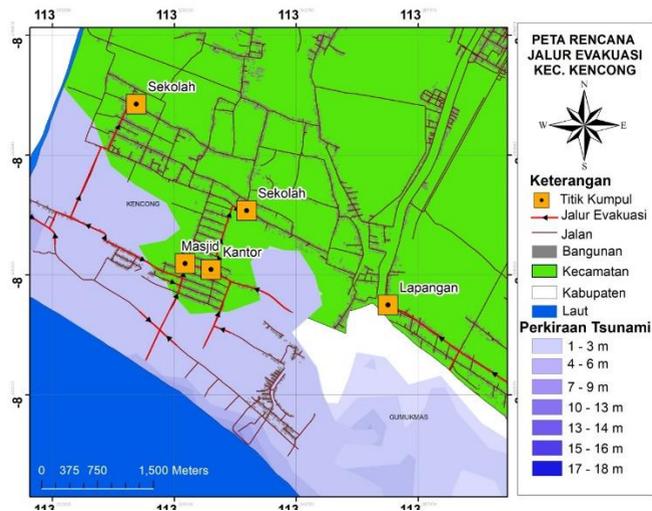
Gambar 4.17 menunjukkan data Ketinggian air dengan nilai maksimum h 7,73 m

Tabel 4.1 Titik Ketinggian air *tsunami*

Titik	Bujur	Lintang	Run-up (m)
h 1	113.3084	-8.3284	5,58
h 2	113.3655	-8.3836	6,55
h 3	113.4168	-8.3983	7,78
h 4	113.5503	-3.4544	6,20
h 5	113.6055	-8.4555	7,83
H 6	113.6944	-8.5081	7,73

3. Rencana Jalur Evakuasi

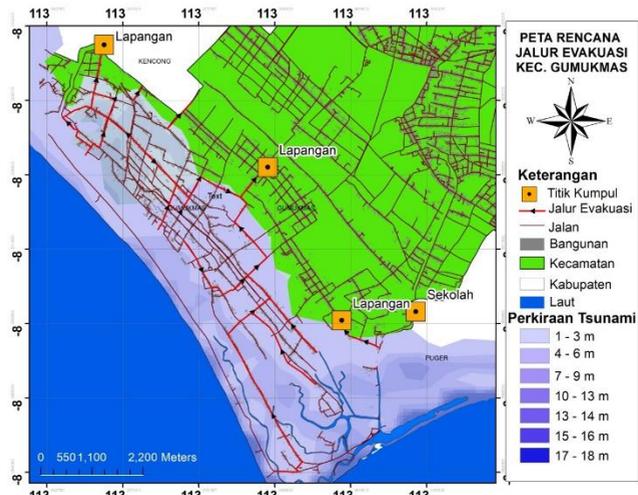
Gambar 4.18-4.21 menunjukkan jalur evakuasi untuk kota Jember dibagi menjadi 4 peta jalur. Evakuasi dilakukan dengan menjauhi pantai menuju dataran yang lebih tinggi atau daerah tidak terendam bagian barat, utara, Timur Kota Jember. Titik kumpul (simbol kuning garis hitam) berupa sekolah, masjid, lapangan, dan gedung pemerintahan. Data titik kumpul ditampilkan dalam Lampiran 1.



Gambar 4.18 Peta Rencana jalur Evakuasi Kecamatan Kencong

Gambar 4.18 menunjukkan 4 tempat titik Kumpul, yaitu Masjid, Sekolah, Kantor desa dan Lapangan. Jika terjadi tsunami masyarakat dapat bergerak ke arah

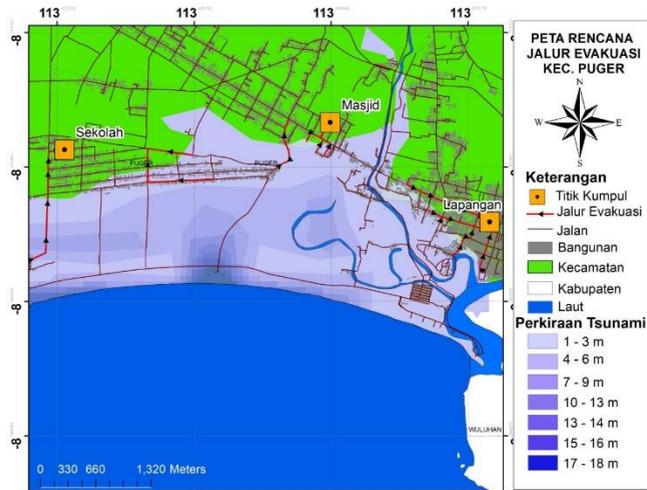
barat, utara menuju titik kumpul Majid Baitussalam dan Kantor desa Paseban yang berada di Jalan Kyai Nasrini. Kedua dapat menuju titik kumpul SDN 03 cakru yang berada di desa Cakru. Ketiga dapat menuju arah barat menuju titik kumpul SDN Cakru 02 yang berada di Jalan Sidomulyo paseban Kencong.



Gambar 4.19 Peta Rencana jalur Evakuasi Kecamatan Gumukmas

Gambar 4.19 menunjukkan 2 tempat titik kumpul, yaitu Lapangan Mayangan dan Lapangan Kalimantan. Jika terjadi tsunami masyarakat dapat bergerak ke arah barat dengan melewati Jalan Diponegoro dan Jalan An-Nisa Untuk menuju Lapangan Mayang. Saat dikawasan di Desa Mayangan, dan desa yang berada pada perbatasan Kecamatan Puger jika terjadi

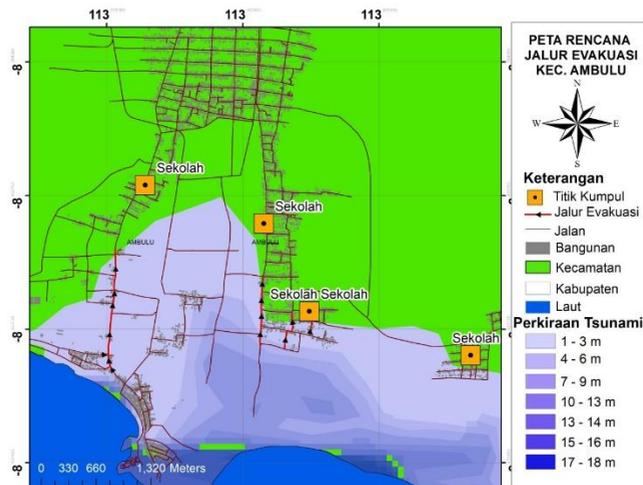
tsunami masyarakat dapat bergerak ke arah barat ke Jalan Tambak udang menuju Lapangan Mayangan atau menuju dataran tinggi.



Gambar 4.20 Peta Rencana jalur Evakuasi Kecamatan Puger

Gambar 4.20 menunjukkan 4 titik kumpul, yaitu lapangan/ alun-alun Puger, Sekolah, masjid At-taqwa, dan Puskesmas Saat di Kawasan desa Puger Wetan, Jika terjadi tsunami masyarakat dapat bergerak ke arah utara terdapat Jalan Pantai timur, Jalan Pantai bar, dan Jalan kali ba'an menuju Jalan Pantai, kemudian ke titik kumpul lapangan atau alun-alun yang berada di Jalan Mayor Adi Dharma. Saat berada di Kawasan Desa krajan jika terjadi tsunami masyarakat dapat bergerak ke arah Timur Menuju

Jalan Ketut Adi Sanyoto, kemudian menuju Masjid At-taqwa atau ke daratan yang tinggi. Saat di Kawasan desa Jadukan, desa Mojomulyo jika terjadi tsunami masyarakat dapat bergerak ke arah barat terdapat Jalan Jadungan dan komando Tk Dewi Masyito atau menuju tempat yang tinggi.



Gambar 4.21 Peta Rencana jalur Evakuasi Kecamatan Ambulu

Gambar 4.21 menunjukkan 4 titik kumpul, yaitu SDN Sumberejo 05, SDN Sumberejo 03, Tk Al hidayah, dan SDN Sabrang 05. Saat berada di kawasan objek wisata sekitar desa Sumberejo, jika terjadi tsunami masyarakat dapat bergerak ke arah utara ke Jalan Payangan, kemudian bergerak Menuju Jalan Raya Watu Ulo menuju titik kumpul di SDN Sumberejo 05.

Jika terjadi tsunami di desa Sidomulyo masyarakat dapat bergerak ke arah Jalan Sumberejo menuju titik kumpul di TK Alhidayah dan SDN Sumberejo 03. Kemudian jika terjadi tsunami di Desa Sabrang Masyarakat dapat bergerak menuju titik kumpul SDN Sabrang 05 atau dapat ke daratan tinggi dan bergerak ke utara.

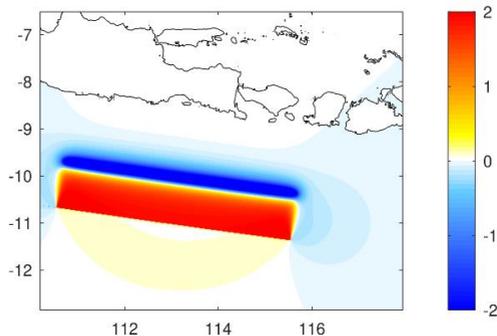
B. Pembahasan

Tsunami dimodelkan menggunakan data batimetri, data topografi dan data parameter gempa. Data batimetri dan data topografi yang digunakan dalam simulasi tersebut diperoleh data batimetri dari GEBCO (General Bathymetric Chart of The Ocean), USGS (United States Geological Survey), dan data topografi dari Digital Elevation Model (DEM Nasional).

COMCOT (Cornell Multi-grid Coupled Tsunami model) merupakan proses pemodelan mensimulasikan gelombang, dari pembangkitan, perambatan dan kenaikan/ penurunan muka air di pesisir (Mendrofa, 2020). Tsunami memiliki periode 100-2000 detik, yang dikenal sebagai jendela tsunami. Gelombang dapat dihasilkan melalui simulasi gelombang solitary, model patahan, longsor, atau muka air laut. Gelombang tsunami dapat disimulasikan menggunakan dengan persamaan air

dangkal seperti persamaan 2.7 (Yanagisawa, 2011). Gempa bumi Banyuwangi 1994 menimbulkan deformasi ketinggian pusat gempabumi yang ditunjukkan dalam gambar 4.21. Daerah yang berwarna merah menunjukkan terjadinya pengangkatan atau kenaikan permukaan air laut.

Pengolahan data dapat diketahui bahwa pengaruh ketinggian suatu wilayah dan kemiringan pantai cukup signifikan terhadap luas daerah jangkauan tsunami. Data titik pengukuran, didapatkan *tim series* tinggi gelombang tsunami. Waktu tempuh yang dihasilkan merupakan 37,8 menit dengan ketinggian air tsunami 12 m.



Gambar 4.22 Deformasi ketinggian pusat gempabumi

Nilai run-up yang dihasilkan tergantung pada jarak dari pusat gempa ke daerah yang terkena, tetapi juga dipengaruhi oleh beberapa faktor lain seperti bentuk topografi, Batimetri, dan tinggi gelombang. Bencana

tersebut akan diikuti adanya refreksi, refleksi, dan difraksi yang mengakibatkan tsunami berdampak tinggi. Saat gelombang dangkal mendekati pantai, kecepatan gelombang melambat, yang dikompensasi oleh pemendekan periode gelombang dan peningkatan gelombang yang menyertainya. Hal ini akan semakin meningkatkan ketinggian run-up tsunami.

Mitigasi bencana merupakan serangkaian upaya mengurangi resiko bencana. Tujuan evakuasi adalah langsung menuju titik kumpul seperti sekolah, balai desa, lapangan, rumah sakit atau lahan yang cukup lebar. Berdasarkan analisis pemodelan gelombang tsunami menunjukkan peta jalur evakuasi terdapat 4 peta jalur evakuasi dengan jumlah 14 titik kumpul. Kecamatan Kencong 4 titik kumpul, Kecamatan Gumukmas 2 titik kumpul, Kecamatan Puger 4 titik kumpul, dan Kecamatan Ambulu 4 titik kumpul.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan, maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Pemodelan tsunami dengan data gempa banyuwangi 1994 menghasilkan ketinggian gelombang 12 m dengan waktu tempuh 37,8 menit setelah terjadinya gempa.
2. Ketinggian gelombang tsunami hasil pemodelan bervariasi. Ketinggian gelombang di Kecamatan Kencong mencapai 5,85 m, Kecamatan Wuluhan 6,20 m, Kecamatan Gumukmas 6,55 m, Kecamatan Puger 7,78 m, Kecamatan Tempurejo 7,73 m dan Kecamatan Ambulu 7,83 m.
3. Hasil pemodelan tsunami menghasilkan 4 peta dengan jumlah 14 titik kumpul di pesisir pantai Jember terbagi menjadi 4 Kecamatan yaitu Kecamatan Kencong, Kecamatan Gumukas, Kecamatan Puger, dan Kecamatan Ambulu.

B. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan kendala yang dihadapi, penulis menyarankan sebagai berikut:

1. Perlu diperhatikan dalam data parameter gempa yang pernah terjadi sesuai dengan tujuan yang akan dicapai.
2. Perlu menambahkan skenario tsunami dengan mempertimbangkan riwayat gempa yang pernah ada dan yang mungkin terjadi di masa mendatang.
3. Diperlukan penelitian lebih lanjut di daerah rawan bencana, terutama tsunami dan metode mitigasi yang tepat.

DAFTAR PUSTAKA

- Adha, I., Kurniasih, A., Nugroho, H., & Rachwibowo, P. (2018). Kajian Analisis Sesar di Perbukitan Jiwo Barat, Kecamatan Bayat, Kabupaten Klaten, Jawa Tengah. *Jurnal Geosains dan Teknologi*, 1(1), 8-18.
- Alfaris, L., Baswantara, A., & Suhernalis, S. (2020). Analisa Numerik Tsunami Pangandaran Dan Implikasinya Terhadap Mitigasi Bencana. *MARLIN*, 1(1), 39-45.
- Aperus, R., Pujiastuti, D., & Billyanto, R. (2016). Pemodelan Tinggi dan Waktu Tempuh Gelombang Tsunami Berdasarkan Data Historis Gempa Bumi Bengkulu 4 Juni 2000 di Pesisir Pantai Bengkulu. *Jurnal Fisika Unand*, 5(4), 364-370.
- An, C., Sepúlveda, I., & Liu, P. L. F. (2014). Tsunami source and its validation of the 2014 Iquique, Chile, earthquake. *Geophysical Research Letters*, 41(11), 3988-3994.
- Baskara, B., Sukarasa, I. K., & Septiadhi, A. (2017). Pemetaan Bahaya Gempa Bumi Dan Potensi Tsunami Di Bali Berdasarkan Nilai Seismisitas. *Buletin Fisika*, 18(1), 20-26.
- Chaeroni, W. Hendriyono dan W. Kongko. 2013. Pemodelan Tsunami dan Pembuatan Peta Mitigasi di Teluk Teleng Pacitan. *Jurnal Penanggulangan Bencana*, 4(2): 23 – 33
- Departemen Geofisika BMKG. (2019). Katalog Tsunami Indonesia pada website departemen BMKG <https://www.bmkg.go.id/gempabumi/katalog-gempabumi-signifikan.bmkg> diakses pada tanggal 05 November 2021 pukul 03:45 WIB
- Dewi, R. S. (2019). Mitigasi Bencana Pada Anak Usia Dini. *Early Childhood: Jurnal Pendidikan*, 3(1), 68-77

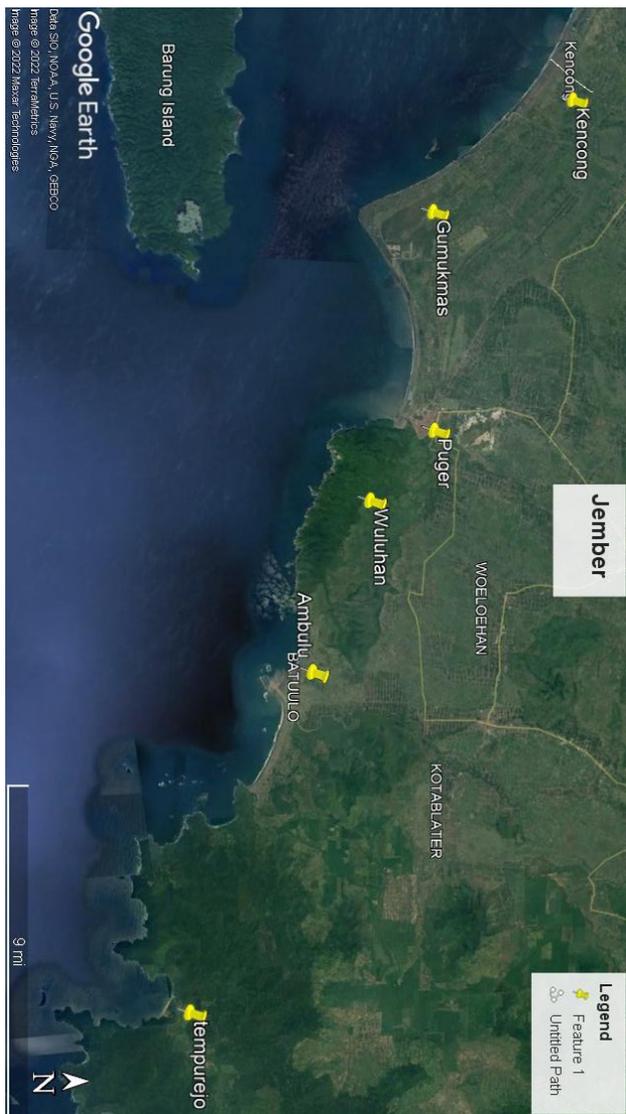
- Diposapto S., dan Budiman. 2006. Tsunami. Buku Ilmiah Populer, Jakarta.
- Faiqoh, I., Gaol, J. L., & Ling, M. M. (2013). Vulnerability level map of tsunami disaster in Pangandaran Beach, West Java. *International Journal of Remote Sensing and Earth Sciences (IJReSES)*, 10(2).
- Hadi, S., Heni, S., & Totok, Y. (2019). Identification of tsunami hazard potentials in candidate of NPP site in Rakit Island, Kec. Plampang, Sumbawa Besar, NTB.
- Imamura, F., Yalciner, A. C., dan Ozyurt, G., 2006, Tsunami Modelling Manual (Tsunami model).
- Intergovernmental Oceanographic Commission. (2014). International Tsunami Survey Team (ITST) Post-Tsunami Survey Field Guide. In *IOC Manuals and Guides* (Vol. 37). UNESCO France.
- Jannah, I. N., Anggono, T., & Yulianto, T. (2016). Aplikasi Metode Double Difference Dalam Relokasi Hiposenter Untuk Menggambarkan Zona Transisi Antara Busur Banda dan Busur Sunda. *Youngster Physics Journal*, 5(3), 113-122.
- Jayadi, H., & Soehaimi, A. (2016). Analisis Seismotektonik Untuk Penanggulangan Daerah Rawan Bencana Gempa Bumi. *Jft: Jurnal Fisika dan Terapannya*, 3, 110-116.
- Kongko, W., & Schlurmann, T. (2010). The Java tsunami model: using highly-resolved data to model the past event and to estimate the future hazard. In *Proceedings of the Coastal Engineering Conference (2010)*. Reston: American Society of Civil Engineers.
- Kurniawan, T., & Laili, A. F. (2019). Penentuan Area Terdampak" Ketinggian Maksimum Tsunami" di Pulau Bali Berdasarkan Potensi Gempabumi Pembangkit Tsunami Pada Segmen Megathrust Sumba. *Jurnal Dialog dan Penanggulangan Bencana*, 10(1), 93-104.
- Laksono, F. A. T., Widagdo, A., Aditama, M. R., Fauzan, M. R., & Kovács, J. (2022). Tsunami Hazard Zone and Multiple

- Scenarios of Tsunami Evacuation Route at Jetis Beach, Cilacap Regency, Indonesia. *Sustainability*, 14(5), 2726.
- Li, L., Qiu, Q., & Huang, Z. (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. *Natural hazards*, 64(2), 1549-1574.
- Mansinha, L., & Smylie, D.E., (1971): The displacement fields of inclined faults. *Bull Seismol. Soc.Am.*, 61, 1433-1440
- Muqoddas, Muhammad Mahfud. (2018). Skripsi *Pengaruh Kekasaran Manning Terhadap Pemodelan Inundasi Di Cilacap*. Tangerang: Program Diploma IV Geofisika Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi Dan Geofisika Tangerang Selatan.
- Mutmainah, H., Christiana, D. W., & Kusumah, G. (2016). Tsunami Mentawai 25 Oktober 2010 (Simulasi Comcot 1.7) Dan Dampaknya Kini Terhadap Pantai Barat Mentawai. *Jurnal Kelautan: Indonesian Journal of Marine Science and Technology*, 9(2), 175-187
- Nandasari, P. L. (2020). Penentuan Tegangan Normal Di Sekitar Sesar Flores Menggunakan Software Stressinverse. *Inovasi Fisika Indonesia*, 9(2), 125-132.
- Nasir, M., Ikhsan, M., & Amir, A. (2018). Estimasi Waktu Dan Tinggi Gelombang Tsunami Di Lhok Kruet Kabupaten Aceh Jaya. *Jurnal Teknik Sipil dan Teknologi Konstruksi*, 1(1).
- Okada, Y. (1985), Surface deformation due to shear and tensile faults in a half-space, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 75(4), 1135-1154
- Pandey, F., Pasau, G., & Tongkukut, S. H. (2015). Simulasi Penjalaran Tsunami Di Beberapa Pantai Di Sulawesi Utara Sebagai Upaya Mitigasi Bencana. *Jurnal MIPA*, 4(2), 103-107.
- Pratama, W. A. (2017). *Simulasi Penjalaran Gelombang Tsunami Akibat Gempa Tektonik di Pantai*

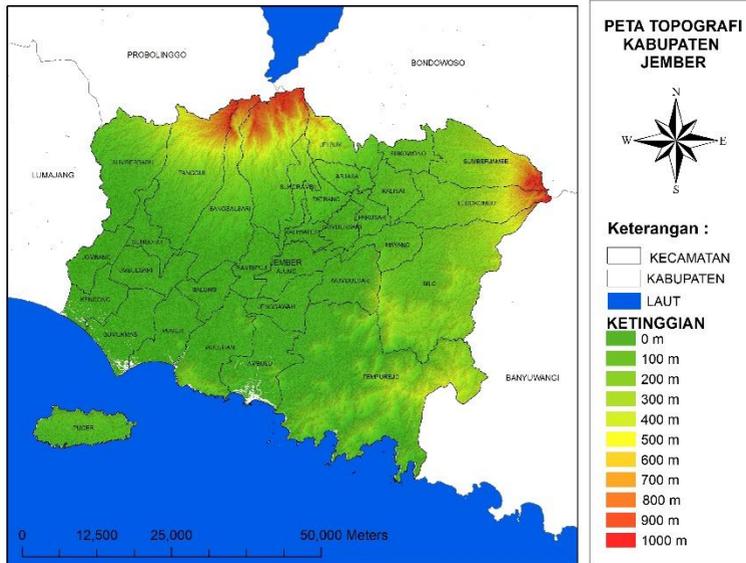
- Jember* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
- Prasetya G, Wang X, Palmer N, Grant G. 2013. Tsunami Inundation Modelling For Riverton and New River Estuary Southland. GNS Science Consultancy Report. pp87
- Purnama, A. A. D. S., Paramarta, I. A. B., & Rahman, M. S. S. (2019). Estimasi Run Up dan Waktu Tiba Tsunami di Daerah Bali Berdasarkan Simulasi TOAST. *Buletin Fisika*, 20(1), 29-35.
- Purwasih, R. R. I. (2011). Studi Identifikasi Gempa Bumi Pembangkit Tsunami di Selatan Pulau Jawa Periode 2005-2009.
- Puspito, Nanang T, 2010. Mengelola Resiko Bencana Di Daerah Maritim, Jurusan Geofisika dan Meteorologi ITB, Bandung
- Rahmawati, N. I. (2017). *Pemodelan Tsunami di Sekitar Laut Banda dan Implikasi Inundasi di Area Terdampak* (Doctoral dissertation, Institut Teknologi Sepuluh Nopember).
- Saputri, M. A. P. (2020). Pengaruh Karakteristik Pantai Terhadap Risiko Tsunami di Pesisir Kota Bengkulu.
- Sari, P. M., Ahyuni, A., & Purwaningsih, E. (2014). Daya Tampung Shelter Evakuasi Tsunami di Universitas Negeri Padang Air tawar Barat: Studi kasus untuk Masyarakat di dalam Lingkungan Kampus Universitas Negeri Padang Air Tawar Barat. *Jurnal Geografi*, 3(1), 64-73.
- Setyowidodo, I. (2015). Inversi waveform tiga komponen gempa bumi tanggal 10 Januari 2010 dan 18 Mei 2010 untuk menentukan pola bidang patahan yang berkembang di pulau Jawa melalui analisis momen tensor. *Nusantara of Research: Jurnal Hasil-hasil Penelitian Universitas Nusantara PGRI Kediri*, 2(2).

- Sulistiawaty, S., Tiwow, V. A., & Saleh, S. (2020, November). Mitigasi Bencana Gempabumi dan Tsunami. In *Seminar Nasional Pengabdian Kepada Masyarakat*.
- Susanto, E., Arsyad, M., Subaer, S., & Setyahagi, A. R. (2020, May). Pemodelan Waktu Tiba Gelombang Tsunami di Wilayah Pesisir Provinsi Sulawesi Barat. In *Prosiding Seminar Nasional Fisika PPs Universitas Negeri Makassar* (Vol. 2, pp. 80-83).
- Sutrisnawati, N. K. (2018). Dampak bencana alam bagi sektor pariwisata di Bali. *Jurnal Ilmiah Hospitality Management*, 9(1), 57-66.
- Umami, L. D. (2020). *Pengaruh Variasi Peninggian Kaki Bangunan (Piloti Building) Terhadap Kedalaman Aliran Dan Gaya Tsunami The Impact of Piloti Building on Flow Depth and Tsunami Force* (Doctoral dissertation, Universitas Mataram).
- Wanda, G. R. (2018). *Pemetaan Jalur Evakuasi Tsunami Dengan Metode Network Analisis (Studi Kasus: Kota Maumere)* (Doctoral Dissertation, Itn Malang).
- Wardani, L. (2018). *Perkiraan Daerah Rawan Tsunami Di Pesisir Kota Mataram Berdasarkan Skenario Gempa Di Lepas Pantai Utara Lombok Approximation Of Tsunami-Prone Areas In The Coastal City Of Mataram Based On The Earthquake Scenario On The North Coast Of Lombok* (Doctoral dissertation, Universitas Mataram).
- Wells, D., dan Coppersmith, K., 1994, New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 4, 84, 974-1002
- Yanagisawa, H. (2011). Numerical Simulation of Tsunami and its Application. *Tohoku-Gakuin University, Tohoku*.

LAMPIRAN 1 Lokasi Penelitian



LAMPIRAN 2 Peta Topografi Kabupaten Jember



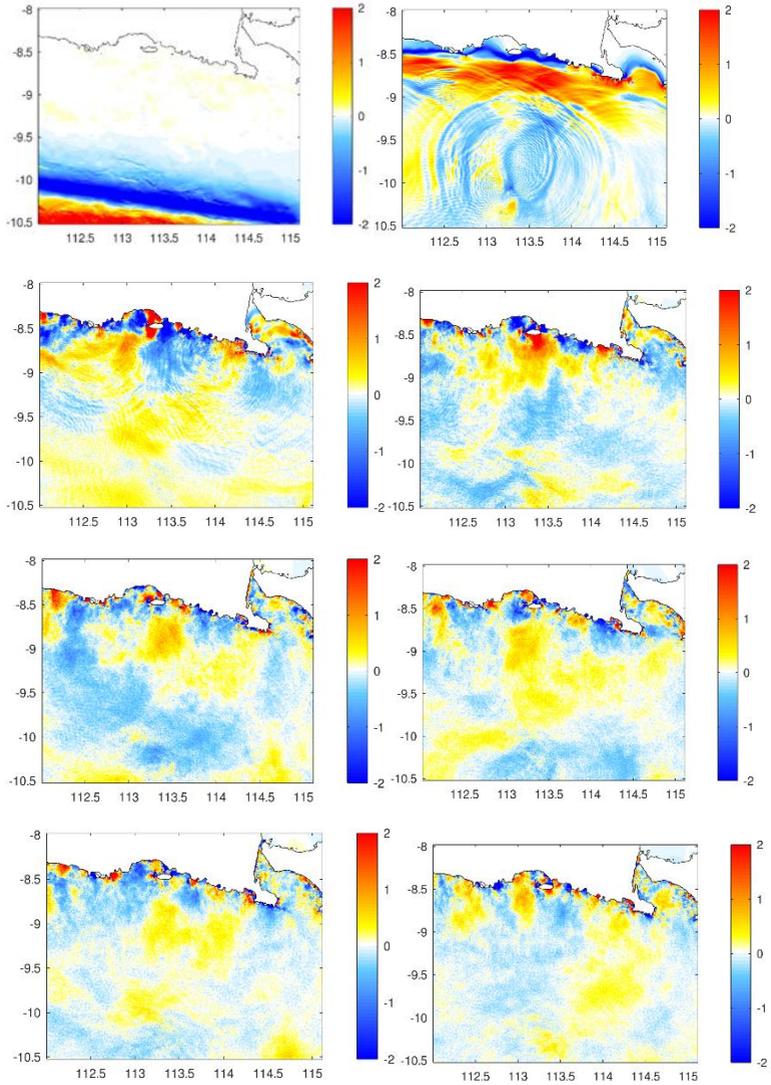
LAMPIRAN 3 Titik kumpul evakuasi

Bujur	Lintang	Nama	Alamat	Mdpl (m)
- 8.2876 6	113.3231 19	SD Negeri 3 Cakru	Dusun Gondangrejo, Desa Cakru, Kec. Kencong, Kabupaten Jember, Jawa Timur 68167	9,75
- 8.0306 4	113.3292 20	Masjid Baitussala m	Sidomulyo, Paseban, Kec. Kencong, Kabupaten Jember, Jawa Timur 68167	7,62
- 8.0308 1	113.3335 88	Kantor Desa Paseban	Balekambang, Paseban, Kec. Kencong, Kabupaten Jember, Jawa Timur 68167	5,48
- 8.3002 9	113.3364 77	SD Negeri 03 Cakru	Gondangrejo, Cakru, Kec. Kencong, Kabupaten Jember, Jawa Timur 68167	9,72
- 8.3347 6	113.3859 94	Lapangan Mayangan	Muneng, Mayangan, Kec. Gumukmas, Kabupaten Jember, Jawa Timur 68165	9,44
- 8.3654 3	113.3998 73	Lapangan Kalimalan g	Unnamed Road, Kalimalang, Mayangan, Kec. Gumukmas, Kabupaten	6,29

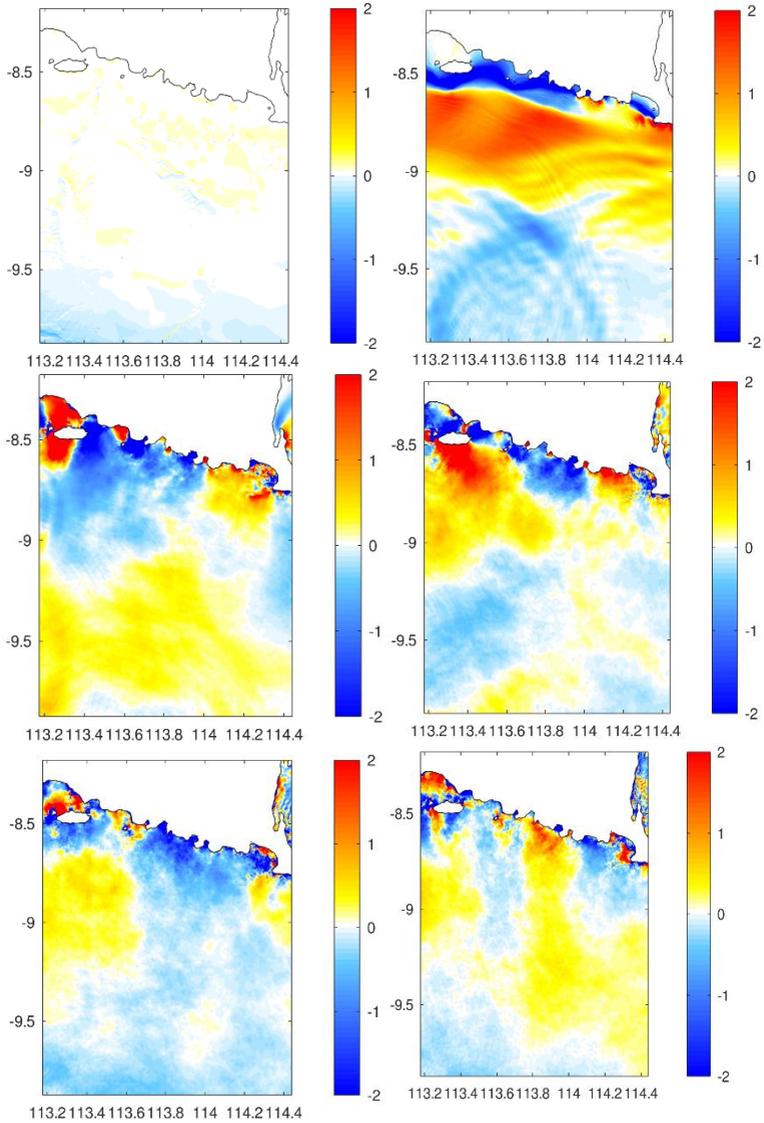
- 8.3619 7	113.4310 35	TK Dewi Masyithoh 70	Jember, Jawa Timur 68165 Kalimalang, Mojomulyo Kec. Puger, Kabupaten Jember, Jawa Timur 68164	8,53
- 8.3628 0	113.4143 23	Masjid At- taqwa mojosari	Krajan, Mojosari Kec. Puger Kabupaten Jember, Jawa Timur 68164	6,09
- 8.3638 3	113.4314 62	TK Dewi Masyithoh 80	jadukan rt 002 rw 025 mojosari pujer Jadukan, Mojosari Kec. Puger Kabupaten Jember, Jawa Timur 68164	9,44
- 8.3712 0	113.4747 78	Lapangan /alun-aun	Kauman, Puger Kulon Kec. Puger	5,88
- 8.4072 6	113.5825 19	SDN Sumberej o 05	Curah Rejo, Sumberrejo Kec. Ambulu Kabupaten Jember, Jawa Timur 68172	7,94
- 8.4211 4	113.5980 76	TK Al hidayah 78	Sidomulyo, Sumberrejo Kec. Ambulu Kabupaten Jember, Jawa Timur 68172	7,90

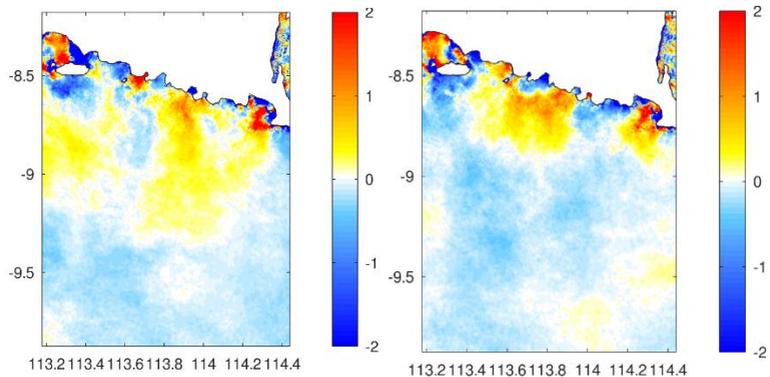
- 8.4117 6	113.5953 32	SDN Sumberej o 03	Sido Mulyo, Sumberrejo Kec. Ambulu Kabupaten Jember, Jawa Timur 68172	8,53
- 8.4260 4	113.6177 90	SDN Sabrang 05	Kebonsari, Sabrang Kec. Ambulu Kabupaten Jember, Jawa Timur 68172	7,62

Lampiran 4 Simulasi penjalaran grid/layer 2



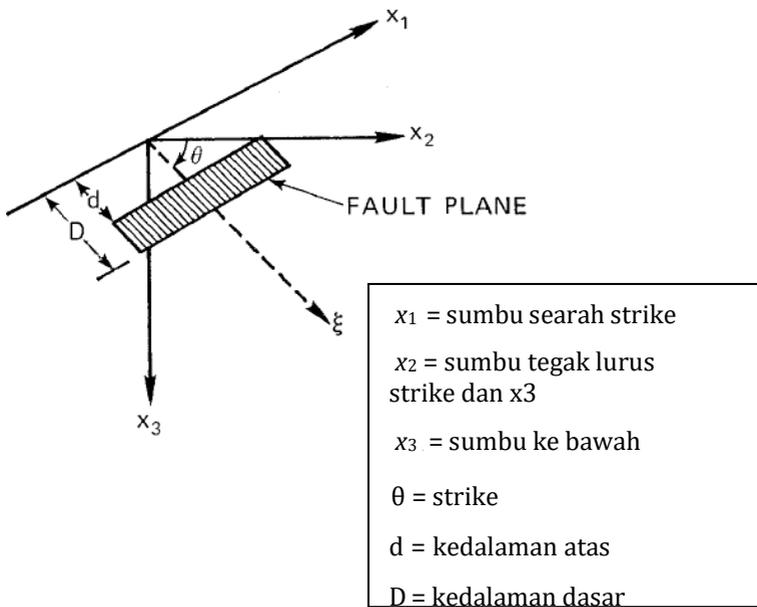
Lampiran 5 Simulasi penjalaran grid/layer 3





Lampiran 6 Deformasi Vertikal

Deformasi yang terjadi di lantai samudera ditarik ke permukaan laut untuk menjadi input dalam pemodelan tsunami. Deformasi yang digunakan dalam penelitian ini menggunakan program yang dibuat oleh Imamura berdasarkan persamaan elastisitas dalam Mansinha dan Smylie (1971).



Gambar Geometri sesar dan system koordinat
(Mansinha dan Smylie, 1971)

Persamaan Volterra menunjukkan medan deformasi (*displacement field*) yang disebabkan oleh dislokasi Δu_j sepanjang Σ pada *half-space* elastic seragam:

$$u_i = \int_{\Sigma} \Delta u_j \left[\delta_{jk} \lambda \frac{\partial u_i^l}{\partial \xi_l} + \mu \left(\frac{\partial u_i^j}{\partial \xi_k} + \frac{\partial u_i^k}{\partial \xi_j} \right) \right] V_k d\Sigma$$

Keterangan:

v_k = arah vector normal bidang Σ

λ = lebar sesar (km)

μ = konstanta Lamé

u_i^j = komponen dislokasi ke-I pada (x_1, x_2, x_3) akibat sumber titik pada (ξ_1, ξ_2, ξ_3) yang bekerja pada arah j

Dengan slip bidang persegi Mansinha dan Smylie menunjukkan deformasi untuk strike-slip fault (dislokasi U_1 searah sumbu x_1) menjadi:

$$u_i = uU_1 \int_{\Sigma} \left[\left(\frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_1} \right) \sin \theta - \left(\frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_1} \right) \cos(\theta) \right] d\Sigma$$

Dan untuk dip-slip fault (dislokasi U searah sumbu ξ)

$$u_i = uU \int_{\Sigma} \left[\left(\frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_3} \right) \sin(2\theta) - \left(\frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_2} \right) \cos(2\theta) \right] d\Sigma$$

Dengan menggunakan system koordinat ξ , dimana permukaan bidang sesar berada pada kisaran $-L \leq \xi_1 \leq L$ dan $-d \leq \xi \leq D$ maka persamaan *Strike-slip* menjadi:

$$u_i = uU_1 \int_d^D \int_{-L}^L \left[\left(\frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_1} \right) \sin(\theta) - \left(\frac{\partial u_i^1}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_1} \right) \cos(\theta) \right] d\xi_1 d\xi$$

Dan untuk *dip-slip*

$$u_i = uU_1 \int_d^D \int_{-L}^L \left[\left(\frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_2} + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_3} \right) \sin(2\theta) - \left(\frac{\partial u_i^2}{\partial \xi_3} + \frac{\partial u_i^3}{\partial \xi_2} \right) \cos(2\theta) \right] d\xi_1 d\xi$$

Hasil integrasi untuk deformasi vertical (arah x_3) untuk *skrike-slip*:

$$\begin{aligned}
 12\pi \frac{u_3}{U_1} &= \cos \theta [\ln(R + r_3 - \xi) + (1 + 3 \tan^2 \theta) \ln(Q + q_3 + \\
 &\xi) - 3 \tan \theta \sec \theta \ln(Q + x_3 + \xi_3)] + \frac{2r_2 \sin \theta}{R} + \\
 2 \sin \theta \frac{q_2 + x_2 \sin \theta}{Q} - \frac{2r_2^2 \cos \theta}{R(R+r_3-\xi)} + \\
 \frac{4q_2 \sin^2 \theta - 2(q_2 + x_2 \sin \theta)(x_3 + q_3 \sin \theta)(x_3 q_3 \sin \theta)}{Q(Q+q_3+\xi)} + \\
 4q_2 x_3 \sin \theta \frac{[(x_3 + \xi_3) - q_3 \sin \theta]}{Q^3} - 4q_2^2 q_3 x_3 \cos \theta \sin \theta \frac{(2Q + q_3 + \xi)}{Q^3(Q+q_3+\xi)^2}
 \end{aligned}$$

Hasil Integrasi untuk deformasi vertical (arah x_3) untuk dip *slip*:

$$\begin{aligned}
 12\pi \frac{u^3}{U} &= \sin \theta \left[(x_2 + \xi_2) \left\{ \frac{2(x_3 - \xi_3)}{R(R+x_1-\xi_1)} + 4 \frac{x_3 - \xi_3}{Q(Q+x_1+\xi_1)} - \right. \right. \\
 &4\xi_3 x_3 (x_3 + \xi_3) \left. \left. \left(\frac{2Q+x_1+\xi_1}{Q^3(Q+x_1+\xi_1)^2} \right) \right\} - 6 \tan^{-1} \left\{ \frac{(x_1 - \xi_1)(x_2 + \xi_2)}{(h+x_3+\xi_3)(Q+h)} \right\} + \right. \\
 &3 \tan^{-1} \left\{ \frac{(x_1 - \xi_1)(r_3 + \xi)}{r_2 R} \right\} - 6 \tan^{-1} \left\{ \frac{(x_1 + \xi_1)(q_3 + \xi)}{q_2 Q} \right\} \left. \right] + \cos \theta \left[\ln(R + \right. \\
 &x_1 + \xi_1) - \ln(Q + x_1 + \xi_1) - 2 \frac{(x_3 + \xi_3)^2}{R(R+x_1+\xi_1)} - 4 \frac{\{(x_3 + \xi_3)^2 - \xi_3 x_3\}}{Q(Q+x_1+\xi_1)} - \\
 &4\xi_3 x_3 (x_3 + \xi_3)^2 \left. \left(\frac{2Q+x_1+\xi_1}{Q^3(Q+x_1+\xi_1)^2} \right) \right] + 6x_3 \left[\cos \theta \sin \theta \left\{ \frac{2(q_3 + \xi)}{Q(Q+x_1+\xi_1)} + \right. \right. \\
 &\left. \left. \frac{x_1 + \xi_1}{Q(Qq_3 + \xi)} \right\} - q_2 \frac{\sin^2 \theta \cos^2 \theta}{Q(Q+x_1+\xi_1)} \right]
 \end{aligned}$$

Dengan penyingkatan:

$$\begin{aligned}
 R^2 &= (x_1 - \xi_1)^2 + (x_3 + \xi_3)^2 + (x_3 - \xi_3)^2 = (x_1 - \xi_1)^2 + \\
 &r_2^2 + (r_1 - \xi)^2 \\
 Q^2 &= (x_1 - \xi_1)^2 + (x_3 + \xi_3)^2 + (x_3 - \xi_3)^2 = (x_1 - \xi_1)^2 + \\
 &q_2^2 + (q_1 - \xi)^2 = (x_1 - \xi_1)^2 + h^2 = k^2(q_3 - \xi)^2
 \end{aligned}$$

$$r_2 = x_2 \sin(\theta) - x_3 \cos(\theta)$$

$$r_3 = x_2 \cos(\theta) - x_3 \sin(\theta)$$

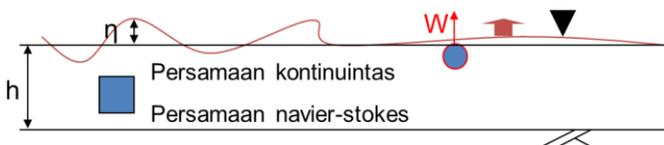
$$q_2 = -x_2 \sin(\theta) - x_3 \cos(\theta)$$

$$q_3 = -x_2 \cos(\theta) - x_3 \sin(\theta)$$

Lampiran 7 Penurunan Persamaan Penggerak Tsunami

Tsunami diklasifikasikan sebagai gelombang panjang karena perbandingan antara kedalaman air terhadap panjang gelombang sangat kecil, sehingga percepatan vertikal dari partikel air dapat diabaikan dan orbit dari partikel sangat kecil. Kemudian kecepatan horizontal dari air dianggap seragam secara vertikal.

1. Gelombang panjang (tinggi gelombang \ll panjang gelombang)
 2. Percepatan vertikal dari partikel air $\cong 0$ (Kecepatan horizontal adalah konstan secara vertikal)
 3. Tekanan air adalah tekanan gravitasi
- A. Persamaan Batas:
1. Batas Permukaan ($Z = \eta$)



Kondisi batas dinamis

$$p_{surface} = 0$$

Kondisi batas kinematis

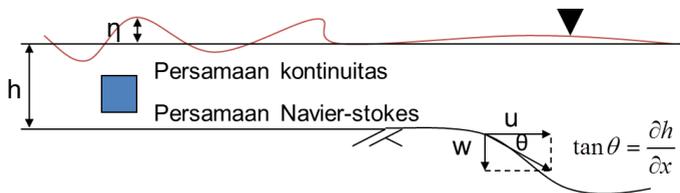
$$\left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + u_{surface} \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) \Delta t = w_{surface} \Delta t$$

$$w_s = \left(\frac{\partial \eta_s}{\partial t} + u_s \frac{\partial \eta_s}{\partial x} \right)$$

u : kecepatan air arah horizontal (m/s)
 w : kecepatan air arah vertical (m/s)
 p : tekanan air (Pa)
 g : percepatan gravitasi (m/s²)
 η : elevasi muka air laut (m)
 h : kedalaman perairan (m)
 D : total kedalaman $D = (h + \eta)$ (m)

2. Batas dasar ($Z = -h$)

Rasio antara kecepatan vertikal dan kecepatan horizontal adalah sama dengan gradient kemiringan di dasar



Kondisi Batas Kinematis

$$\tan \theta = \frac{w_b}{u_b} = -\frac{\partial h}{\partial x}$$

M : fluks arah-x = $u \times d$ (m²/s)N

N : fluks arah-y = $v \times d$ (m²/s)

Skripsi

ORIGINALITY REPORT

22%

SIMILARITY INDEX

20%

INTERNET SOURCES

5%

PUBLICATIONS

9%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	repository.its.ac.id Internet Source	4%
2	webblogkn.unsyiah.ac.id Internet Source	2%
3	ojs.unm.ac.id Internet Source	1%
4	repository.ub.ac.id Internet Source	1%
5	ar.scribd.com Internet Source	1%
6	Submitted to Universitas Jenderal Soedirman Student Paper	1%
7	core.ac.uk Internet Source	1%
8	Submitted to Universitas Pertamina Student Paper	1%
9	www.meteo.itb.ac.id Internet Source	1%
10	jfu.fmipa.unand.ac.id Internet Source	1%

DAFTAR RIWAYAT HIDUP

Bahwa yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Sephia Firdaus Dilla
NIM : 1808026003
Tempat, Tanggal Lahir : Bekasi, 25 September 2001
Alamat : Kp. Sukamantri Rt. 001/003 Desa
Sukaraya Kecamatan
Karangbahagia Kabupaten Bekasi.
Jenis Kelamin : Perempuan
Email : sephia587@gmail.com

Riwayat Pendidikan

- SD Negeri Sukaraya 03 (2006-2012)
- SMP Negeri 3 Cikarang Utara (2012-2015)
- SMA Negeri 1 Karangbahagia (2015-2018)

Hormat Saya,

Sephia Firdaus Dilla