



TUGAS AKHIR - MO141326

**SIMULASI PENJALARAN GELOMBANG TSUNAMI
AKIBAT GEMPA TEKTONIK
DI PANTAI JEMBER**

Wahyu Anggi Pratama

NRP. 4313 100 075

Dosen Pembimbing

Dr. Ir. Wahyudi, M. Sc.

Suntoyo, S. T., M. Eng., Ph. D.

DEPARTEMEN TEKNIK KELAUTAN

Fakultas Teknologi Kelautan

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2017



FINAL PROJECT - MO141326

**SIMULATION PROPAGATION OF TSUNAMI WAVE
DUE TO TEKTONIC EARTHQUAKE
IN JEMBER BEACH**

Wahyu Anggi Pratama

NRP. 4313 100 075

Supervisors

Dr. Ir. Wahyudi, M. Sc.

Suntoyo, S. T., M. Eng., Ph. D.

DEPARTEMENT OF OCEAN ENGINEERING

Faculty of Marine Technology

Sepuluh Nopember Institute of Technology

Surabaya

2017

**SIMULASI PENJALARAN GELOMBANG TSUNAMI
AKIBAT GEMPA TEKTONIK
DI PANTAI JEMBER**

TUGAS AKHIR

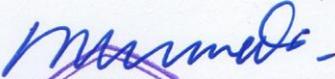
Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar Sarjana Teknik pada
Program S-1 Departemen Teknik Kelautan
Fakultas Teknologi Kelautan
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

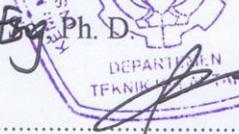
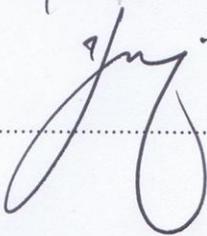
Oleh :

WAHYU ANGGI PRATAMA

NRP. 4313100075

Disetujui Oleh :

1. Dr. Ir. Wahyudi, M. Sc. (Pembimbing I)
.....

2. Suntoyo, S.T., M. Eng., Ph. D. (Pembimbing II)
.....

3. Prof. Ir. Mukhtasor, M. Eng., Ph. D. (Penguji I)
.....

4. Dr. Ir. Hasan Ikhwani, M. Sc. (Penguji II)
.....


Surabaya, Juli 2017

SIMULASI PENJALARAN GELOMBANG TSUNAMI AKIBAT GEMPA TEKTONIK DI PANTAI JEMBER

Nama : Wahyu Anggi Pratama
NRP : 4313 100 075
Departemen : Teknik Kelautan
Dosen Pembimbing : Dr. Ir. Wahyudi, M. Sc.
Suntoyo, S. T., M. Eng., Ph. D.

ABSTRAK

Tsunami adalah salah satu tipe gelombang yang memiliki perbandingan antara panjang gelombang dengan kedalamannya lebih kecil dari 0,005. Gelombang tsunami dapat dibangkitkan salah satunya oleh mekanisme patahan gempa. Berbagai tingkat kekuatan gempa dapat menimbulkan tinggi gelombang tsunami semakin tinggi. Dimodelkan pembangkitan dan penjalaran gelombang tsunami kekuatan Magnitudo gempa yang diperoleh dari perkiraan periode ulang berdasarkan Fisher – Tippet, Weibull ($k=1,4$) dan Weibull ($k=2,0$) sebesar 8,92 SR dengan koordinat dan kedalaman gempa yang terjadi berada di selatan Pantai Jember. Setelah didapat Magnitudo terbesar, kemudian dilakukan perhitungan parameter gempa kemudian dilakukan untuk memperoleh besar patahan. Parameter patahan yang didapat diinputkan pada *DelftDashboard* untuk memperoleh *initial condition* pada tsunami yang terjadi. Penyesuaian aliran dan penentuan waktu dari penjalaran gelombang tsunami dari titik episentrum menuju daratan dilakukan secara manual dan diperoleh waktu penjalaran untuk permodelan sebesar 34 menit. Kemudian setelah dilakukan *running*, pilih beberapa titik yang dilakukan untuk observasi. Lakukan visualisasi dengan menggunakan *Delft3D* diperoleh tinggi *set up* tertinggi dari titik observasi yang dilakukan adalah 5,52 meter tepat pada garis pantai sekitar pantai Watu Ulo Jember.

Kata Kunci : *DelftDashboard*, *Delft3D*, *magnitudo gempa*, *periode ulang*, *Tsunami*.

PROPAGATION SIMULATION OF TSUNAMI WAVE DUE TO TEKTONIC EARTHQUAKE IN JEMBER BEACH

Name : Wahyu Anggi Pratama
Reg. Number : 4313 100 075
Departement : Ocean Engineering
Supervisors : Dr. Ir. Wahyudi, M. Sc.
Suntoyo, S. T., M. Eng., Ph. D.

ABSTRACT

Tsunami is one type of wave that has a ratio between the wavelength with water depth smaller than 0.005. Tsunami wave can be generated one of them by earthquake fault mechanism. Various levels of earthquake strength can lead to higher tsunami wave heights. Modeled generation and propagation tsunami wave strength Magnitude of earthquake obtained from return period based on Fisher – Tippet, Weibull ($k=1,4$) and Wibull ($k=2,0$) simulation is 8.92 SR with coordinates and depth of the earthquake that occurred in the south of Jember Beach. After obtaining the largest Magnitude, then calculate the earthquake parameters, obtain a large fault. The fracture parameter obtained is inputted to DelftDashboard to obtain the initial condition of the tsunami. Flow adjustment and timing of the tsunami wave propagation from the epicenter point to the coastal area were calculated manually and obtained propagation time for modeling of 34 minutes. Then after done running, select some point done for observation. Perform visualization using Delft3D obtained the highest set up height from the observation point that is done is 5.52 meters right on the coastline around Watu Ulo Jember beach.

Keyword : *DelftDashboard, Delft3D, magnitude of earthquake, return period, Tsunami.*

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Wr. Wb.

Alhamdulillahirobbil'alamin, segala puji bagi Allah yang telah memberikan kekuatan kepada penulis sehingga bisa menyelesaikan Tugas Akhir (TA) dengan judul “Simulasi Penjalaran Gelombang Tsunami Akibat Gempa Tektonik di Pantai Jember” dalam satu semester. Dengan segala rahmat dan kasih sayangnya juga penulis masih diberi kesempatan untuk menyelesaikan laporan dari apa yang telah penulis lakukan dan dapatkan selama 1 semester mengerjakan Tugas Akhir (TA).

Laporan Tugas Akhir ini dibuat untuk memenuhi persyaratan lulus dalam Studi Kesarjanaan (S-1) di Jurusan Teknik Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan (FTK), Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya. Laporan ini dibuat juga untuk menunjukkan proses pengerjaan dan dokumentasi penulis dalam mengerjakan Tugas Akhir. Tidak menutup kemungkinan bila ada kritik dan saran dari pembaca jika ada kesalahan maupun ketidak telitian dari penulis dimohon untuk partisipasi demi kebermanfaatan dari yang penulis sajikan.

Akhir kata semoga laporan ini bisa bermanfaat dan dapat dijadikan bahan rujukan atau koreksi oleh pihak – pihak yang membahas permasalahan Bencana Alam khususnya tsunami.

Wassalamualaikum Wr. Wb.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

UCAPAN TERIMA KASIH

Dengan terselesaikannya pengerjaan dan Laporan Tugas Akhir ini, penulis ingin mengucapkan terima kasih yang tak terhingga atas bantuan dan dukungan pihak-pihak yang terlibat diantaranya kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan Rahmat dan Kasih Sayang-Nya yang tak terhingga kepada penulis.
2. Bapak Sugianto dan Ibu Murtiningsih selaku kedua orang tua saya, Sindi Dahnasti Pratiwi, Muhammad Nasyar Hidayat, Tiffani Naysila Putri selaku adik – adik penulis yang selalu memberikan doa dan dukungan yang tidak terhingga.
3. Bapak Dr. Ir. Wahyudi, M. Sc. dan Bapak Suntoyo, S. T., M. Eng., Ph. D., selaku dosen pembimbing pertama dan kedua penulis selama pengerjaan Tugas Akhir.
4. Bapak Sujantoko, S. T., M. T., selaku dosen Wali penulis selama berkuliah 4 tahun di ITS.
5. Herman Pratikno, S. T., M. T., Ph. D., selaku Koordinator Tugas Akhir Departemen Teknik Kelautan FTK ITS Surabaya.
6. Dr. Eng. Rudi Walujo Prastianto, S. T., M. T., selaku Ketua Departemen Teknik Kelautan FTK ITS Surabaya.
7. Leonardo Sihombing, selaku partner dalam pengerjaan Tugas Akhir yang telah memberikan banyak pencerahan selama proses pengerjaan Tugas Akhir.
8. Bayu Susatyo, S. T., selaku senior jurusan angkatan 2012 yang telah meminjamkan motornya selama pengerjaan Tugas Akhir.
9. Qistyan Purwa, S. T., selaku senior jurusan angkatan 2010 yang telah bersedia memberikan proses dan langkah – langkah dalam pengerjaan serta format Tugas Akhir tentang tsunami.
10. Penghuni Nginden VI nomor 86 Surabaya yang tidak terhitung lamanya ketika saya pinjam laptop untuk sejenak bermain Dota 2 ketika penat dalam proses pengerjaan Tugas Akhir, maupun barang lain yang sempat saya pakai barangnya.
11. Seluruh teman – teman Departemen Teknik Kelautan angkatan 2013 VALTAMERI yang selalu memberi dukungan selama kuliah.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
LEMBAR PENGESAHAN	iii
ABSTRAK	iv
ABSTRACT	v
KATA PENGANTAR	vi
UCAPAN TERIMA KASIH	vii
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR TABEL	xi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	3
1.3 Tujuan.....	4
1.4 Manfaat	4
1.5 Batasan Masalah.....	4
BAB II TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI	5
2.1 Tinjauan Pustaka	5
2.2 Dasar Teori.....	6
2.2.1 Pengertian Tsunami	6
2.2.2 Proses Pembangkitan Gelombang Tsunami.....	7
2.2.3 Magnitudo Gempa	9
2.2.4 Momen Seismik.....	11
2.2.5 Hubungan Antara Patahan dengan Muka Air Laut	13
2.2.6 Persamaan Gelombang Tsunami	14
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	17
3.1 Diagram Alir Penelitian	17
3.2 Penjelasan Diagram Alir	18
BAB IV ANALISA DAN PEMBAHASAN	21
4.1 Daerah Penelitian	21
4.2 Pengumpulan Data	22

4.2.1 Data Batimetri	22
4.2.2 Data Gempa	23
4.3 Parameter Gempa	23
4.4 Pembangkitan dan Proses Pembentukan Tsunami	24
4.5 Permodelan Menggunakan <i>DelftDashboard</i>	26
4.5.1 Pembuatan <i>Mesh</i>	26
4.5.2 Input Batimetri.....	27
4.5.3 Persiapan Input Data Elevasi.....	28
4.5.4 Input Data Hasil Pengolahan.....	29
4.5.5 <i>Running</i> Data.....	32
4.5.6 Hasil <i>Running</i>	32
4.6 Validasi Model.....	36
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN	39
5.1 KESIMPULAN	39
5.2 SARAN	39
DAFTAR PUSTAKA	41
LAMPIRAN	43

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1 Peta Pantai Watu Ulo Jember	2
Gambar 2.1 Pembentukan Tsunami.....	6
Gambar 2.2 Lempengan tektonik sebelum gempa	8
Gambar 2.3 Lempengan tektonik yang terkena <i>uplift</i>	8
Gambar 2.4 Ketika lempengan sudah turun kembali air laut masih pada cekungan	8
Gambar 2.5 Merambatnya energi menjadi tsunami.....	9
Gambar 2.6 Kriteria Grafik Elevasi Muka Air Laut.....	14
Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian	18
Gambar 4.1 Gambar Batimetri	22
Gambar 4.2 Tampilan Awal <i>DelftDashboard</i>	26
Gambar 4.3 Hasil Grid pada <i>DelftDashboard</i>	27
Gambar 4.4 Menu Input Batimetri pada <i>DelftDashboard</i>	28
Gambar 4.5 Tampilan Menu <i>Open Boundary</i>	28
Gambar 4.6 <i>Open Boundary</i> dari Grid.....	29
Gambar 4.7 Menu Input Nilai Momen Magnitude.....	30
Gambar 4.8 Input Parameter Patahan	31
Gambar 4.9 <i>Initial Condition</i> Tsunami	31
Gambar 4.10 Tampilan <i>Output Water Level 00:00:00</i>	32
Gambar 4.11 Tampilan <i>Output Water Level 00:06:00</i>	33
Gambar 4.12 Tampilan <i>Output Water Level 00:11:00</i>	33
Gambar 4.13 Tampilan <i>Output Water Level 00:14:00</i>	34
Gambar 4.14 Tampilan <i>Output Water Level 00:17:00</i>	34
Gambar 4.15 Tampilan <i>Output Water Level 00:21:00</i>	35
Gambar 4.16 Tampilan <i>Output Water Level 00:27:00</i>	35
Gambar 4.17 Tampilan <i>Output Water Level 00:34:00</i>	36

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Regresi Linier untuk Parameter Gempa	12
Tabel 4.1 Parameter Gempa Banyuwangi.....	25
Tabel 4.2 Hubungan Antara Tinggi Gelombang Episentrum dan Tsunami Pantai	37
Tabel 5.1 Data Parameter Besar Gempa Pembangkit Tsunami	38

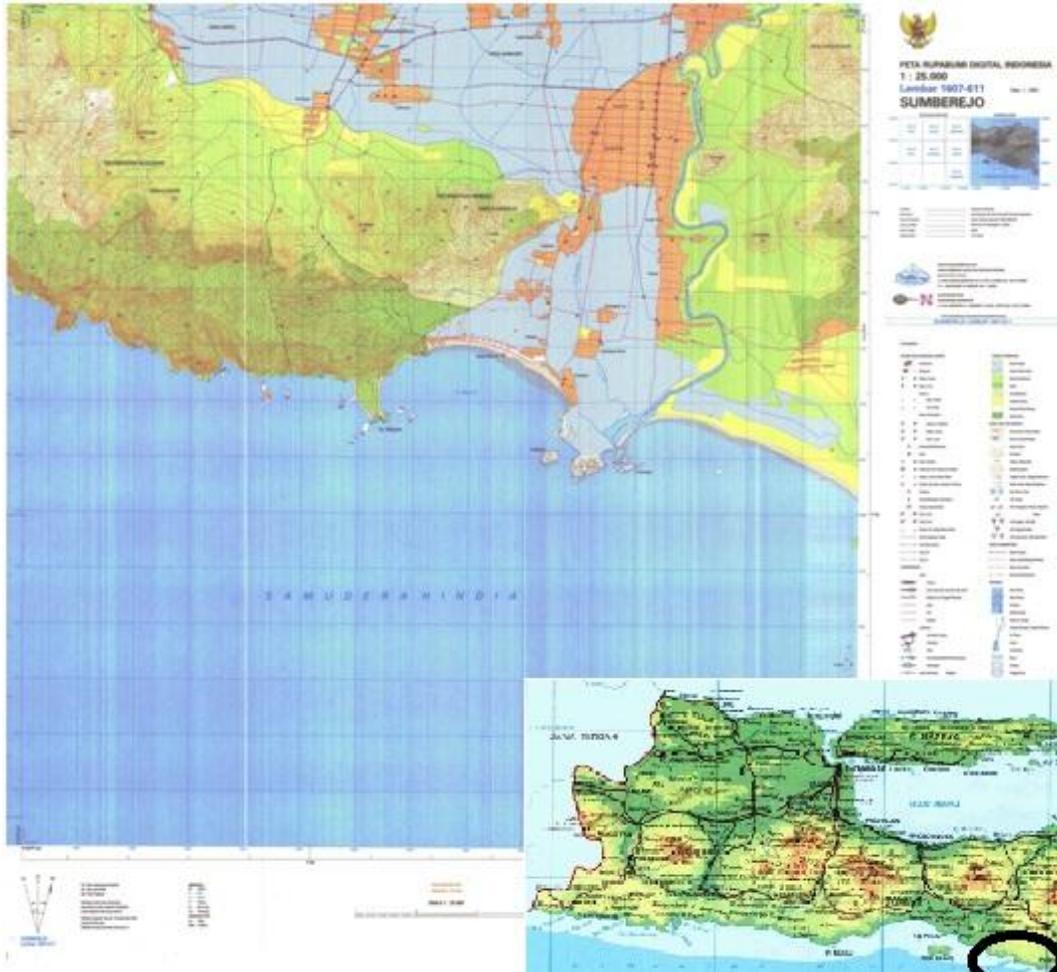
BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara dengan garis pantai terpanjang kedua di dunia, selain menjadi negara dengan pulau terbanyak, dengan panjang 99.093 kilometer, telah bertambah dari sebelumnya sekitar 91.000 kilometer. Dengan panjang garis pantai tersebut memungkinkan Indonesia memiliki banyak pulau, masih sekitar 3.000 pulau di Tanah Air belum memiliki nama atau direkam data koordinatnya, sementara jumlah total pulau Indonesia sekitar 17.000. (antaranews.com, Jumat, 24 Februari 2017 16:20 WIB)

Di Indonesia tsunami terjadi beberapa kali dalam abad terakhir, salah satunya terjadi di Samudra Hindia pada 3 Juni 1994 yang mengakibatkan kerusakan parah di pantai sekitar Banyuwangi. Berbatasan dengan Kabupaten Banyuwangi terdapat Kabupaten Jember yang sama-sama berada di pantai Selatan Jawa, meskipun tidak terlalu parah dampak tsunami pada daerah ini, perlu dilakukan analisa wave run-up sebagai acuan memprediksi kejadian yang tidak diinginkan. Gempa terjadi di Banyuwangi dengan kekuatan gempa mencapai 7 skala Richter dan skala intensitas gempa VIII MMI. Akibat gempa menimbulkan bencana di Rajegwesi, Gerangan, Lampon, Pancer, Pulau Sempu, Grajagan, Pulau Merah, Teluk Hijau, Sukamade, Watu Ulo, Teluk Sipelori dan Teluk Tambakan. Efek tsunami mencapai pantai Banyuwangi, Jember, Malang, Blitar, Tulung Agung, Trenggalek & Pacitan.

Pradjoko dkk (2014) melakukan penelitian yang diberi judul “*The Tsunami Run-up Assesment of 1977 Sumba Earthquake in Kuta, Center of Lombok, Indonesia*”, berdasarkan survei lapangan, hasil kedalaman *run-up* adalah sekitar 1,5 m dengan posisi hampir menutup satu sama lain. Hasil simulasi menunjukkan bahwa tsunami waktu kedatangan sekitar 20 ~ 30 menit. Hasil kedalaman *run-up* dapat diterima dibandingkan dengan hasil survei lapangan, yaitu kedalaman 1,6 m. *Run-up* tsunami mencapai sekitar 300 ~ 800 m pedalaman dari garis pantai. *Run-up* tsunami terjadi di wilayah barat dari Pantai Kuta dan seluruh wilayah Pantai Seger.



Gambar 1.1 Peta Pantai Watu Ulo Jember

(Sumber : Badan Koordinasi Survey dan Pemetaan Nasional)

Sato dan Sawai melakukan penelitian yang dipaparkan pada *Robust Manufacturing Conference (RoMac 2014)* yang diberi judul “*Geographical risk assessment from tsunami run-up events based on socioeconomic-environmental data and its application to Japanese air transportation*”, menghasilkan kesimpulan usulan metode untuk menilai risiko spasial dari *run-up* peristiwa tsunami dan estimasi paparan fisik bandara untuk kerugian akibat tsunami tersebut dan sudut pandang logistik. Metode yang diusulkan didasarkan pada perkiraan 100 orang / km² / tahun di 0,41% dari yang ditimnggali adalah (750.84km²) dari Jepang. Meskipun perkiraan menggunakan data dari run-up katalog tsunami untuk periode Januari 1000 sampai Desember 2010, daerah yang mengalami kerusakan tsunami dari Gempa Besar Jepang Timur pada 11 Maret 2011 termasuk di daerah di mana nilai-nilai besar eksposur fisik diperkirakan.

Maghfiroh dkk dalam jurnal yang berjudul “Simulasi Penjalaran Dan Prediksi *Run-Up* Gelombang Tsunami Di Pantai Malang” dengan hasil permodelan pembangkitan dan penjalaran gelombang tsunami kekuatan Magnitudo gempa yaitu 7,6 Mw, 7,1 Mw dan 6,2 Mw dengan COMCOT dan divisualisaikan dengan menggunakan MATLAB. Dari pemodelan dengan magnitudo gempa 7,6 Mw penjalaran gelombang tsunami mencapai dalam waktu waktu 42 menit, dengan tinggi gelombang tertinggi adalah 6,5 m untuk daerah Pulau Sendang Biru Untuk pemodelan dengan kekuatan gempa 7,1 Mw didapatkan run-up gelombang untuk daerah Pantai Sendang Biru memiliki tinggi gelombang sebesar 1,67m. Sedangkan untuk pemodelan gelombang tsunami dengan kekuatan gempa 6,2 Mw didapatkan tinggi gelombang sebesar 0,08 m untuk daerah Pantai Sendang Biru.

Berdasarkan latar belakang tersebut, dalam penelitian ini kami menggunakan permodelan dengan bantuan DelftDashboard dan Delft3D untuk menganalisa hubungan antara *run-up* dengan kemiringan lereng di Pantai Watu Ulo Jember. Dari hasil analisa ini diharapkan dapat menunjukkan hubungan maksimum *run-up* dengan kemiringan pantai, mengetahui kedalaman run-up gelombang tsunami dan waktu penjalaran dari pantai Watu Ulo Jember menuju pemukiman warga sekitar melalui permodelan dan simulasi numerik dari *run-up* gelombang tsunami itu sendiri serta merencanakan mitigasi yang sesuai dengan kondisi geografi pada daerah tersebut.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dari penelitian ini adalah

1. Bagaimana mengetahui magnitudo terbesar gempa yang mengakibatkan tsunami di pantai Watu Ulo Jember?
2. Bagaimana proses penjalaran tsunami akibat patahan tektonik di pantai Watu Ulo Jember?

1.3 Tujuan

Adapun tujuan yang ingin dicapai dari penelitian ini adalah

1. Mengetahui magnitudo terbesar gempa yang mengakibatkan tsunami di pantai Watu Ulo Jember.
2. Mengetahui proses penjalaran tsunami akibat patahan tektonik di pantai Watu Ulo Jember.

1.4 Manfaat

Adapun manfaat setelah dilakukan penelitian ini adalah untuk memberikan gambaran tentang penjalaran tsunami di pantai Watu Ulo Jember kepada masyarakat dan pemerintah daerah agar selanjutnya dapat dijadikan acuan dalam mitigasi bencana tsunami.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dari penelitian ini adalah

1. Permodelan numerik menggunakan perangkat lunak *DelftDashboard* dan *Delft3D*.
2. Input magnitudo gempa ditentukan dengan memperkirakan periode ulang gempa berdasarkan distribusi Fisher-Tippet, Weibull $k = 1,4$, dan Weibull $k = 2,0$.
3. Parameter sesar dan verifikasi model menggunakan data USGS.
4. Tsunami yang dimodelkan terjadi hanya akibat gempa bumi yang disebabkan oleh patahan pada zona subduksi di Pantai Selatan Jawa.
5. Parameter sasaran mengacu pada kejadian gempa terbesar yang terjadi dekat dengan pantai Watu Ulo Jember.
6. Gelombang laut akibat pasang surut diabaikan.
7. Permodelan gelombang tsunami dilakukan dari tengah laut hingga menyentuh garis pantai.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA DAN DASAR TEORI

2.1 Tinjauan Pustaka

Tsunami sudah terjadi di Indonesia beberapa kali dan menimbulkan banyak kerugian baik harta maupun nyawa. Kejadian seperti ini sangat disayangkan jika terjadi di jaman era modern sekarang, bahwasannya dengan kecanggihan teknologi dan informasi seperti sekarang ini para ahli sudah mampu memprediksi kapan terjadi tsunami. Sehingga konsep perencanaan mitigasi yang dilakukan sudah di rumuskan juga.

Purwa dkk dalam jurnal penelitian yang berjudul “Simulasi Pembangkitan dan Penjalaran Gelombang Tsunami Berdasarkan Skenario Gempa Tektonik” disebutkan bahwa permodelan pembangkitan gelombang tsunami dengan magnitudo gempa 7,833 Mw menghasilkan gelombang berkisar 6 sampai 7 meter di Pantai. Jurnal yang menggunakan data gempa selatan Pulau Jawa 1994-2004 dari BMKG menggunakan simulasi *Monte Carlo* untuk mendapatkan magnitudo gempa yang paling besar untuk dijadikan dasar permodelan pembangkitan gelombang tsunami. Selain besar gelombang yang menjalar di Pantai Damas, dalam jurnal tersebut juga disebutkan bahwa di desa sekitar Pantai Damas juga mengalami penjalaran gelombang berkisar 5-7 meter. Penelitian tersebut juga telah melakukan validasi terhadap penelitian sebelumnya setelah perhitungan dengan menggunakan model, yakni di validasi dengan hasil penelitian oleh Maramai dan Tirinti, 1996. Software yang digunakan dalam penelitian tersebut adalah *Mike 21 Flow Model*.

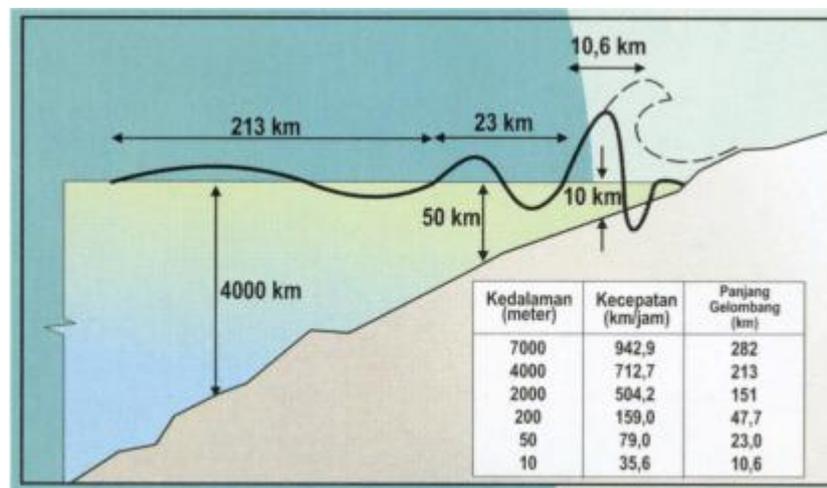
Seperti disebutkan dalam latar belakang Pradjoko dkk yang melakukan penelitian di Kuta, Lombok, Indonesia, penelitian dilakukan dengan melakukan wawancara terlebih dahulu terhadap penduduk sekitar yang masih hidup dan mengalami sendiri kejadian tsunami pada tahun 1977. Survey dilakukan pada 4 Mei 2013 kepada 7 orang dengan usia minimum 57 tahun (21 tahun pada 1977) dan usia maksimum 85 tahun (49 tahun pada 1977). Wawancara menggunakan pedoman UNESCO-IOC untuk mengetahui apa yang dirasakan pada saat terjadi tsunami. Berdasarkan hasil survey didapat 4 jawaban berbeda yang dilakukan

masyarakat di Kuta, Lombok, Indonesia. Saat tsunami terjadi yang dilakukan berdasar survey pada 7 orang tersebut, berlari ke tempat yang lebih tinggi, pulang ke rumah untuk menyelamatkan anak-anak, tetap tinggal di rumah, memanjat pohon.

2.2 Dasar Teori

2.2.1 Pengertian Tsunami

Tsunami adalah rangkaian gelombang laut yang mampu menjalar dengan kecepatan hingga lebih 900 km per jam, terutama diakibatkan oleh gempa bumi yang terjadi di dasar laut.



Gambar 2.1 Pembentukan Tsunami

(Sumber : Departemen Energi dan Sumber Daya Mineral)

Kecepatan gelombang bergantung pada kedalaman air laut. Di laut dengan kedalaman 7000 m misalnya, kecepatannya bisa mencapai 942,9 km/jam. Kecepatan ini hampir sam dengan kecepatan pesawat jet. Namun demikian tinggi gelombangnya di tengah laut tidak lebih dari 60 cm. Akibatnya kapal-kapal yang sedang berlayar di atasnya jarang merasakan adanya tsunami.

Berbeda dengan gelombang laut biasa, tsunami memiliki panjang gelombang antara dua puncaknya lebih dari 100 km di laut lepas dan selisih waktu antara puncak-puncak gelombangnya berkisar antara 10 menit hingga 1 jam. Saat mencapai pantai yang dangkal, teluk, atau

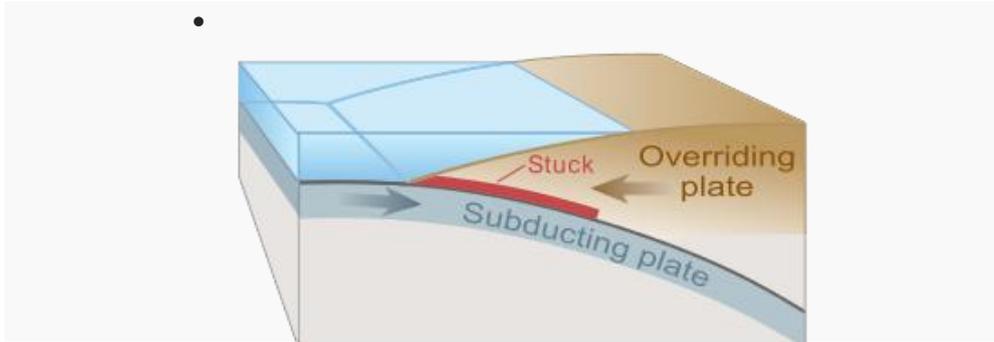
muara sungai gelombang ini menurun kecepatannya, namun tinggi gelombangnya meningkat puluhan meter dan bersifat merusak.

Istilah tsunami berasal dari bahasa Jepang Tsu artinya pelabuhan dan nami artinya gelombang laut. Dari kisah inilah muncul istilah tsunami. Awalnya tsunami berarti gelombang yang menghantam pelabuhan. Tsunami terutama disebabkan oleh gempa bumi di dasar laut, letusan gunung api dasar laut atau akibat jatuhnya meteor yang jarang terjadi.

2.2.2 Proses Pembangkitan Gelombang Tsunami

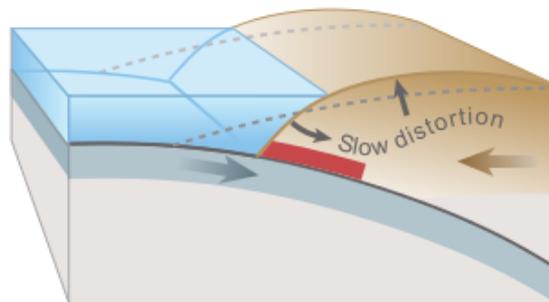
Mekanisme generasi pokok (atau penyebab) dari tsunami adalah perpindahan volume besar air atau gangguan dari laut. Displasemen air biasanya dikaitkan baik gempa bumi, tanah longsor, letusan gunung berapi, runtuh gletser atau oleh meteorit dan tes nuklir yang jarang terjadi. Gelombang terbentuk dengan cara ini kemudian ditopang oleh gravitasi. Pasut tidak memainkan peran apapun dalam pembangkitan tsunami.

Tsunami dapat dihasilkan ketika dasar laut tiba-tiba mengalami deformasi dan secara vertikal menggerakkan air di atasnya. Gempa tektonik adalah jenis gempa yang berkaitan dengan deformasi kerak bumi; ketika gempa ini terjadi di bawah laut, air yang ada di daerah deformasi dipindahkan dari posisi keseimbangannya. Lebih khusus, tsunami dapat dihasilkan ketika dorongan yang berhubungan dengan konvergen atau pelat merusak batas bergerak secara tiba-tiba, sehingga perpindahan air karena komponen vertikal gerakan terlibat. Gerakan pada normal (ekstensional) kesalahan juga dapat menyebabkan perpindahan dari dasar laut, tetapi hanya yang terbesar dari peristiwa tersebut (biasanya berkaitan dengan *flexure* dalam parit membengkak luar) menyebabkan cukup perpindahan untuk menimbulkan tsunami yang signifikan, seperti 1977 Sumba dan 1933 peristiwa Sanriku.



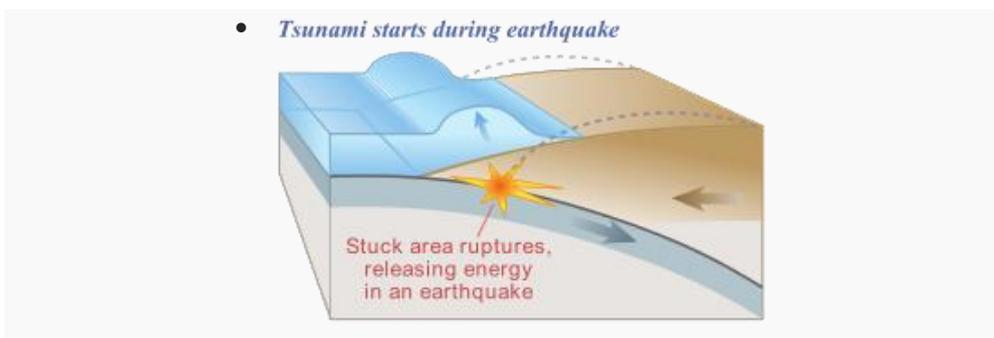
Gambar 2.2 Lempeng tektonik sebelum gempa

(Sumber : <https://strukturawam.wordpress.com/2011/03/14/jenis-patahan-yang-mengakibatkan-tsunami/>)



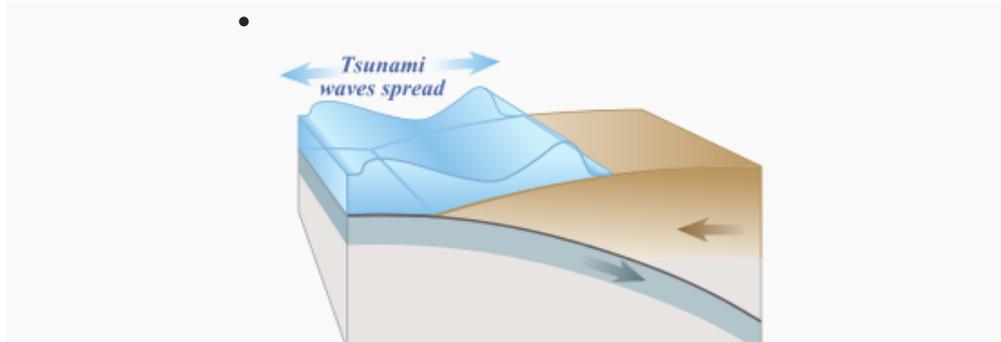
Gambar 2.3 lempeng tektonik yang terkena *uplift*

(Sumber : <https://strukturawam.wordpress.com/2011/03/14/jenis-patahan-yang-mengakibatkan-tsunami/>)



Gambar 2.4 Ketika lempeng sudah turun kembali air laut masih pada cekungan

(Sumber : <https://strukturawam.wordpress.com/2011/03/14/jenis-patahan-yang-mengakibatkan-tsunami/>)



Gambar 2.5 Merambatnya energi menjadi tsunami

(Sumber : <https://strukturawam.wordpress.com/2011/03/14/jenis-patahan-yang-mengakibatkan-tsunami/>)

2.2.3 Magnitudo Gempa

Magnitudo gempa adalah sebuah besaran yang menyatakan besarnya energi seismik yang dipancarkan oleh sumber gempa. Besaran ini akan berharga sama dalam Skala Richter (SR), meskipun dihitung dari tempat yang berbeda. Secara umum, magnitudo dapat dihitung menggunakan formula berikut :

$$M = \log \frac{a}{T} + f(\Delta, h) + C_S + C_R \quad (1)$$

Dengan

M = magnitudo gempa (Skala Magnitude/SM)

a = amplitudo gerakan tanah (m)

T = periode gelombang (sekon)

Δ = jarak pusat gempa atau episenter (m)

h = kedalaman gempa (m)

C_S, C_R = faktor koreksi yang bergantung pada kondisi lokal & regional daerahnya.

Selain Skala Richter di atas, ada beberapa definisi magnitudo yang dikenal dalam kajian gempa bumi adalah M_S yang diperkenalkan oleh Guttenberg menggunakan fase gelombang permukaan gelombang Rayleigh, m_b (*body waves magnitudo*) diukur berdasar amplitudo gelombang badan.

Ada beberapa jenis magnitudo, yaitu:

1. Magnitudo Lokal

Magnitudo lokal M_L diperkenalkan oleh Richter untuk mengukur magnitudo gempa-gempa lokal, khususnya di California Selatan. Nilai amplitudo yang digunakan untuk menghitung magnitudo lokal adalah amplitudo maksimum gerakan tanah (dalam mikron) yang tercatat oleh seismograph torsi (*torsion seismograph*) Wood-Anderson, yang mempunyai periode natural = 0,8 sekon, magnifikasi (perbesaran) = 2800, dan faktor redaman = 0,8. jadi formula untuk menghitung magnitudo lokal tidak dapat diterapkan di luar California dan data amplitudo yang dipakai harus yang tercatat oleh jenis seismograph di atas.

2. Magnitudo Gelombang Badan

Magnitudo gempa yang diperoleh berdasar amplitudo gelombang badan (P atau S) disimbolkan dengan m_b . Dalam prakteknya (di USA), amplitudo yang dipakai adalah amplitudo gerakan tanah maksimum dalam mikron yang diukur pada 3 gelombang yang pertama dari gelombang P (seismogram periode pendek, komponen vertikal), dan periodenya adalah periode gelombang yang mempunyai amplitudo maksimum tersebut. Sudah tentu rumus yang dipakai untuk menghitung m_b ini dapat digunakan disemua tempat (universal), tapi perlu dicatat bahwa faktor koreksi untuk setiap tempat (stasiun gempa) akan berbeda satu sama lain.

3. Magnitudo Gelombang Permukaan

Magnitudo yang diukur berdasar amplitudo gelombang permukaan disimbolkan dengan M_s . secara praktis (di USA) amplitudo gerakan tanah yang dipakai adalah amplitudo maksimum gelombang permukaan, yaitu gelombang Rayleigh (dalam mikron, seismogram periode panjang, komponen vertikal, periode sekon) dan periodenya diukur pada gelombang dengan amplitudo maksimum tersebut.

Dalam menentukan magnitudo, tidak ada keseragaman materi yang dipakai kecuali rumus umumnya, yaitu persamaan diatas tadi. Untuk menentukan m_b misalnya, orang dapat memakai data amplitudo gelombang badan (P dan S) dari sembarang fase seperti P, S, PP, SS, pP, sS (yang jelas dalam seismogram). Seismogram yang dipakai pun dapat dipilih dari komponen vertikal maupun horisontal (asal konsisten). Demikian juga untuk penentuan M_S . Oleh karena itu, kiranya dapat dimengerti bahwa magnitudo yang ditentukan oleh institusi yang berbeda akan bervariasi, walaupun mestinya tidak boleh terlalu besar.

Namun demikian, tampaknya ada hubungan langsung antara m_b dan M_S , yang secara empiris ditulis sebagai :

$$m_b = 0,56M_S + 2,9 \quad (2)$$

2.2.4 Momen Seismik

Untuk memahami momen seismik, kita kembali pada konsep fisika elementer mengenai torsi. Torsi adalah gaya yang mengubah momentum angular dari system. Didefinisikan sebagai gaya dikalikan dengan jarak dari pusat rotasi. Persamaan umum untuk konversi momen seismik menjadi magnitude adalah sebagai berikut (Wells dan Coppersmith, 1994) :

$$M_0 = 10^{(\frac{3}{2} \cdot \text{magnitude} + 16,1)} \quad (3)$$

Dengan :

M_0 : Seismik Moment (dyne.cm)

Magnitude : Besarnya Magnitude (Skala Richter)

$$M_w = \frac{2}{3}(\log_{10} M_0 - 10,7) \quad (4)$$

Dengan :

M_w : momen magnitude (Skala Magnitude/SM)

M_0 : momen seismik (dyne.cm)

Untuk menentukan panjang patahan dan lebar patahan digunakan persamaan menurut Wells dan Coppersmith (1994) :

Tabel 2.1 Regresi Linier untuk Parameter Gempa

Regressions of Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Moment Magnitude (M)

Equation*	Slip Type†	Number of Events	Coefficients and Standard Errors		Standard Deviation <i>s</i>	Correlation Coefficient <i>r</i>	Magnitude Range	Length/Width Range (km)
			<i>a</i> (sa)	<i>b</i> (sb)				
$M = a + b * \log (SRL)$	SS	43	5.16(0.13)	1.12(0.08)	0.28	0.91	5.6 to 8.1	1.3 to 432
	R	19	5.00(0.22)	1.22(0.16)	0.28	0.88	5.4 to 7.4	3.3 to 85
	N	15	4.86(0.34)	1.32(0.26)	0.34	0.81	5.2 to 7.3	2.5 to 41
	All	77	5.08(0.10)	1.16(0.07)	0.28	0.89	5.2 to 8.1	1.3 to 432
$\log (SRL) = a + b * M$	SS	43	-3.55(0.37)	0.74(0.05)	0.23	0.91	5.6 to 8.1	1.3 to 432
	R	19	-2.86(0.55)	0.63(0.08)	0.20	0.88	5.4 to 7.4	3.3 to 85
	N	15	-2.01(0.65)	0.50(0.10)	0.21	0.81	5.2 to 7.3	2.5 to 41
	All	77	-3.22(0.27)	0.69(0.04)	0.22	0.89	5.2 to 8.1	1.3 to 432
$M = a + b * \log (RLD)$	SS	93	4.33(0.06)	1.49(0.05)	0.24	0.96	4.8 to 8.1	1.5 to 350
	R	50	4.49(0.11)	1.49(0.09)	0.26	0.93	4.8 to 7.6	1.1 to 80
	N	24	4.34(0.23)	1.54(0.18)	0.31	0.88	5.2 to 7.3	3.8 to 63
	All	167	4.38(0.06)	1.49(0.04)	0.26	0.94	4.8 to 8.1	1.1 to 350
$\log (RLD) = a + b * M$	SS	93	-2.57(0.12)	0.62(0.02)	0.15	0.96	4.8 to 8.1	1.5 to 350
	R	50	-2.42(0.21)	0.58(0.03)	0.16	0.93	4.8 to 7.6	1.1 to 80
	N	24	-1.88(0.37)	0.50(0.06)	0.17	0.88	5.2 to 7.3	3.8 to 63
	All	167	-2.44(0.11)	0.59(0.02)	0.16	0.94	4.8 to 8.1	1.1 to 350
$M = a + b * \log (RW)$	SS	87	3.80(0.17)	2.59(0.18)	0.45	0.84	4.8 to 8.1	1.5 to 350
	R	43	4.37(0.16)	1.95(0.15)	0.32	0.90	4.8 to 7.6	1.1 to 80
	N	23	4.04(0.29)	2.11(0.28)	0.31	0.86	5.2 to 7.3	3.8 to 63
	All	153	4.06(0.11)	2.25(0.12)	0.41	0.84	4.8 to 8.1	1.1 to 350
$\log (RW) = a + b * M$	SS	87	-0.76(0.12)	0.27(0.02)	0.14	0.84	4.8 to 8.1	1.5 to 350
	R	43	-1.61(0.20)	0.41(0.03)	0.15	0.90	4.8 to 7.6	1.1 to 80
	N	23	-1.14(0.28)	0.35(0.05)	0.12	0.86	5.2 to 7.3	3.8 to 63
	All	153	-1.01(0.10)	0.32(0.02)	0.15	0.84	4.8 to 8.1	1.1 to 350
$M = a + b * \log (RA)$	SS	83	3.98(0.07)	1.02(0.03)	0.23	0.96	4.8 to 7.9	3 to 5,184
	R	43	4.33(0.12)	0.90(0.05)	0.25	0.94	4.8 to 7.6	2.2 to 2,400
	N	22	3.93(0.23)	1.02(0.10)	0.25	0.92	5.2 to 7.3	19 to 900
	All	148	4.07(0.06)	0.98(0.03)	0.24	0.95	4.8 to 7.9	2.2 to 5,184
$\log (RA) = a + b * M$	SS	83	-3.42(0.18)	0.90(0.03)	0.22	0.96	4.8 to 7.9	3 to 5,184
	R	43	-3.99(0.36)	0.98(0.06)	0.26	0.94	4.8 to 7.6	2.2 to 2,400
	N	22	-2.87(0.50)	0.82(0.08)	0.22	0.92	5.2 to 7.3	19 to 900
	All	148	-3.49(0.16)	0.91(0.03)	0.24	0.95	4.8 to 7.9	2.2 to 5,184

*SRL—surface rupture length (km); RLD—subsurface rupture length (km); RW—downdip rupture width (km), RA—rupture area (km²).
†SS—strike slip; R—reverse; N—normal.

Berdasarkan kriteria parameter gempa Wells dan Coppersmith, dengan asumsi gempa menimbulkan tsunami maka jenis patahannya adalah vertikal atau dalam gambar diatas SS (*Strike Slip*). Oleh karena itu untuk menghitung parameter gempa dengan data yang ada digunakan persamaan :

- Panjang patahan di permukaan bumi dengan panjang patahan dalam kilometer,

$$\text{Log SRL} = -3,55 + 0,74Mw \quad (5)$$

- Lebar patahan di permukaan bumi dengan panjang patahan dalam kilometer,

$$\text{Log RW} = -0,76 + 0,27Mw \quad (6)$$

- Luas patahan di permukaan bumi dengan luas patahan dalam kilometer persegi,

$$\text{Log RA} = -3,42 + 0,90Mw \quad (7)$$

Dengan

- M_w = momen magnitude (Skala Magnitude/SM)
 M_o = momen seismik gempa (dyne.cm)
 SRL = *Surface Rupture Length* (km)
 RW = *Rupture Width* (km)
 RA = *Rupture Area* (km)

2.2.5 Hubungan Antara Patahan dengan Muka Air Laut

Tsunami merupakan akibat dari gempa di dasar laut yang mengakibatkan patahan dan dislokasi dasar laut, sehingga mengakibatkan perubahan muka air laut di atasnya dan menjadikan gelombang dengan kecepatan tinggi di laut dalam. Untuk itu perlu diketahui terlebih dahulu hubungan antara deformasi dasar laut akibat patahan dengan muka air laut. Menurut Hammack (1980) perubahan elevasi dasar laut diberikan persamaan sebagai berikut :

$$|\zeta_o| \approx \frac{M_o}{\mu S} \quad (8)$$

Dimana :

- ζ_o = ketinggian dislokasi (m)
 M_o = momen seismik (dyn.cm)
 S = luas patahan (km²)
 μ = modulus geser (5×10^{11} dynes cm⁻²)

Sementara untuk perubahan elevasi muka air laut di ekspresikan dengan persamaan :

$$\eta = \frac{\zeta_o}{\pi} \int_0^\infty \frac{\cos kx \sin kb}{k \cosh kh} \left(\frac{\alpha^2}{\alpha^2 + \omega^2} \right) \times \left(e^{-\alpha t} - \cos \omega t - \frac{\omega}{\alpha} \sin \omega t \right) dk \quad (9)$$

Dengan nilai

$$\omega^2 \equiv gk \tanh kh \quad (10)$$

Selanjutnya untuk mencari nilai dari angka Hammack dengan menggunakan persamaan :

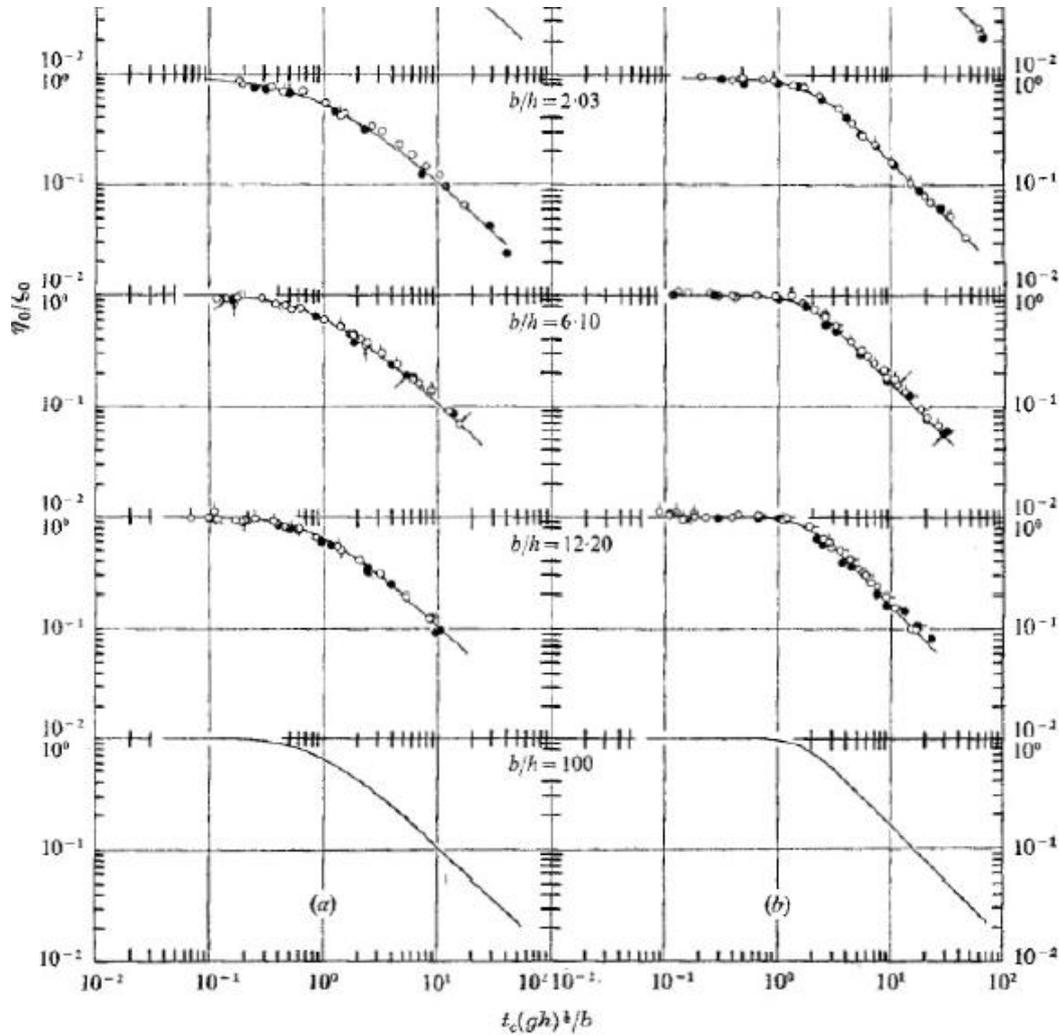
$$t_c = \frac{1,11}{\alpha} \quad (11)$$

Keterangan :

- t_c = waktu yang dibutuhkan untuk dua pertiga dari offset vertikal

yang terjadi (sekon)

α = sudut bidang patahan dengan bidang horizontal (slip)



Gambar 2.6 Grafik Elevasi Muka Air Laut

(Sumber : Hammack, 1980)

2.2.6 Persamaan Gelombang Tsunami

Persamaan gerak gelombang tsunami melalui pendekatan teori perairan dangkal. Menurut Imamura (1994) percepatan vertikal partikel air dapat diabaikan karena besarnya lebih kecil dari percepatan gravitasi, oleh karena itu gerak gelombang tsunami diekspresikan dengan teori gelombang perairan dangkal. Teori gelombang panjang yang didekati dengan teori pendekatan yang berlaku untuk gelombang dengan kedalaman relatif kecil yang mana percepatan vertikal dari air dapat

diabaikan dibandingkan dengan percepatan gravitasi. Berikut persamaan gerakan gelombang panjang ditunjukkan pada persamaan gelombang air dangkal :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{\tau_x}{\rho} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial \{u(h+\eta)\}}{\partial x} + \frac{\partial \{v(h+\eta)\}}{\partial y} = 0 \quad (13)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{\tau_y}{\rho} = 0 \quad (14)$$

Dengan

- x,y = koordinat arah x dan y (°)
- t = waktu (sekon)
- h = kedalaman dasar laut (m)
- η = elevasi permukaan air laut (m)
- u,v = kecepatan partikel air arah x dan y (m/s)
- g = percepatan gravitasi bumi (m/s^2)
- τ_x/ρ = tegangan geser dasar laut arah x (N/m^2)
- τ_y/ρ = tegangan geser dasar laut arah y (N/m^2)

Pergeseran dasar laut untuk analogi aliran seragam (*uniform*), jika ditambahkan koefisien kekasaran dasar laut arah x dan arah y, persamaan tegangan gesernya menjadi :

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{1}{2g} \cdot \frac{f}{H} \cdot u \sqrt{u^2 + v^2} \quad (15)$$

$$\frac{\tau_y}{\rho} = \frac{1}{2g} \cdot \frac{f}{H} \cdot v \sqrt{u^2 + v^2} \quad (16)$$

Dengan

- H = total ketinggian gelombang ($h+\eta$) (sekon)
- f = koefisien kekasaran dasar laut

Dimana nilai koefisien kekasaran dasar laut menggunakan persamaan Manning's

$$n = \sqrt{\frac{fD^{1/3}}{2g}} \quad (17)$$

Dengan memasukkan persamaan koefisien kekasaran persamaan Manning's ke dalam persamaan tegangan geser, maka persamaan menjadi :

$$\frac{\tau_x}{\rho} = \frac{gn^2}{D^{4/3}} \cdot u\sqrt{u^2 + v^2} \quad (18)$$

$$\frac{\tau_y}{\rho} = \frac{gn^2}{D^{4/3}} \cdot v\sqrt{u^2 + v^2} \quad (19)$$

Persamaan momentum atau persamaan perubahan fluks (M, N) dalam arah x dan y. M, dan N berhubungan dengan u dan v sebagai berikut :

$$M = u(h + \eta) = uD \quad (20)$$

$$N = v(h + \eta) = vD \quad (21)$$

Dengan menggabungkan persamaan gelombang air dangkal hingga persamaan fluks, akan diperoleh persamaan sebagai berikut :

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{M^2}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{MN}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} M\sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (22)$$

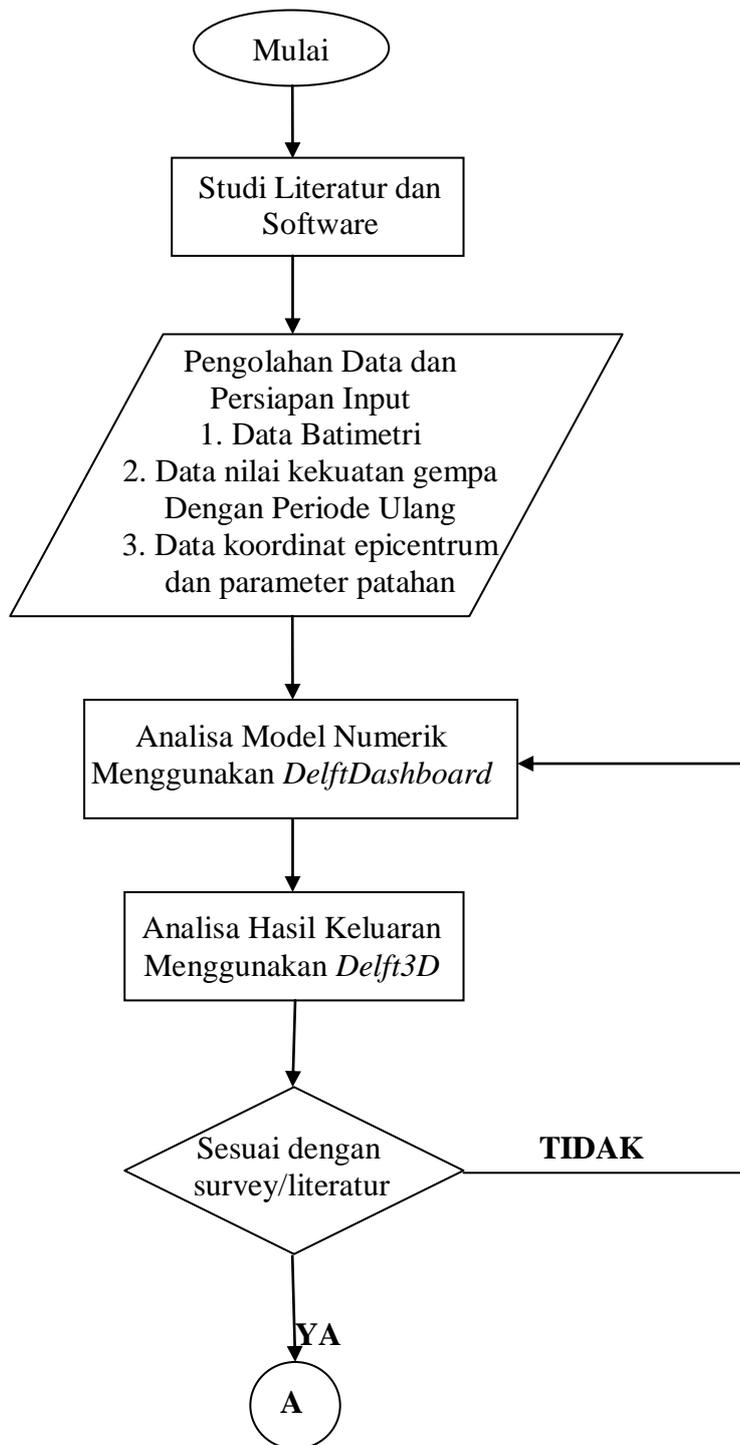
$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{MN}{D} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{N^2}{D} \right) + gD \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{gn^2}{D^{7/3}} N\sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (23)$$

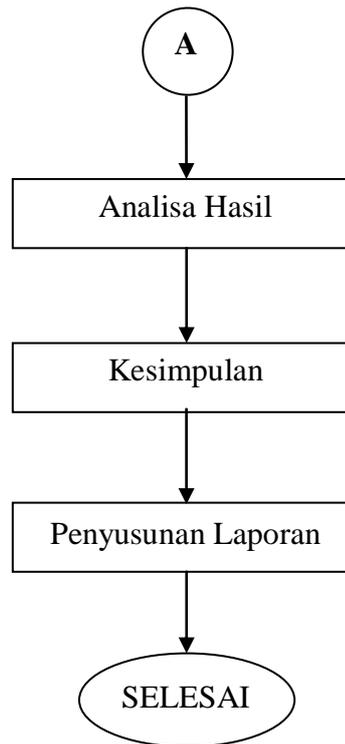
Persamaan diatas adalah persamaan umum gelombang air dangkal untuk pembangkitan dan penjalaran gelombang tsunami.

BAB III
METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Diagram Alir Penelitian

Alur pengerjaan tugas akhir ini adalah sebagai berikut :





Gambar 3.1 Diagram Alir Metodologi Penelitian

3.2 Penjelasan Diagram Alir

Penjelasan berikut digunakan untuk memberikan detail yang menunjukkan proses penelitian yang dilakukan. Berikut penjelasan dari diagram alir :

1. Studi Literatur dan Pengenalan *Software*

Pada penelitian ini yang dilakukan pertama adalah studi literatur dan pengenalan *software* yang akan digunakan. Dalam studi literatur melalui jurnal ilmiah, buku, maupun penelitian sebelumnya digunakan untuk mencari tahu lebih banyak tentang penelitian yang akan dilakukan, dalam hal ini yaitu berbagai penelitian tentang tsunami. Untuk pengenalan *software* dilakukan bersamaan dengan studi literatur, karena diperlukan juga jurnal atau petunjuk untuk *software* yang akan digunakan. Mulai praktek menggunakan *software* sesuai petunjuk baik dalam bentuk tulisan atau lainnya yang tersedia di berbagai sumber maupun tutorial khusus.

2. Pengolahan Data dan Persiapan Input

Tahap kedua adalah pengolahan data dan persiapan input data. Sebelum pengolahan data tentunya harus ada data yang diambil dari sumber yang bisa

dipertanggungjawabkan. Untuk keperluan data dalam penelitian ini berupa data batimetri, koordinat episentrum, dan kekuatan gempa. Sumber data yang digunakan dalam penelitian ini, untuk batimetri berasal dari sumber gratis di website GEBCO, dan untuk data koordinat gempa beserta episentrum didapatkan dari BMKG. Setelah data didapat, dilakukan pengolahan data yang disesuaikan dengan format input data yang diinginkan oleh *software*. Selanjutnya data gempa didapatkan dari USGS dengan mengacu besar gempa yang dapat menimbulkan tsunami minimal 6 SR dan berada di selatan Pulau Jawa. Kemudian dilakukan perkiraan gempa yang akan muncul dengan menggunakan periode ulang Fisher-Tippet, Weibull $k = 1,4$, dan Weibull $k = 2,0$. Menggunakan hasil terbesar dari periode ulang untuk dimasukkan dalam *software* dan parameter patahan.

3. Analisa Numerik dengan *Software*

Data yang didapat dan sudah disesuaikan dengan input yang diinginkan *software*, langkah selanjutnya adalah melakukan analisa numerik dengan *software* itu sendiri. *Software* yang digunakan pada penelitian ini yaitu *DelftDashboard* terlebih dahulu. *Software* ini bersifat *open source* sehingga dapat diunduh oleh siapa saja. Pada analisa numerik, tentukan daerah mana yang akan digunakan sebagai batasan dalam penelitian. *Input* data meliputi, besaran gempa, lokasi dan parameter patahan. Diperlukan beberapa penyesuaian dari besaran magnitudo gempa menjadi momen seismik sehingga bisa dilakukan proses *running* pada *software*.

4. *Plotting* Hasil Keluaran

Setelah dilakukan *running* dengan menggunakan *DelftDashboard*, langkah selanjutnya adalah melakukan *plotting* hasil keluaran dari hasil analisa. Untuk mengetahui bagaimana proses penjalaran gelombang tsunami dari titik episentrum menuju ke garis pantai. Sesuai dengan batasan masalah yang ada, penelitian dilakukan sampai tsunami menyentuh garis pantai. Keterbatasan *software* hanya bisa melakukan analisa proses penjalaran hanya sampai garis pantai. Langkah ini diharapkan mampu menggambarkan seperti apa profil gelombang yang menjalar sesuai dengan waktu yang diperoleh.

5. Sesuai dengan Survey/ Literatur

Tahap selanjutnya yaitu penyesuaian data hasil analisa dengan keadaan eksis atau yang sudah pernah eksis. Melalui survey atau dengan menggunakan jurnal maupun paper penelitian sebelumnya, verifikasi dilakukan. Karena belum bisa diketahui ke validan hasil keluaran dari *software* yang dijalankan. Sehingga dengan adanya validasi data bisa mengetahui seberapa besar error atau ketepatan hasil simulasi yang dijalankan untuk dijadikan acuan di lapangan.

6. Analisa Hasil

Analisa hasil dari permodelan ini sangat diperlukan untuk mencari faktor – faktor apa saja yang diperlukan dalam penelitian ini. Karena tidak semua hasil keluaran ini dipaparkan dalam paper. Karena dalam penelitian ini ingin diketahui seberapa tinggi gelombang akibat patahan yang terjadi di dasar laut selatan. Sehingga hanya faktor yang berhubungan dengan gelombang tsunami yang diamati.

7. Kesimpulan

Dalam penarikan kesimpulan mengacu kepada analisa hasil simulasi permodelan. Mulai dari penelitian dilakukan hingga selesai, secara menyeluruh. Sehingga hasil kesimpulan yang didapat bisa dijadikan pertimbangan untuk penelitian ke depan.

BAB IV

ANALISA DAN PEMBAHASAN

4.1 Daerah Penelitian

Daerah penelitian berada pada desa Sumberejo kecamatan Ambulu kabupaten Jember. Daerah yang berbatasan langsung dengan Samudera Hindia di bagian selatan ini mempunyai pantai berpasir warna hitam. Terdapat pantai yang dijadikan tempat wisata yang biasa dikunjungi masyarakat dari daerah setempat maupun daerah lain yang ramai pada saat liburan, yaitu pantai Watu Ulo. Kondisi perairan di Samudera Hindia memiliki gelombang yang kurang bersahabat dibandingkan dengan Laut Jawa. Pada pantai Watu Ulo sendiri tidak diperkenankan perahu nelayan melaut melewati daerah pantai tersebut, melainkan harus melewati jalur berangkat sebelahnya yaitu Pantai Payangan. Angin yang bertiup juga sangat kencang mengingat batas dengan daratan di selatan Jawa Timur yaitu Australia sangat jauh sekitar 400 – 500 km. Ditambah dengan kondisi kontur bawah laut yang memiliki kondisi cukup curam. Jumlah populasi masyarakat di bagian selatan tidak sebanyak yang berada di jalur pantura pulau Jawa. Namun tidak sedikit juga masyarakat dan fasilitas umum yang ada di sana dan pemerintah juga mulai memperhatikan sarana pra sarana daerah tersebut. Dibuktikan dengan mulai dibangunnya JLS (Jalur Lintas Selatan) yang pembangunannya sudah mencapai Pantai Puger.

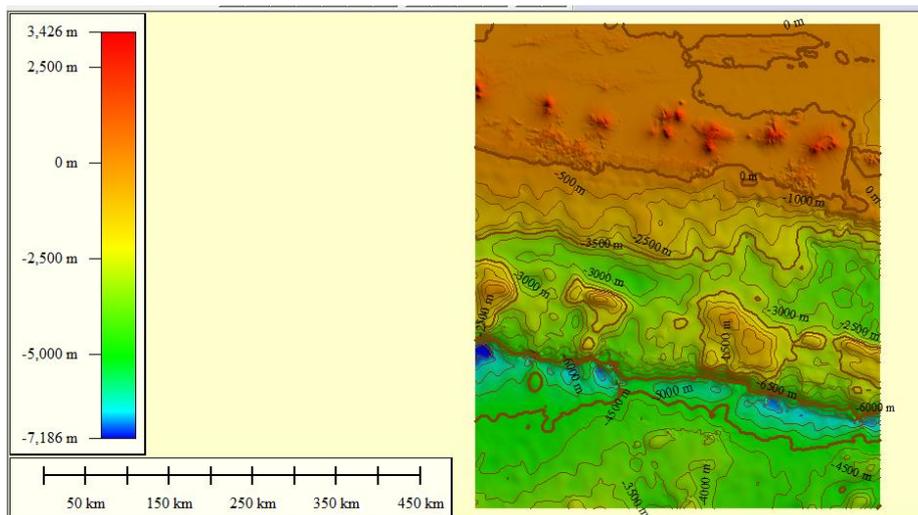
Kondisi tersebut membuat daerah selatan Jawa Timur lebih rentan terhadap bencana alam daripada daerah utara Jawa Timur. Perlu adanya tindakan preventif untuk mempersiapkan masyarakat agar mampu melewati bencana dengan meminimalisir kerugian yang diakibatkan. Dibuktikan dengan bencana tsunami yang pernah terjadi pada tahun 1995 di Samudera Hindia dan seluruh pantai selatan Jawa Timur terkena dampaknya. Untuk mengurangi dampak kemungkinan kerugian yang akan terjadi, perlu prediksi lebih lanjut tentang tsunami dan memberikan wawasan tentang kemungkinan kerugian yang akan terdampak.

4.2 Pengumpulan Data

Data – data yang akan digunakan dalam proses penelitian selanjutnya untuk dijadikan input pada permodelan maupun perhitungan yang akan dilakukan. Data yang dibutuhkan antara lain data batimetri dan data gempa yang dapat menimbulkan tsunami.

4.2.1 Data Batimetri

Data batimetri yang akan digunakan adalah data pada daerah selatan Pulau Jawa. Dimana akan di simulasikan pada daerah tersebut memiliki potensi tsunami yang cukup tinggi. Dibuktikan dengan pernah terjadinya tsunami pada daerah tersebut pada tahun 1995. Data yang akan kami gunakan bersifat *open source* dan bisa diakses siapapun dimanapun dan kapanpun. Data batimetri dalam cakupan luas didapatkan dari *GEBCO* yang mudah diakses. Format file yang didapat dari *GEBCO* memiliki ekstensi *ascii* dan dengan menggunakan *Global Mapper* untuk di konversi menjadi format data *x, y, z*. Data kemudian bisa diolah dan dijadikan input dalam permodelan *DelftDashboard*. Selain itu, data diperlukan untuk input lainnya berupa format *ldb* untuk menentukan batas daratan yang digunakan untuk meshing dalam simulasi model. Sehingga lebih mudah dalam menentukan batas daratan yang digunakan untuk analisis. Karena tidak semua format data bisa dimasukkan dalam *Delft3D*.



Gambar 4.1 Gambar Batimetri
(Sumber : GEBCO)

4.2.2 Data Gempa

Data yang kedua digunakan adalah data gempa yang terjadi di sepanjang laut selatan Pulau Jawa. Data diambil dari USGS mulai dari tahun 1990 – 2016 minimal yang memiliki kekuatan 6 SR (Skala Richter). Karena pada kekuatan tersebut berpotensi tsunami. Diperoleh data gempa sebanyak 46 kejadian dengan skala magnitudo 6 SR.

Setelah diperoleh nilai magnitudo gempa selama kurun waktu yang dipilih, selanjutnya adalah dengan melakukan simulasi untuk menentukan perkiraan besar gempa yang akan digunakan dalam tahap selanjutnya. Dengan menggunakan periode ulang Fisher-Tippet, Weibull $k = 1,4$ dan Weibull $k = 2,0$ dalam jangka waktu 100 tahunan.

Berdasarkan data gempa yang sudah diperoleh, maka diperoleh :

Magnitudo rata – rata data (μ) = 6,32174

Besar Magnitudo 100 tahunan :

Fisher – Tippet = 8,9202

Weibull ($k = 1,4$) = 8,9087

Weibull ($k = 2,0$) = 8,9087

Dari perhitungan diperoleh data seperti di atas, dipilih nilai magnitudo maksimum yaitu sebesar 8,9202 SR untuk selanjutnya dilakukan perhitungan parameter gempa dan langkah selanjutnya dalam proses penelitian.

4.3 Parameter Gempa

Penentuan parameter gempa yang akan digunakan yaitu panjang patahan, lebar patahan dan luas dari patahan. Sebelumnya perlu dilakukan perhitungan kekuatan gempa yang bisa didapat dengan melakukan pengolahan data momen *seismic moment* (M_o). Dengan menggunakan persamaan Wells dan Coppersmith (1994), adalah sebagai berikut :

$$M_o = 10^{(3/2 \cdot \text{besar magnitudo} + 16,1)}$$

$$M_o = 10^{(3/2 \cdot 8,9202 + 16,1)}$$

$$M_o = 3,35 \cdot 10^{29}$$

Selanjutnya adalah perhitungan *moment magnitude* (M_w), sehingga perhitungannya menjadi :

$$M_w = 2/3 \cdot \log (M_o) - 10,7$$

$$M_w = 2/3 \cdot \log (3,35 \cdot 10^{29}) - 10,7$$

$$M_w = 8,98$$

Dengan data *seismic moment* (M_o) dan *moment magnitude* (M_w), dengan menggunakan ketentuan Well dan Coppersmith untuk menentukan nilai parameter gempa menggunakan perhitungan sebagai berikut :

Surface Rupture Length (SRL)

$$\text{Log SRL} = -3,55 + 0,74 \cdot M_w$$

$$\text{Log SRL} = -3,55 + 0,74 \cdot 8,98$$

$$\text{Log SRL} = 3,097$$

$$\text{SRL} = 1249,62 \text{ km}$$

Downdip Rupture Width (RW)

$$\text{Log RW} = -0,76 + 0,27 \cdot M_w$$

$$\text{Log RW} = -0,76 + 0,27 \cdot 8,98$$

$$\text{Log RW} = 1,665$$

$$\text{RW} = 46,26 \text{ km}$$

Rupture Area (RA)

$$\text{Log RA} = -3,42 + 0,90 \cdot M_w$$

$$\text{Log RA} = -3,42 + 0,90 \cdot 8,98$$

$$\text{Log RA} = 4,664$$

$$\text{RA} = 46123,261 \text{ km}^2$$

4.4 Pembangkitan dan Proses Pembentukan Tsunami

Berdasarkan perhitungan dari data – data yang sudah dikumpulkan diperoleh hasil gempa dengan kekuatan 8,98 M_w dan belum pernah terjadi sebelumnya di Samudra Hindia. Sebagai acuan kekuatan gempa tersebut dan sudah memenuhi untuk terjadinya tsunami, selanjutnya adalah penentuan lokasi koordinat gempa dan kedalaman yang memicu tsunami. Untuk itu ditentukan

bahwa dengan kekuatan gempa yang sudah diperoleh koordinatnya berada pada $10,82^{\circ}$ LS dan $113,576^{\circ}$ BT pada kedalaman 15 km di selatan pantai Watu Ulo.

Selanjutnya setelah diketahui koordinat gempa, kekuatan magnitude, dan kedalaman gempa adalah menentukan sudut patahan. Sudut patahan diperoleh berdasarkan penelitian dari *Harvard Global Centroid Moment Tensor (Global CMT)* pada gempa yang terjadi pada tahun 1994 dan menyebabkan tsunami Banyuwangi, sebagai berikut :

Tabel 4.1 Parameter Gempa Banyuwangi (Global CMT, 1994)

060294C SOUTH OF JAVA	
Date: 1994/ 6/ 2	Centroid Time: 18:18:15.8 GMT
Lat= -11.03 Lon= 113.04	
Depth= 15.0 Half duration=11.5	
Moment Tensor: Expo=27 1.381 -1.185 -0.196 5.126 -0.783 .142	
Mw = 7.8 mb = 5.5 Ms = 7.2 Scalar Moment = 5.34e+27	
Dislocation = 15.21	
Fault plane: strike=278 dip=7 slip=89	

Dengan hasil perhitungan yang sudah dilakukan dan dengan data – data penunjang yang sudah diperoleh, maka kesimpulan untuk gempa yang dilakukan sebagai pembangkit tsunami adalah sebagai berikut :

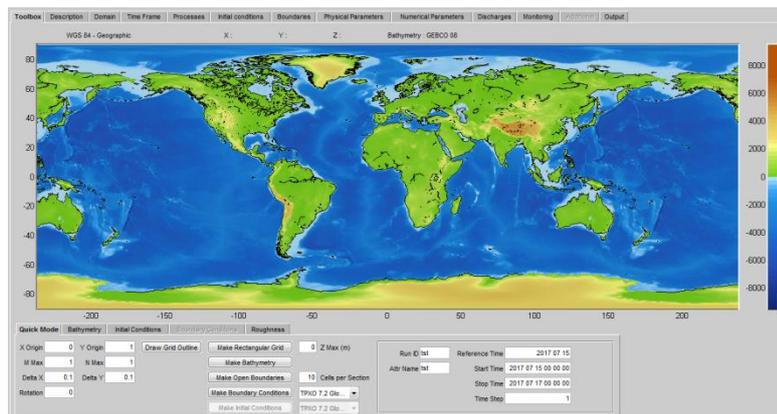
Magnitude	: 8,98 M_w
Koordinat	: $10,82^{\circ}$ LS dan $113,576^{\circ}$ BT
Kedalaman	: 15 km
Panjang Patahan (SRL)	: 1249,622 km
Lebar Patahan (RW)	: 46,257 km
Luas Patahan (RA)	: 46123,261 km ²
Dislokasi	: 14,46 m
<i>Strike</i> (θ)	: 278°
<i>Dip</i> (δ)	: 17°
<i>Slip</i> (λ)	: 89°

Dengan parameter yang sudah diketahui berdasarkan data yang ada, selanjutnya tentukan nilai dari *initial condition*, untuk digunakan sebagai input dalam permodelan *software*.

4.5 Permodelan Menggunakan *DelftDashboard*

DelftDashboard merupakan *software* permodelan hidrodinamika yang bisa digunakan untuk mensimulasikan alur penjalaran gelombang tsunami. Data input dari permodelan tsunami di *DelftDashboard* melalui parameter patahan yang terbentuk dari besarnya kekuatan gempa. Oleh karena itu diperlukan penyesuaian data input dari data mentah ke *DelftDashboard*.

Untuk membuka *DelftDashboard* dilakukan dengan menggunakan *command line* pada Matlab yang sudah di koneksikan dengan data pada *Open Earth*. Komputer harus terdapat koneksi inetrnet karena data dari *Open Earth* selalu *update*. Berikut tampilan awal dari *DelftDashboard*.



Gambar 4.2 Tampilan Awal *DelftDashboard*

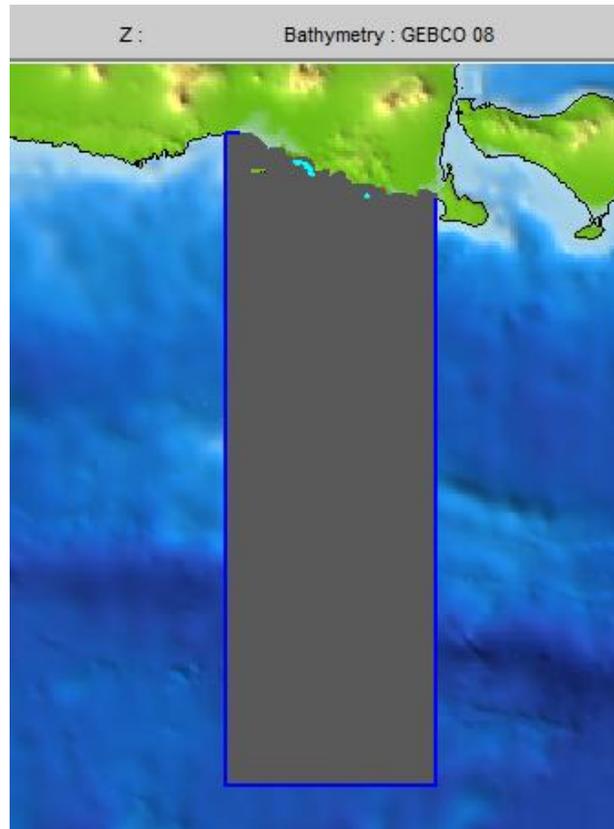
(Sumber : *Open Earth DelftDashboard*)

Dengan data yang sudah diperoleh maka langkah selanjutnya adalah :

4.5.1 Pembuatan *Grid*

Sebelum melakukan proses pembuatan *meshing*, tentukan dulu direktori dari hasil running di *DelftDashboard*. Selanjutnya perbesar pada daerah yang akan dianalisa. Dengan menggunakan menu *Draw Grid Outline* gambarkan grid pada daerah yang dianalisa. Tentukan kerapatan grid dengan mengganti

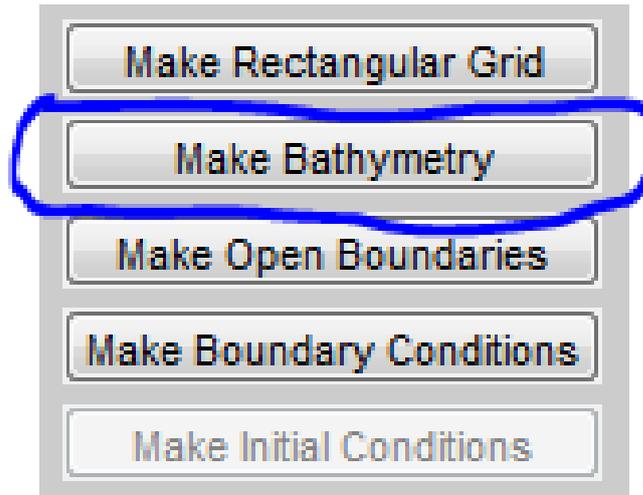
nilai pada Delta X dan Delta Y. Masukkan sesuai dengan ketelitian daerah yang akan dianalisa. Lanjutkan dengan melakukan klik pada menu *Make Rectangular Grid*. Maka akan muncul grid yang diinginkan. Jika kerapatan grid dirasa kurang memenuhi, ganti pada Delta X dan Delta Y hingga memenuhi yang diinginkan. Berikut tampilan grid yang telah dibuat :



Gambar 4.3 Hasil Grid pada *DelftDashboard*

4.5.2 Input Batimetri

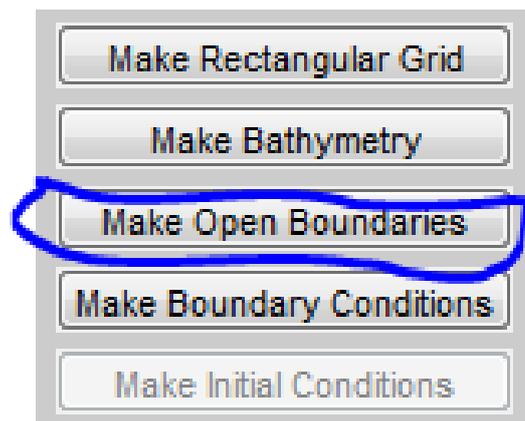
Tahap selanjutnya adalah pembuatan topografi dasar laut (batimetri). Pada *Open Earth* di *DelftDashboard* pembuatan batimetri cukup sederhana. Karena data selalu *update* dan terkoneksi dengan internet maka untuk file batimetri maupun topografi selalu diperbarui. Untuk selanjutnya pemberian batimetri dapat dilakukan dengan melakukan klik pada menu *Make Bathymetry*. Simpan hasil seleksi batimetri, format ekstensi file kedalaman adalah “.dep”. Berikut tampilan menu batimetri :



Gambar 4.4 Menu Input Batimetri pada *DelftDashboard*

4.5.3 Pembuatan *Open Boundary*

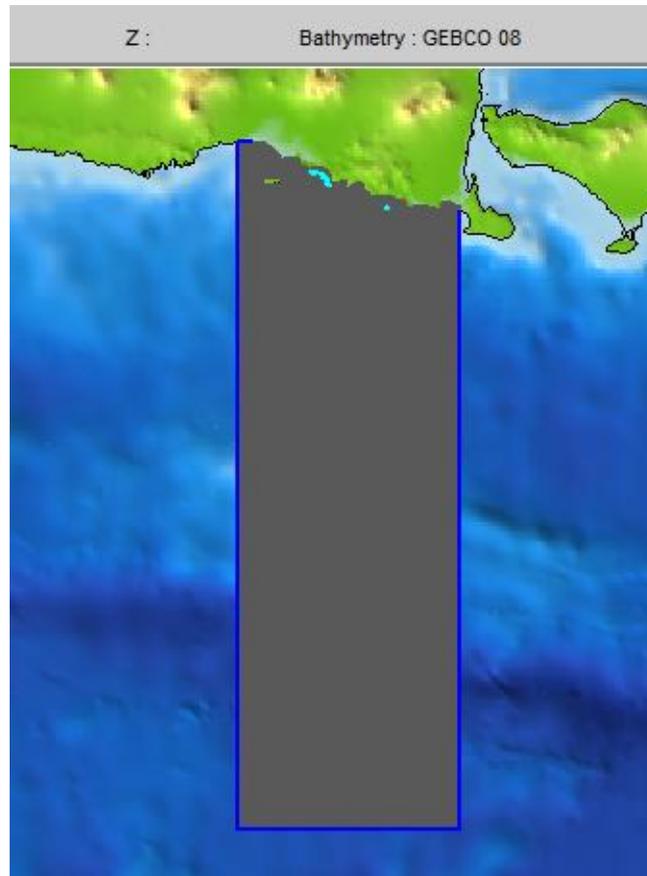
Pembuatan *Open Boundary* adalah untuk mendeskripsikan daerah laut lepas. Karena daerah daratan sudah terdeskripsi pada peta, selanjutnya adalah pendeskripsian batas laut lepas. Langkah untuk memberikan *Open Boundary* hampir sama dengan pemberian batimetri. Klik menu *Open Boundary* dan tekan enter, akan keluar garis biru pada sekitar batas laut lepas terhadap grid yang sudah dibuat. Berikut gambar menu *Open Boundary* :



Gambar 4.5 Tampilan Menu *Open Boundary*

Pembuatan *Open Boundary* ada pada daerah selatan, barat, dan timur dari grid yang sudah dibuat. Karena bagian utara grid sudah berbatasan dengan daratan, maka diambil bagian tersebut. Hasil dari pembuatan *Open Boundary*

dapat dilihat pada garis biru yang terdapat pada samping kiri, kanan dan bagian bawah terbawah grid :



Gambar 4.6 *Open Boundary* dari Grid

4.5.4 Penentuan *Initial Condition*

Penentuan waktu tempuh pada *DelftDashboard* dengan menggunakan persamaan periode tsunami. Menurut Joseph L. Hammack hubungan antara periode, lebar patahan dengan kecepatan gelombang di episentrum adalah sebagai berikut :

$$T = W/c$$

keterangan :

T : periode gelombang (sekon)

W : lebar patahan (m)

c : cepat rambat gelombang (m/s)

Setelah didapatkan nilai periode gelombang, buat simulasi menggunakan excel untuk mencari panjang gelombang. Untuk mencari panjang gelombang dapat digunakan persamaan :

$$L = c.T$$

keterangan :

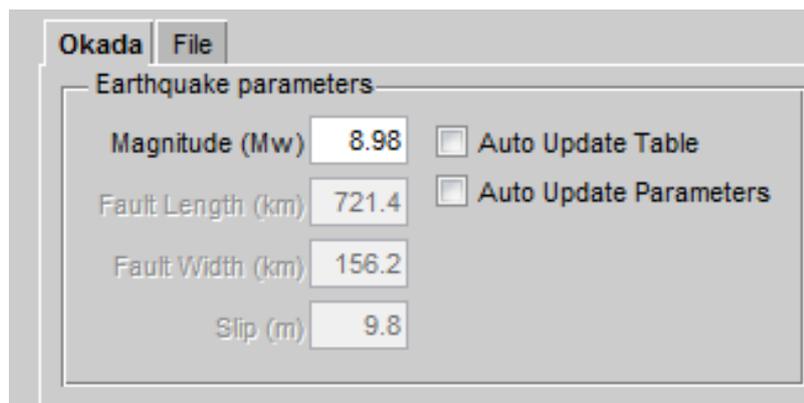
L : panjang gelombang (m)

c : cepat rambat gelombang (m/s)

T : periode gelombang (sekon)

Ulangi pencarian nilai panjang gelombang tepat diatas episentrum hingga menuju kedalaman pantai dibawah 10 meter. Jika sudah didapatkan hingga kedalaman dibawah 10 meter, jumlahkan periode gelombang dari awal hingga mendekati pantai diperoleh nilai 34 menit.

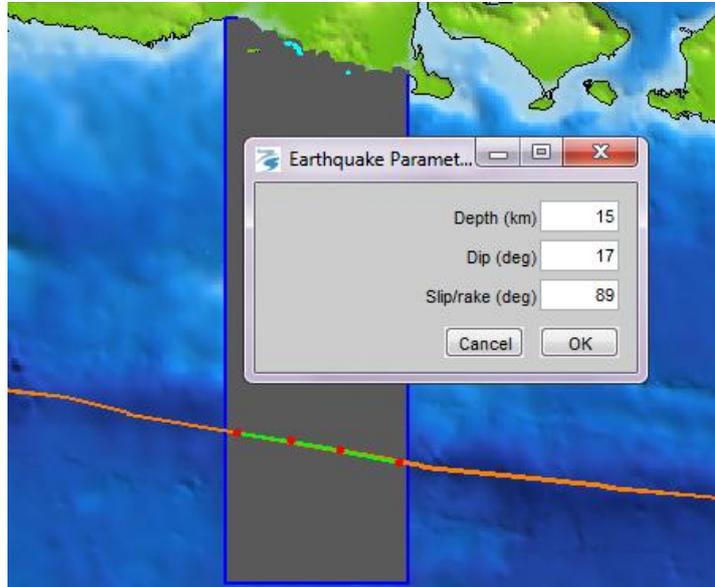
Pembuatan *initial condition* tsunami adalah dengan memasukkan parameter patahan yang sudah dicari sebelumnya. Untuk memunculkan menu tsunami klik pada menu *Toolbox* dan pilih Tsunami. Masukkan momen magnitude hasil perhitungan yang sudah dilakukan :



Gambar 4.7 Menu Input Nilai Momen Magnitude

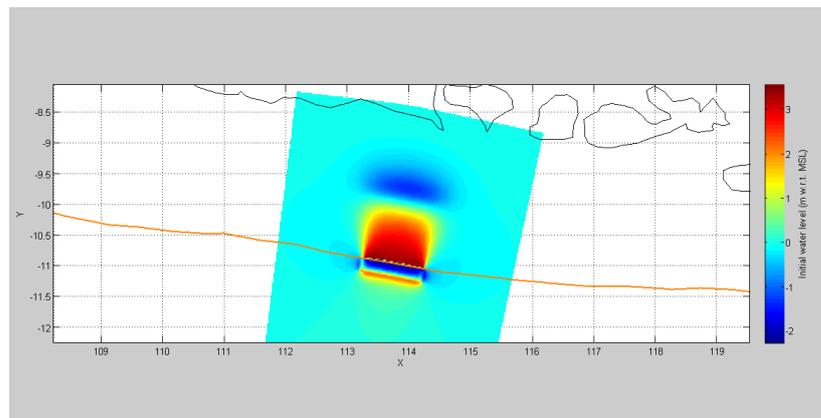
Proses input parameter patahan juga pada menu yang sama namun pada tab yang berbeda. Masukkan nilai dari lebar patahan, *dip* dan *slip*. Setelah itu

gambarkan patahan yang ada pada lempeng. Lakukan komputasi tsunami dengan menggunakan menu *compute tsunami* untuk mendapatkan *initial condition*. Berikut tampilan dari input dari parameter patahan :



Gambar 4.8 Input Parameter Patahan

Selanjutnya adalah perhitungan software besarnya gelombang *initial conditions* akibat besarnya gempa. Dengan data tersebut digunakan untuk *running* pada *Delft3D* untuk mencari proses penjarangannya seperti apa. Dan juga sebagai acuan awal seperti bentuk permukaan air akibat patahan. Berikut tampilan *initial condition* hasil *DelftDashboard* :



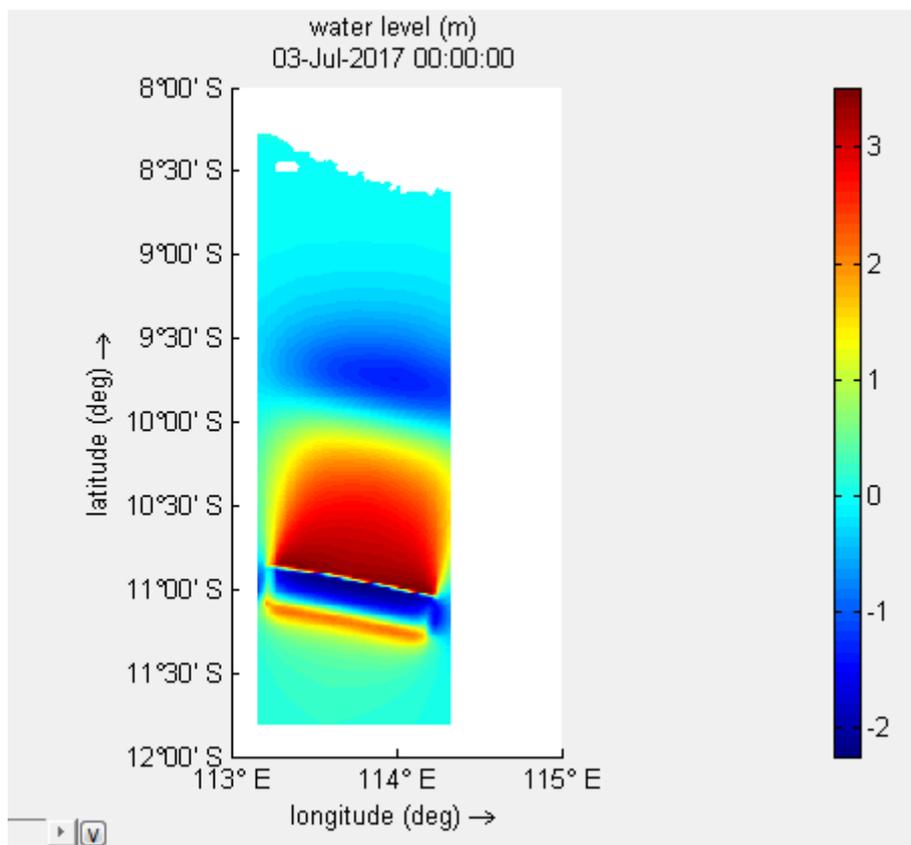
Gambar 4.9 *Initial Condition* Tsunami

4.5.5 Running Data

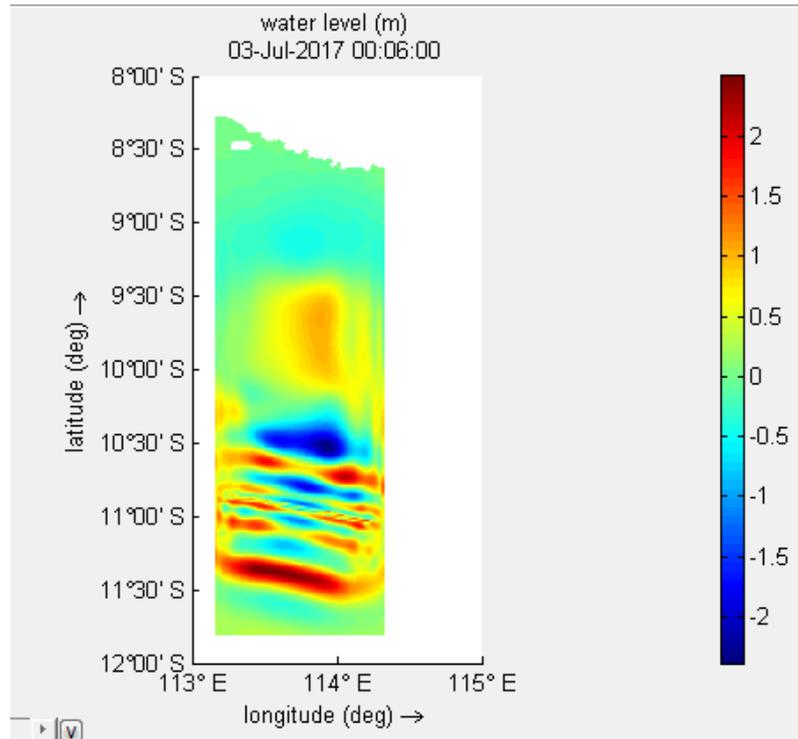
Setelah melakukan semua input yang dilakukan selanjutnya adalah melakukan *running* dengan menggunakan *Delft3D*. Proses *running* dengan melakukan simulasi pada file yang berkstensi “.mdf”. Pada direktori file yang sudah ditentukan cari file “.mdf” dan lakukan simulasi.

4.5.6 Hasil Running

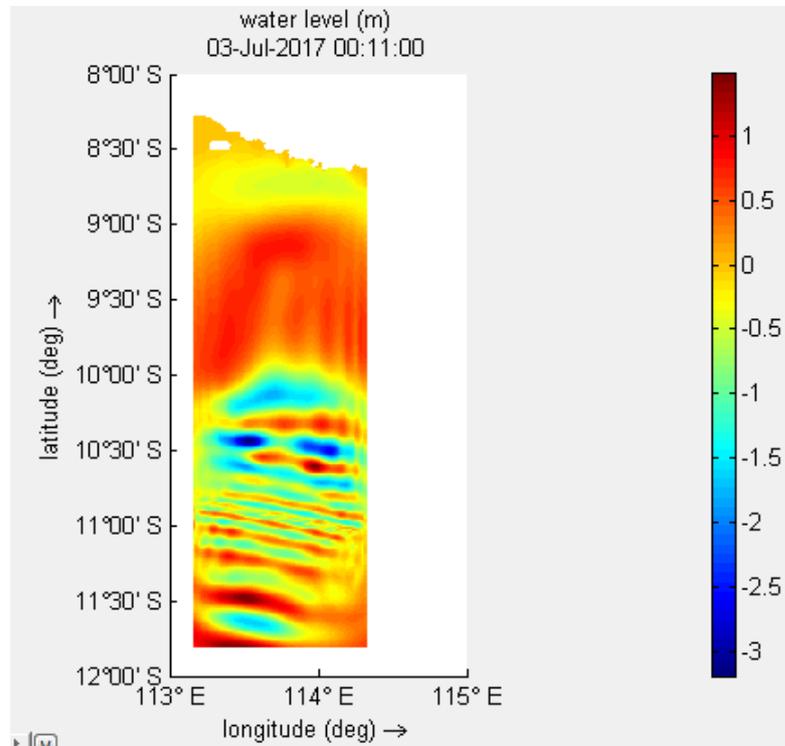
Hasil *running* dapat dilihat dan divisualisasikan menggunakan *Delft3D*. Pada menu QUICKPLOT, sebelumnya seperti biasanya tentukan direktorinya terlebih dahulu. Berikut hasil dari visualisasi menggunakan QUICKPLOT *Delft3D* :



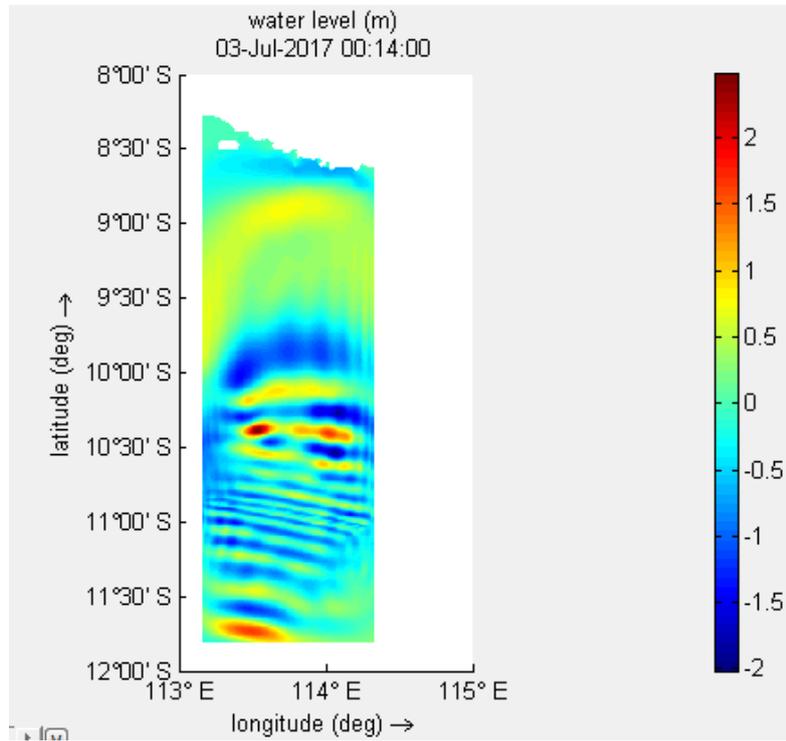
Gambar 4.10 Tampilan *Output Water Level 00:00:00*



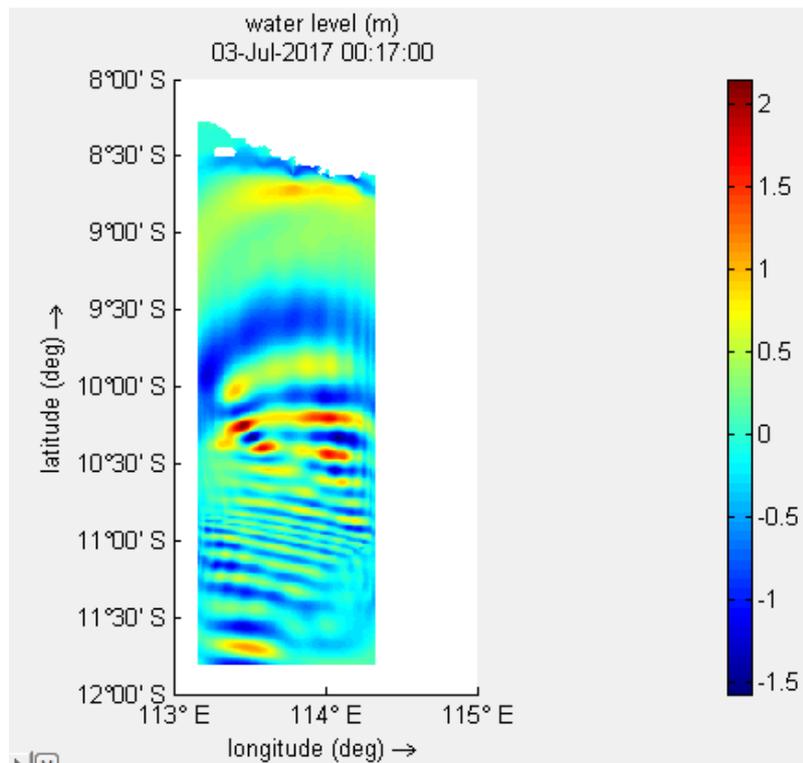
Gambar 4.11 Tampilan *Output Water Level 00:06:00*



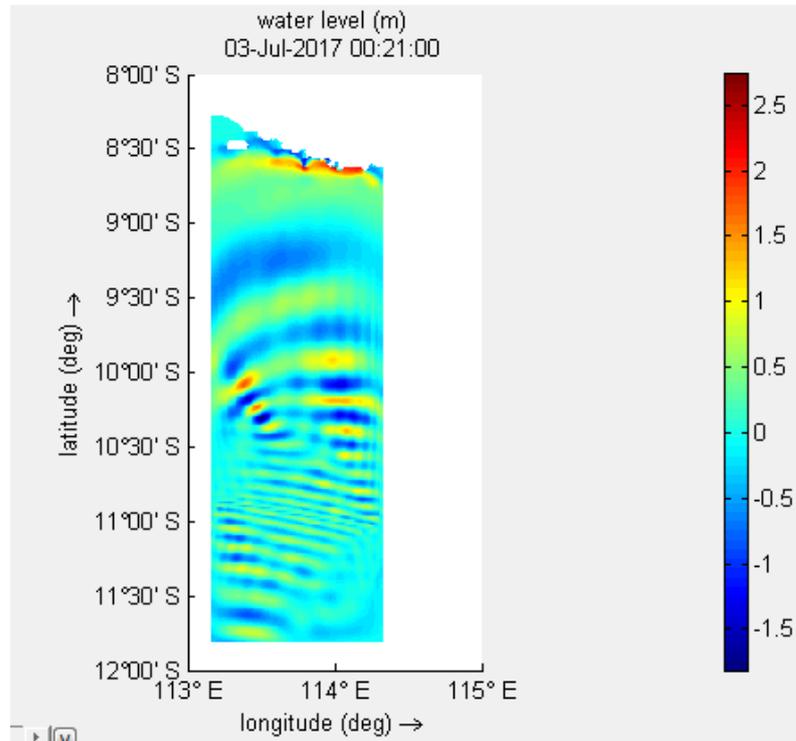
Gambar 4.12 Tampilan *Output Water Level 00:11:00*



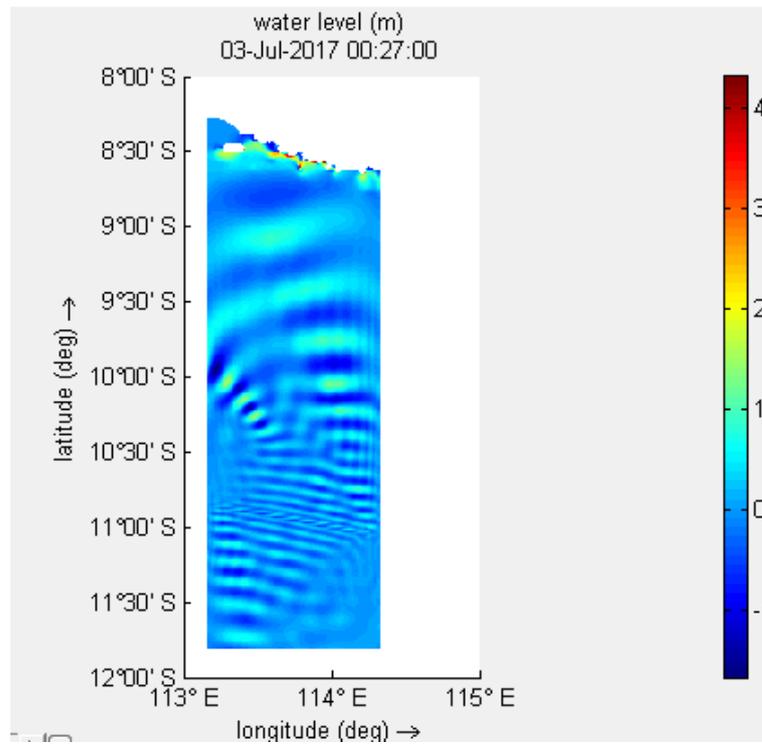
Gambar 4.13 Tampilan *Output Water Level 00:14:00*



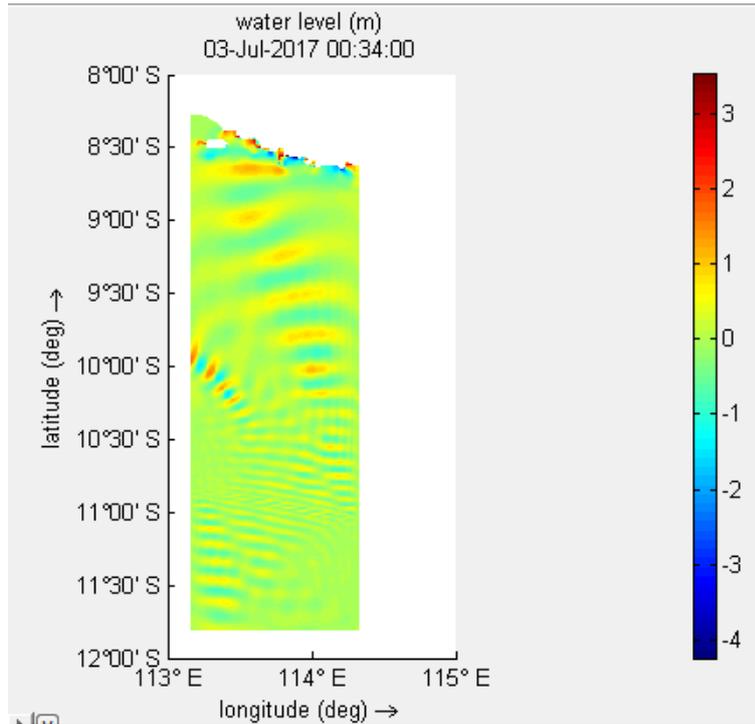
Gambar 4.14 Tampilan *Output Water Level 00:17:00*



Gambar 4.15 Tampilan *Output Water Level 00:21:00*



Gambar 4.16 Tampilan *Output Water Level 00:27:00*



Gambar 4.17 Tampilan *Output Water Level 00:34:00*

4.6 Validasi Model

Untuk beberapa kejadian tsunami yang disebabkan oleh gempa bumi, ketinggian gelombang mula – mula di episentrum dapat bergantung pada faktor berikut :

1. Kedalaman pusat gempa (episentrum) di bawah laut h (km)
2. Kekuatan gempa dalam M (SR)
3. Kedalaman air diatas epicentrum (*initial condition* = m)

Berdasarkan *initial condition* hasil permodelan diperoleh nilai tinggi gelombang diatas episentrum sebesar 2 meter. Untuk mencari seberapa besar tinggi gelombang di pantai, maka dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan tinggi gelombang laut dangkal :

$$h_1 = \sqrt[4]{\frac{d_0}{d_1}} \cdot h_0$$

Keterangan :

h_1 : tinggi gelombang pada kedalaman yang diinginkan (m)

h_0 : tinggi gelombang di laut dalam/pusat episentrum (m)

d_1 : kedalaman laut dekat pantai (m)

d_0 : kedalaman laut episentrum (m)

Dilakukan perhitungan dengan menggunakan persamaan tersebut. Mulai dari kedalaman di episentrum sebesar 6000 m hingga kedalaman laut mendekati pantai sebesar 3 m. diperoleh nilai dari tinggi gelombang sebesar 5,52 meter, artinya gelombang yang mencapai pantai sekitar 5,52 meter untuk keadaan *initial condition* gelombang 2 meter.

Selain itu dengan mempertimbangkan tabel berikut bisa digunakan untuk validasi :

Tabel 4.2 Hubungan Antara Tinggi Gelombang Episentrum dan Tsunami Pantai
(Triadmodjo, 2004)

m	H (meter)
5	> 32
4.5	24 - 32
4	16 - 24
3.5	12 - 16
3	8 - 12
2.5	6 - 8
2	4 - 6
1.5	3 - 4
1	1.5 - 2

Keterangan :

m : ketinggian gelombang di atas episentrum (meter)

H : tinggi gelombang di pantai (meter)

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 KESIMPULAN

Dari hasil permodelan simulasi penjalaran gelombang tsunami dan ketinggiannya didapatkan sebagai berikut :

1. Parameter gempa yang dapat menimbulkan tsunami berdasarkan kekuatan yang didapatkan dari hasil simulasi Monte Carlo sebesar 8,92 Skala Richter sebagai berikut :

Tabel 5.1 Data Parameter Besar Gempa Pembangkit Tsunami

Parameter – parameter	Nilai
Magnitude	8,98 M_w
Koordinat	10,82 ⁰ LS dan 113,576 ⁰ BT
Kedalaman	15 km
Panjang Patahan (SRL)	1249,62 km
Lebar Patahan (RW)	46,26 km
Luas Patahan (RA)	46123,26 km ²
Dislokasi	15 m
<i>Strike</i> (θ)	278 ⁰
<i>Dip</i> (δ)	17 ⁰
<i>Slip</i> (λ)	89 ⁰

2. Waktu tempuh penjalaran gelombang tsunami di Pantai Watu Ulo Jember sebesar 34 menit dengan jarak pusat episentrum menuju pantai sejauh 260 km. Berdasarkan *observation point* yang sudah dibuat, diperoleh nilai *set up* tertinggi sebesar 5,52 meter.

5.2 SARAN

Pengerjaan Tugas Akhir ini tentu tidak luput dari kesalahan dan kekeliruan, sehingga penulis berharap Tugas Akhir ini dapat dikoreksi dan ditingkatkan untuk menjadi lebih baik. Agar penelitian tentang Bencana Alam di

Indonesia mampu bersaing di Asia Tenggara khususnya maupun dunia. Keterbatasan dalam mengerjakan Tugas Akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Beberapa parameter gempa masih menggunakan data historis yang pernah terjadi dan bukan hasil perhitungan analitis (*Strike angle, Dip angle, Slip Angle*)
2. Permodelan menggunakan *DelftDashboard* dan *Delft3D* bisa dilakukan hanya sampai di garis pantai (*set up*) saja, untuk mencari *run up* serta genangan sampai daratan perlu dilakukan dengan menggunakan *software* lain.
3. Perlu dilakukan penelitian yang lebih lanjut di daerah yang rawan bencana, khususnya tsunami dan cara mitigasi yang tepat.

DAFTAR PUSTAKA

- An, Chao and Yongen Cai. 2010. *The Effect of Beach Slope on The Tsunami Run-Up Incuced by Thrust Fault Earthquakes*. International Conference on Computational Science, ICCS.
- Departemen ESDM. *Pengenalan Tsunami* pada website resmi departemen ESDM pada tanggal 17 Maret 2017 pukul 10.00 WIB.
- Donald L. Wells and Kevin J. Coppersmith. 1994. *New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area, and Surface Displacement*. Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 84, No. 4, pp. 974-1002
- Hammack, Joseph L. 1980. *Baroclinic Tsunami Generation*. Berkeley : University of California.
- Imamura, F. and M.Kikuchi. 1994. *Moment Release of the 1992 Flores Island Earthquake Inferred from Tsunami and Teleseismic Data*. Science of Tsunami Hazards. Vol.12, No.2, pp.67-76.
- Joseph, Antony. 2011. *Tsunamis Detection, Monitoring, and Early – Warning Technologies*. USA : ELSEVIER.
- Jian, Wei, Shawn Y. Sim, Zhenhua Huang, Edmond Yat-Man Lo. 2015. *Modelling of Solitary Wave Run-Up an Onshore Coastall Cliff by Smoothed Particle Hydrodynamics Method*. 8th International Conference on Asian and Pasific Coast (APAC).
- Kawasaki, Koji and Kazuki Suzuki. 2015. *Numerical Simulation of Tsunami Run-Up and Innundation Employing Horizontal Two-Dimensional Model Based on CIP Method*. 8th International Conference on Asian and Pacific Coast (APAC).
- Latief dan Hamzah, 2000. *Research on Tsunami Risk and Its Reduction in Indonesia* .Bandung : ITB.
- Maghfiroh, Asti. 2013. *Simulasi Perjalanan dan Prediksi Run-Up Gelombang Tsunami di Pantai Malang*. Surabaya : ITS.

- Pradjoko, Eko, Triafiyana Kusuma, Oki Setyandito, Agus Suroso, Bambang Harianto. 2014. *The Tsunami Run-Up Assesment og 1977 Sumba Earthquake in Kuta, Center of Lombok, Indonesia*. 2nd International Seminar on Ocean and Coastal Engineering, Environment and Natural Disaster Management, ISOCEEN.
- Purwa, Qistiyan. 2014. *Simulasi Pembangkitan dan Penjalaran Gelombang Tsunami Berdasarkan Skenario Tektonik*. Surabaya : ITS.
- Sato, Aki-Hiro and Hidefumi Sawai. 2014. *Geographical risk assesment from tsunami run-up events based on socioeconomic-environmental data and its application to Japanese air transportation*. Robust Manufacturing Conference (RoMaC).
- Siagian, Todung R. 2011. *Jenis-jenis Patahan yang Menagibatkan Gempa*. <https://strukturawam.wordpress.com/2011/03/14/jenis-patahan-yang-mengakibatkan-gempa/> diakses pada tanggal 19 Maret 2017 pukul 15.00 WIB.
- “The Bottom Friction”. <http://www.phy.ornl.gov/csep/om/node9.html>
- http://nasional.news.viva.co.id/news/read/0sejarah_gempa_dan_tsunami_di_jawa_timur diakses pada tanggal 22 Maret 2017 pukul 12.30 WIB
- Triatmojo, B. 1999. *Teknik Pantai*. Beta Offset : Yogyakarta.

LAMPIRAN 1
DATA GEMPA DAERAH SELATAN
JAWA (1960 – 2016)

LAMPIRAN 1

Data Gempa Wilayah Selatan Pulau Jawa (*Sumber : USGS*)

Time	Latitude	Longitude	Depth	Magnitude
2016-04-06T14:45:29.620Z	-8.204	107.386	29	6.1
2014-01-25T05:14:18.510Z	-7.986	109.265	66	6.1
2013-06-13T16:47:23.320Z	-10	107.236	9	6.7
2012-09-03T18:23:05.230Z	-10.71	113.931	14	6.1
2011-10-13T03:16:30.160Z	-9.35	114.587	39	6.1
2011-04-03T20:06:40.390Z	-9.848	107.693	14	6.7
2009-10-16T09:52:50.830Z	-6.534	105.223	38	6.1
2009-09-07T16:12:22.560Z	-10.2	110.628	23	6.2
2009-09-02T07:55:01.050Z	-7.782	107.297	46	7
2007-06-26T22:23:03.040Z	-10.49	108.149	10	6
2006-09-21T18:54:50.050Z	-9.05	110.365	25	6
2006-07-19T10:57:36.880Z	-6.535	105.389	45	6.1
2006-07-17T15:45:59.820Z	-9.42	108.319	21	6.1
2006-07-17T09:13:04.960Z	-9.087	107.76	10	6
2006-07-17T08:19:26.680Z	-9.284	107.419	20	7.7
2006-05-26T22:53:58.920Z	-7.961	110.446	12.5	6.3
2005-01-15T13:47:05.130Z	-6.462	105.236	58.7	6
2003-05-14T07:40:36.100Z	-8.06	107.315	79.1	6
2002-01-15T07:12:58.030Z	-6.314	105.205	10	6.1
2001-05-25T05:06:10.680Z	-7.869	110.179	143	6.3
2000-10-25T09:32:23.970Z	-6.549	105.63	38	6.8
1999-12-21T14:14:57.610Z	-6.845	105.555	56	6.5
1998-09-28T13:34:30.490Z	-8.194	112.413	152	6.6
1997-03-17T08:05:48.410Z	-6.614	105.514	33	6.4
1996-12-09T03:54:16.310Z	-7.936	107.489	50.9	6.1
1994-06-15T10:28:50.600Z	-10.17	113.749	28.8	6.1
1994-06-15T09:22:57.220Z	-10.34	113.66	19.9	6.2
1994-06-05T01:45:02.160Z	-10.35	113.398	25.9	6.1
1994-06-04T00:57:50.660Z	-10.78	113.366	11.2	6.5
1994-06-03T21:06:59.880Z	-10.36	112.892	25.9	6.6
1994-06-02T18:17:34.020Z	-10.48	112.835	18.4	7.8
1992-06-09T00:31:56.310Z	-8.474	111.1	63.9	6.1
1991-07-05T04:30:52.550Z	-9.585	114.673	53.7	6.1
1988-08-17T01:59:07.710Z	-7.698	107.15	27.1	6
1987-12-17T20:22:58.360Z	-9.169	114.61	46	6
1985-10-09T01:15:04.660Z	-6.791	107.082	154	6.5
1985-03-22T14:42:58.630Z	-6.584	105.419	69.7	6.4

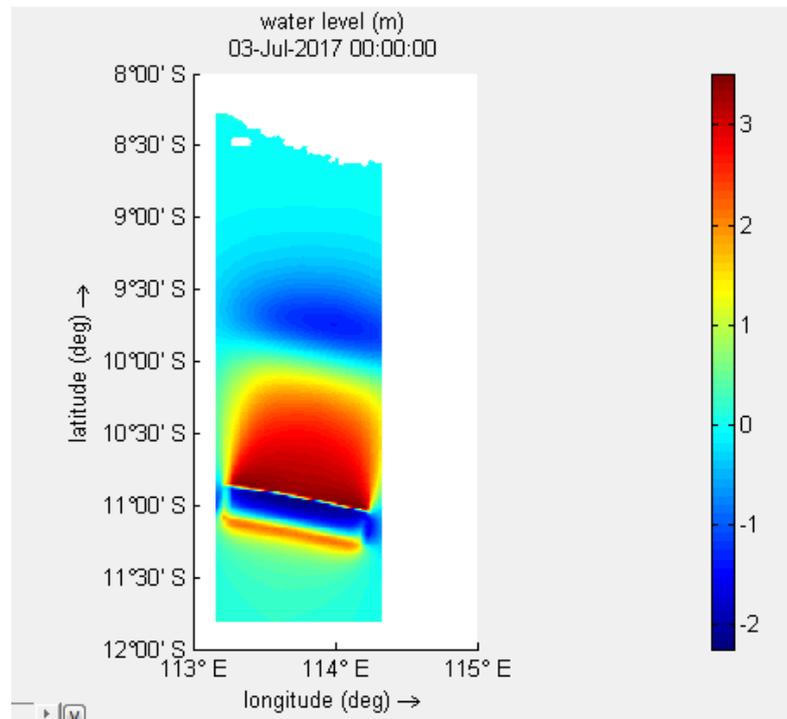
1984-03-10T09:02:00.660Z	-7.641	106.957	52.1	6
1979-11-02T15:53:03.500Z	-7.656	108.252	62	6.1
1979-07-24T19:31:19.800Z	-11.15	107.709	31	6.9
1974-11-09T19:10:55.200Z	-6.498	105.342	51	6.1
1974-09-07T20:43:11.500Z	-9.815	108.356	33	6.5
1974-05-17T20:55:11.200Z	-6.513	106.837	131	6
1972-11-04T21:35:56.000Z	-8.234	112.212	70	6
1971-05-04T02:04:32.000Z	-6.564	105.407	45	6.4
1967-02-19T22:14:36.000Z	-8.965	113.017	80	6.3

LAMPIRAN 2
PERHITUNGAN WAKTU TEMPUH
TSUNAMI

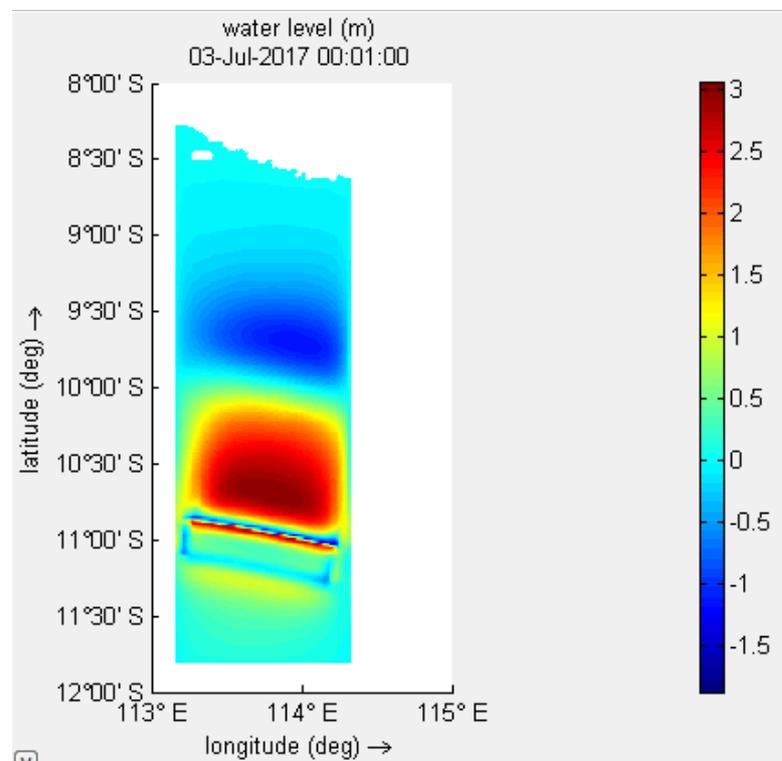
LAMPIRAN 3
VISUALISASI HASIL PERMODELAN

LAMPIRAN 4

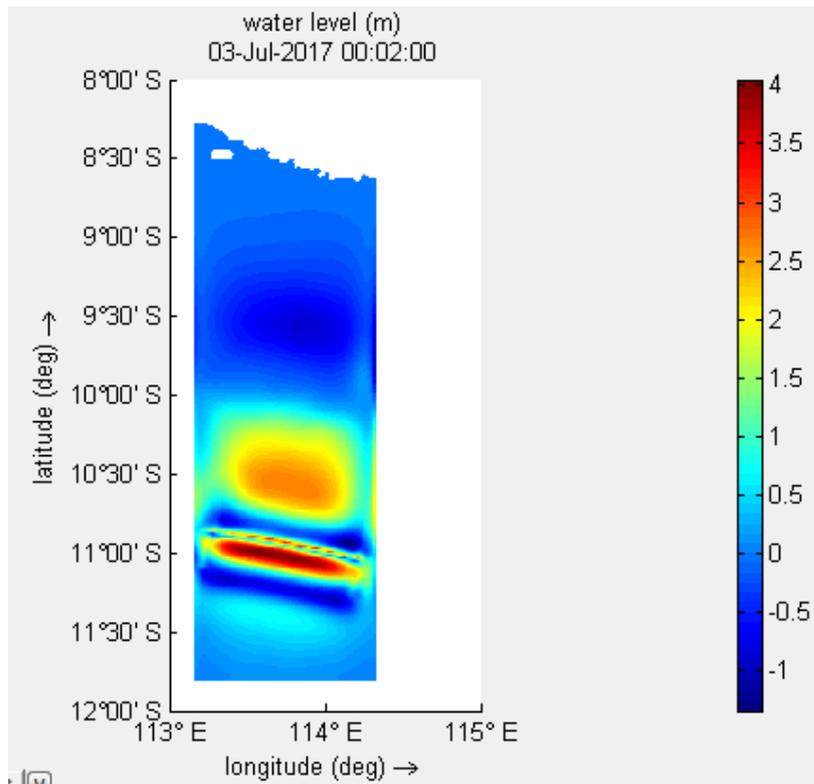
Visualisasi Hasil Permodelan



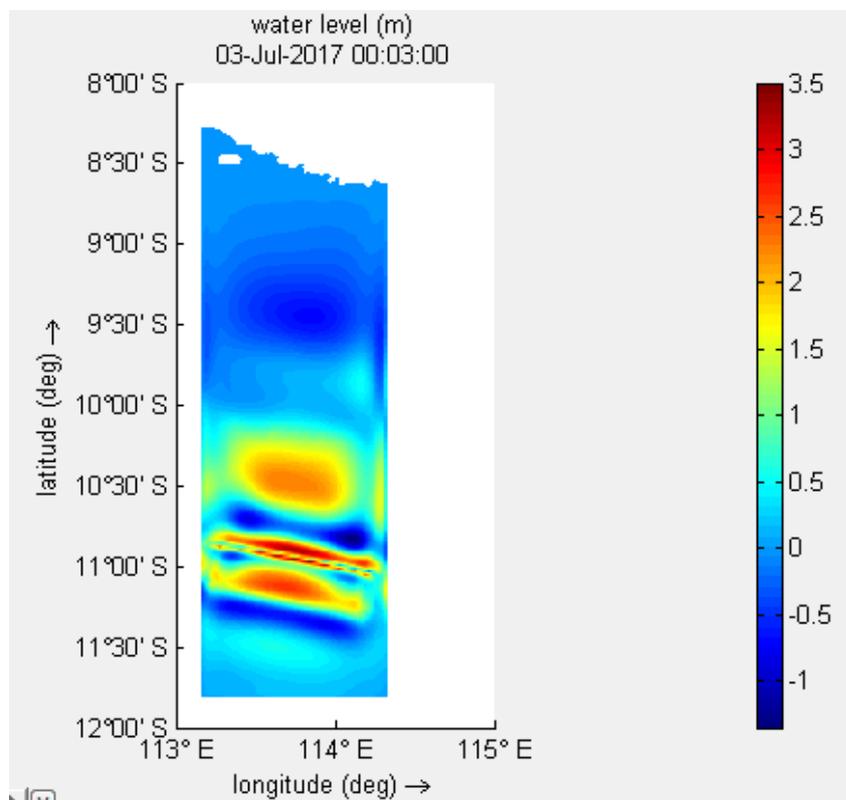
Visualisasi pada menit 00:00:00



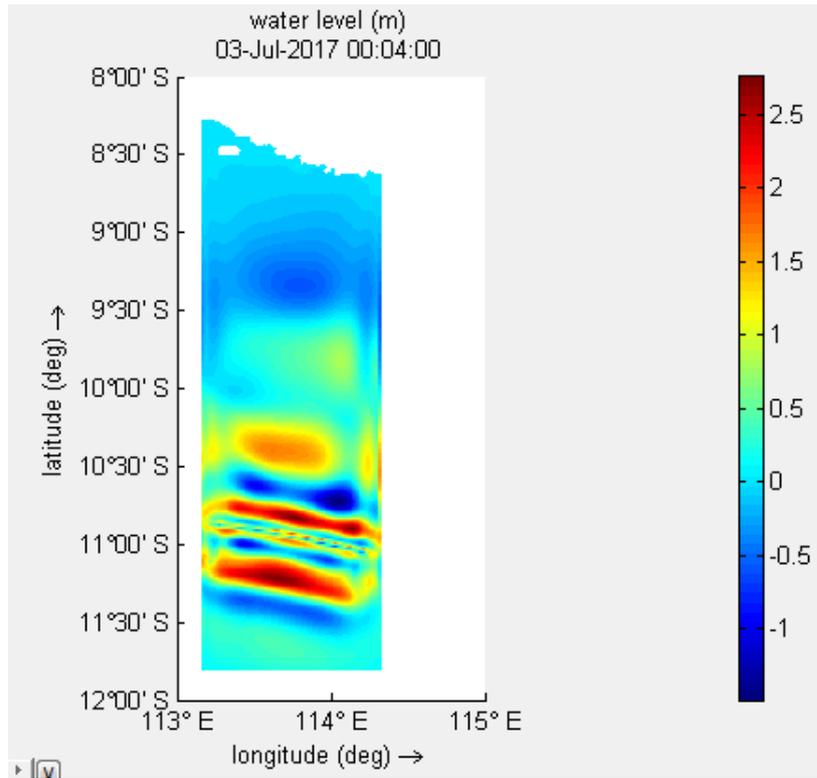
Visualisasi pada menit 00:01:00



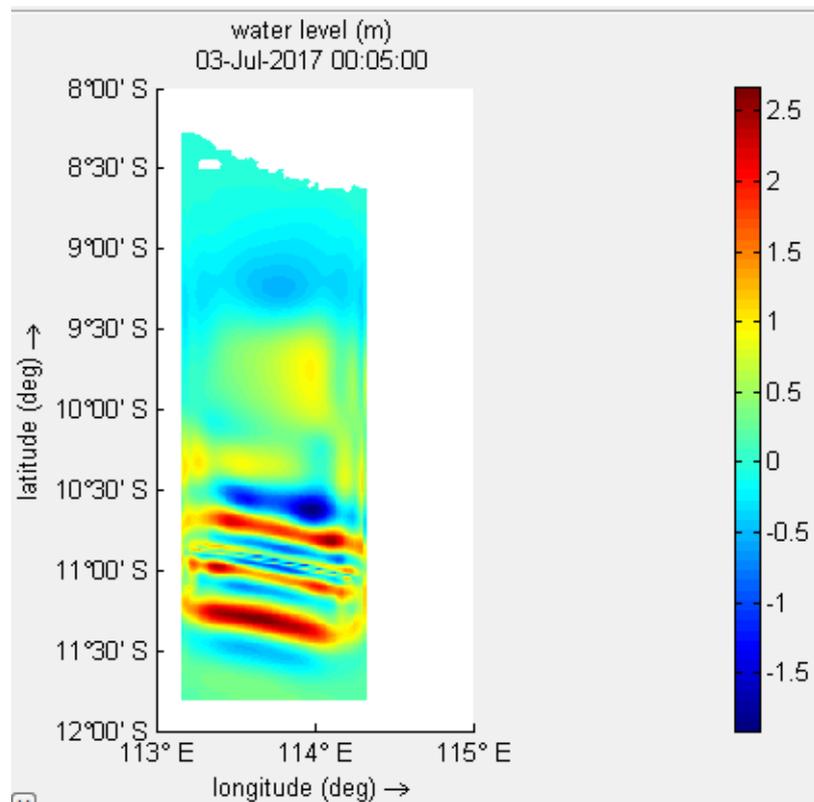
Visualisasi pada menit 00:02:00



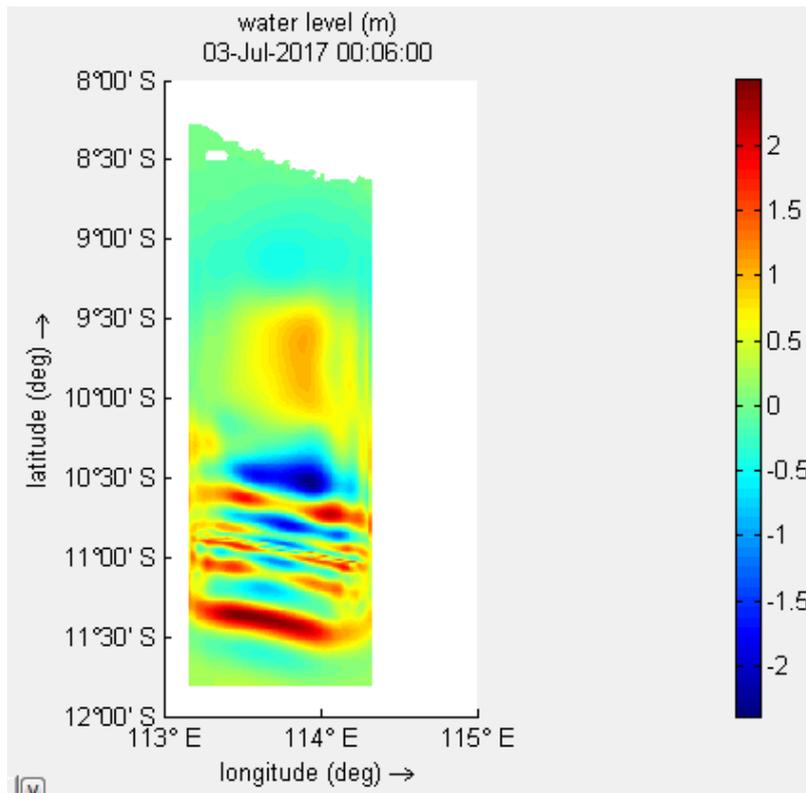
Visualisasi pada menit 00:03:00



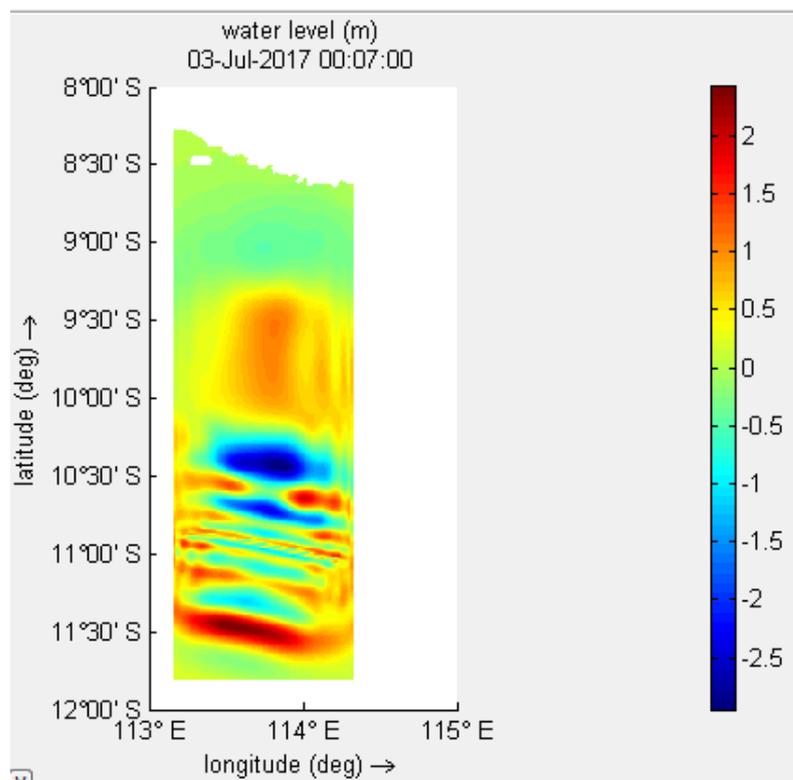
Visualisasi pada menit 00:04:00



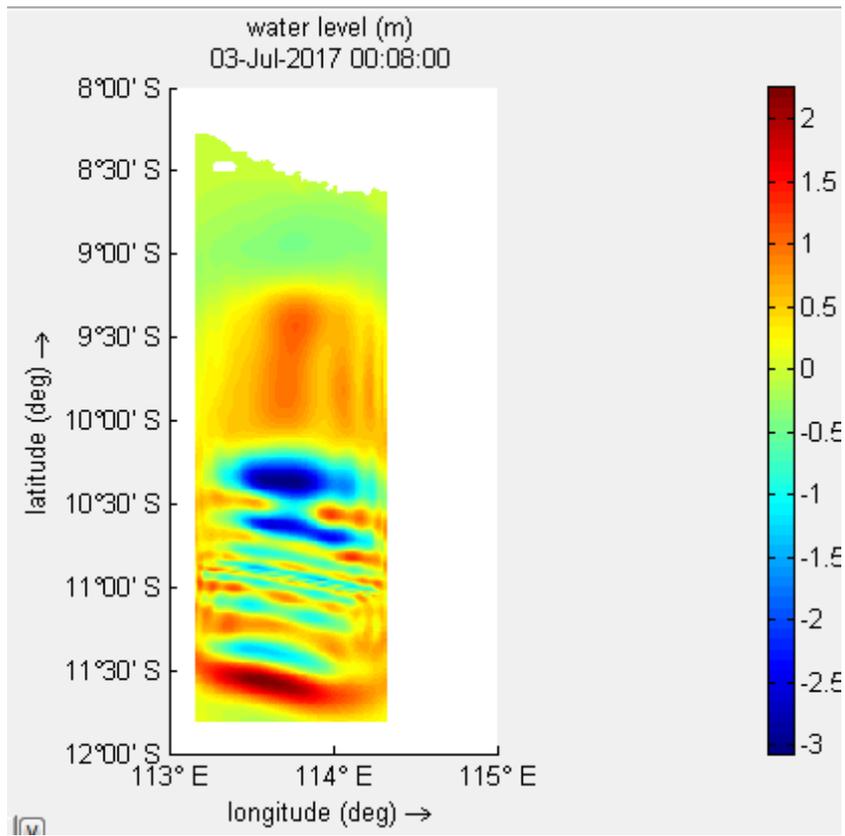
Visualisasi pada menit 00:05:00



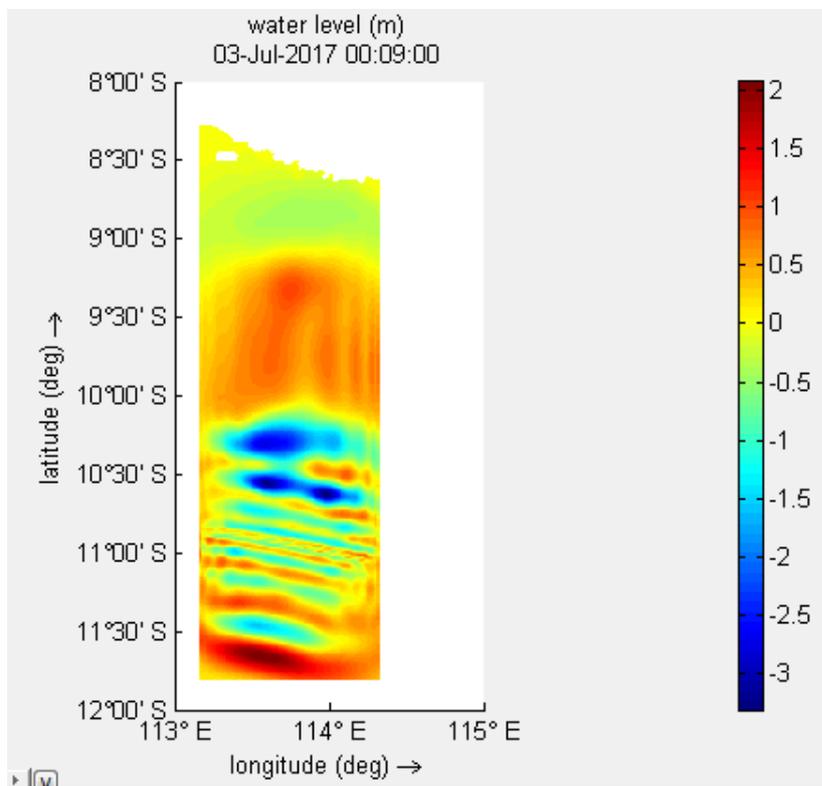
Visualisasi pada menit 00:06:00



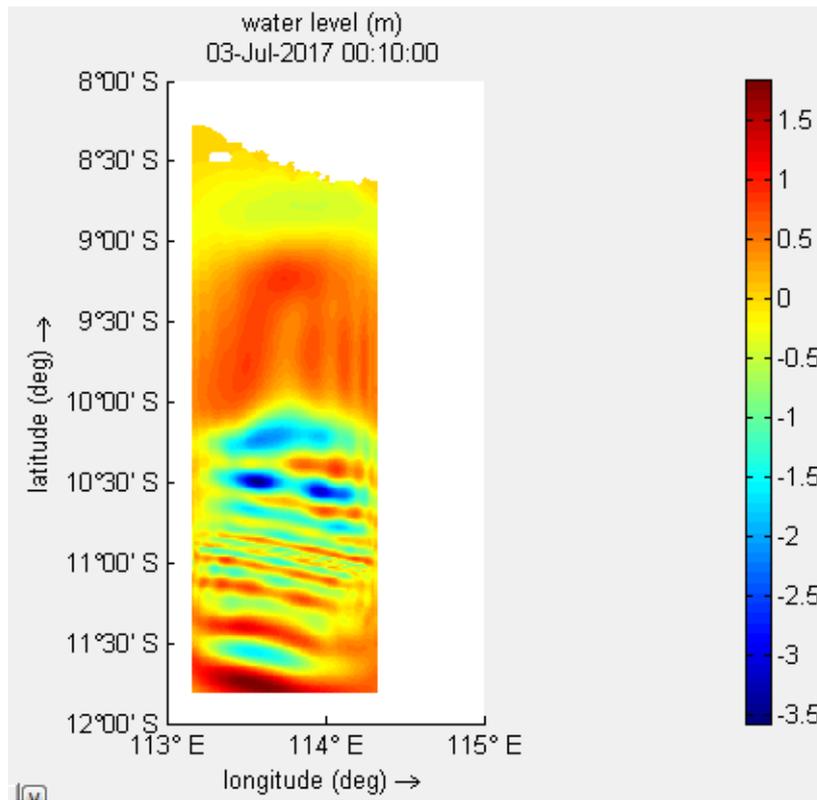
Visualisasi pada menit 00:07:00



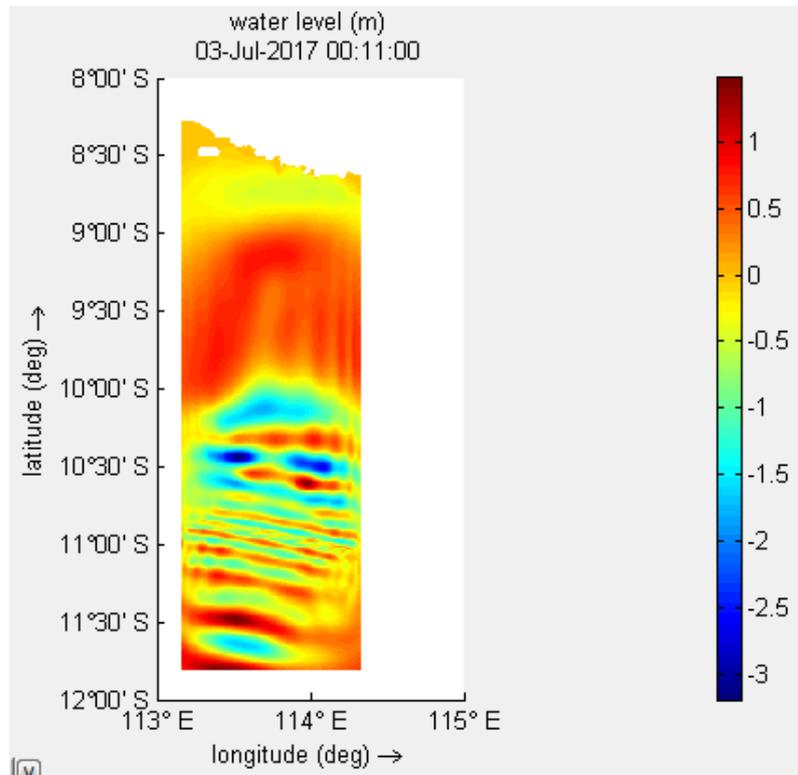
Visualisasi pada menit 00:08:00



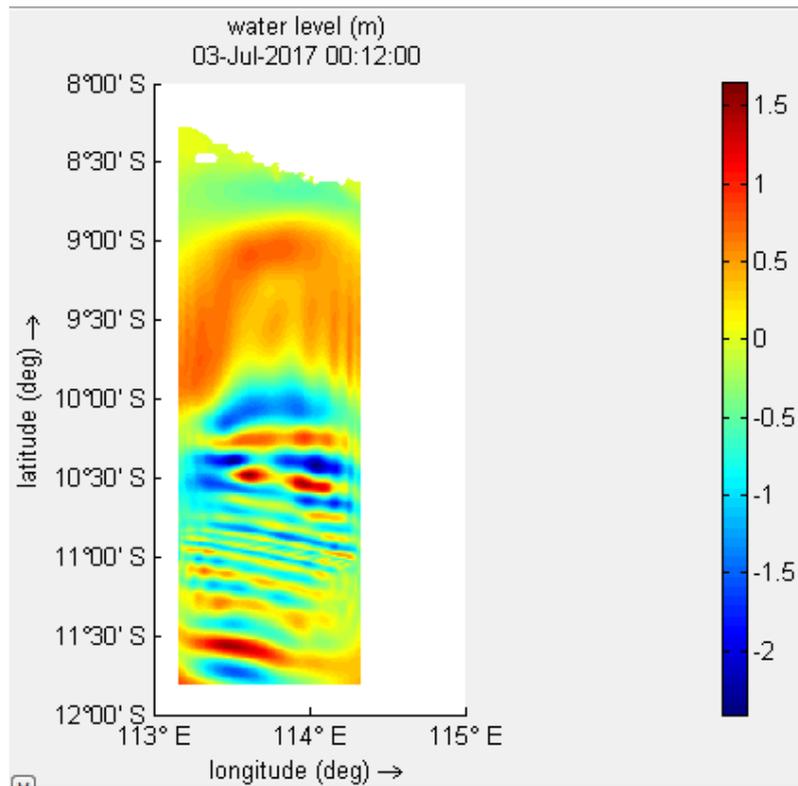
Visualisasi pada menit 00:09:00



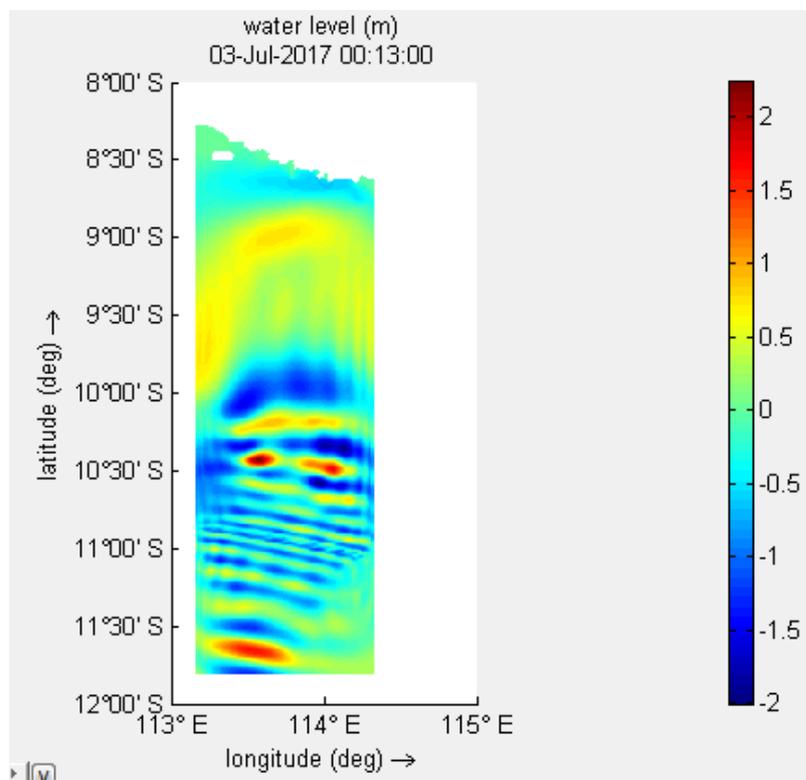
Visualisasi pada menit 00:10:00



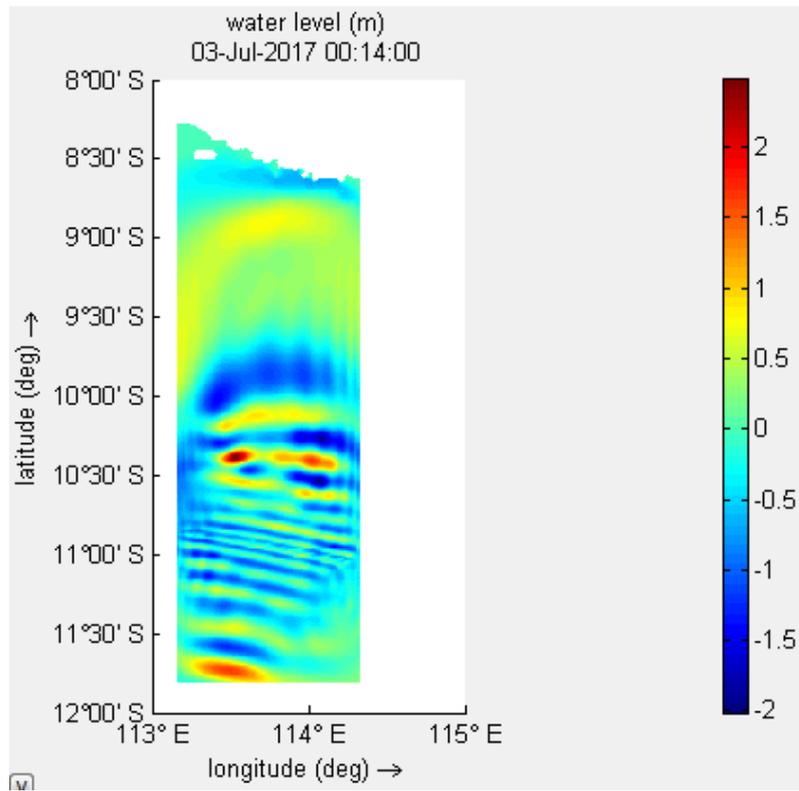
Visualisasi pada menit 00:11:00



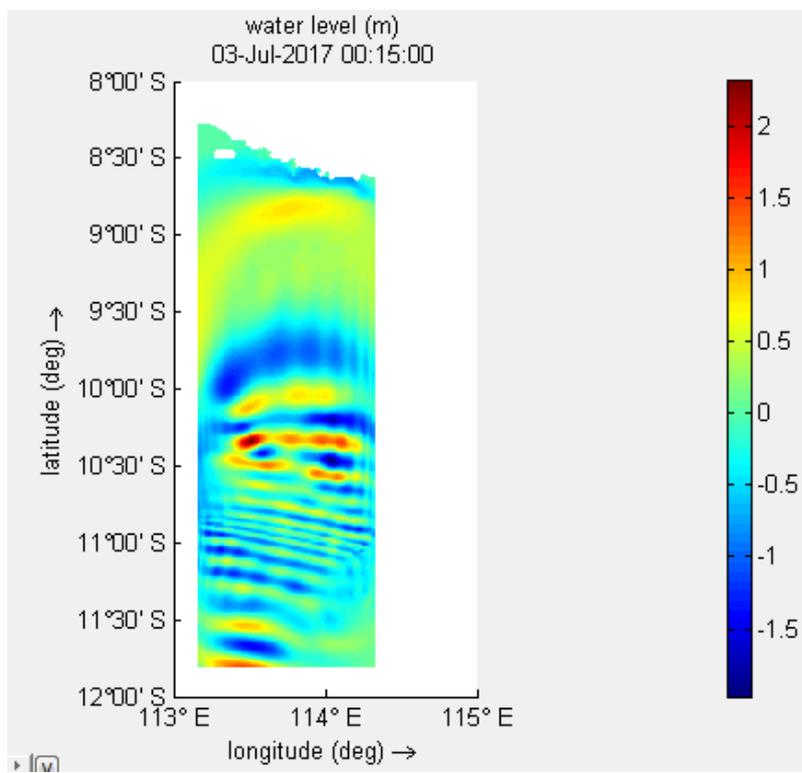
Visualisasi pada menit 00:12:00



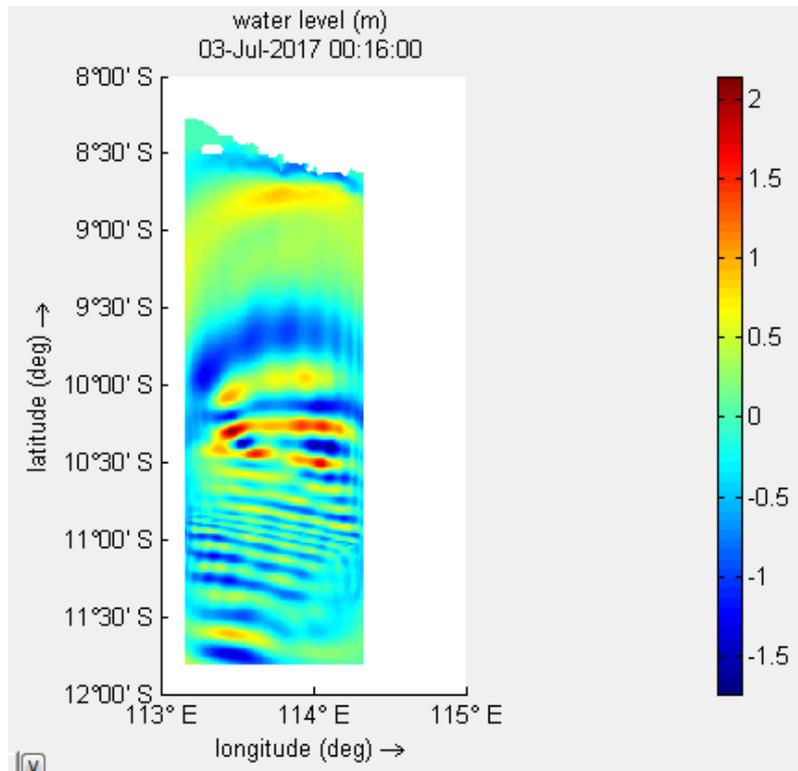
Visualisasi pada menit 00:13:00



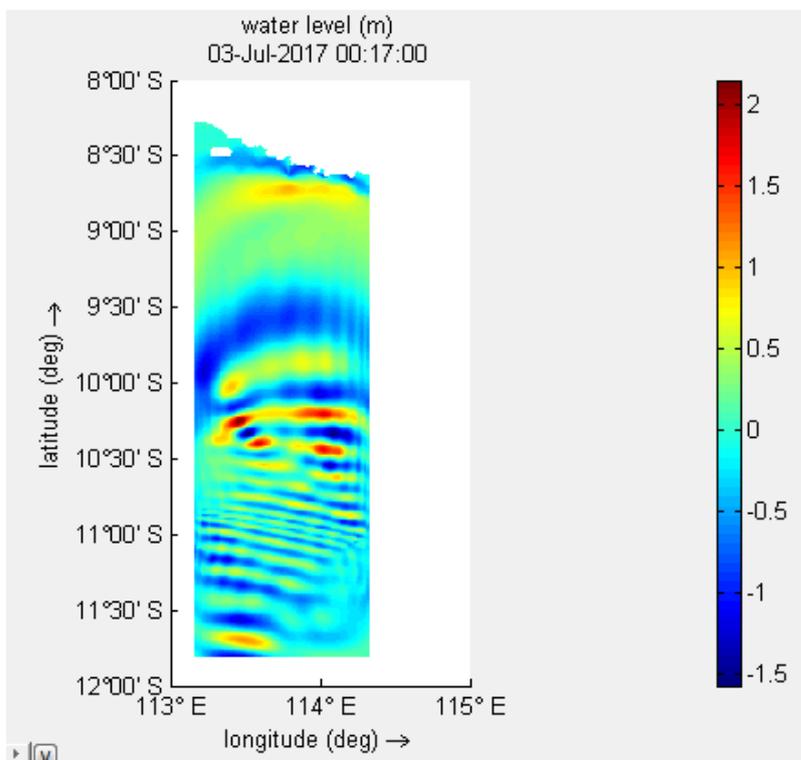
Visualisasi pada menit 00:14:00



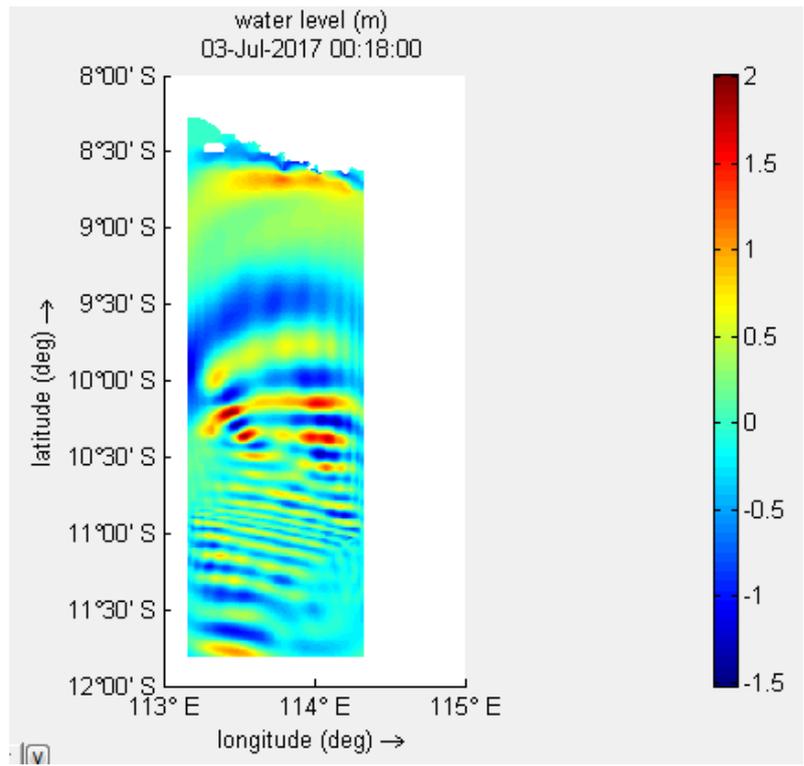
Visualisasi pada menit 00:15:00



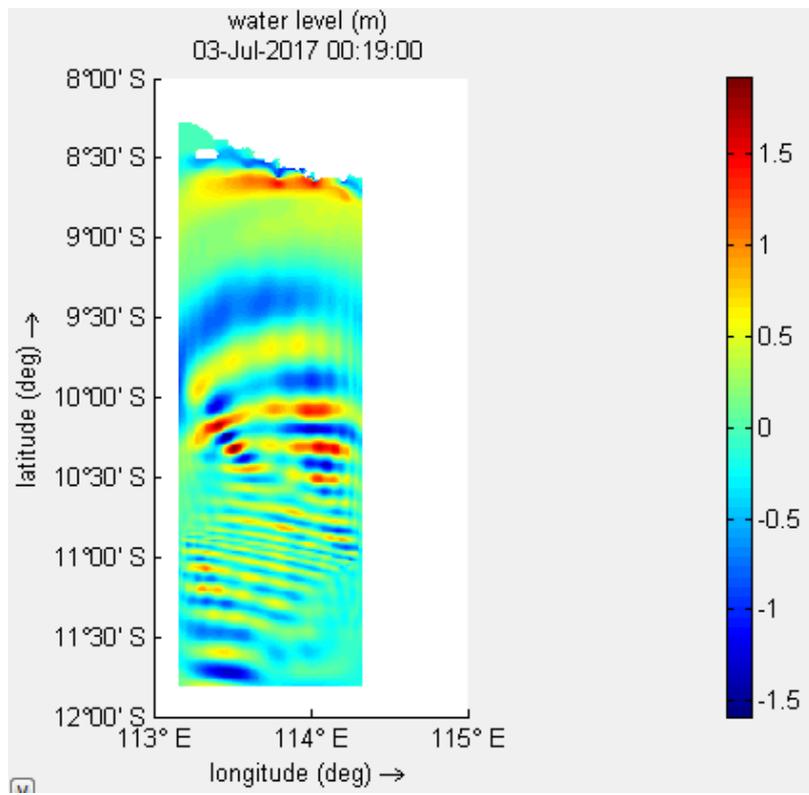
Visualisasi pada menit 00:16:00



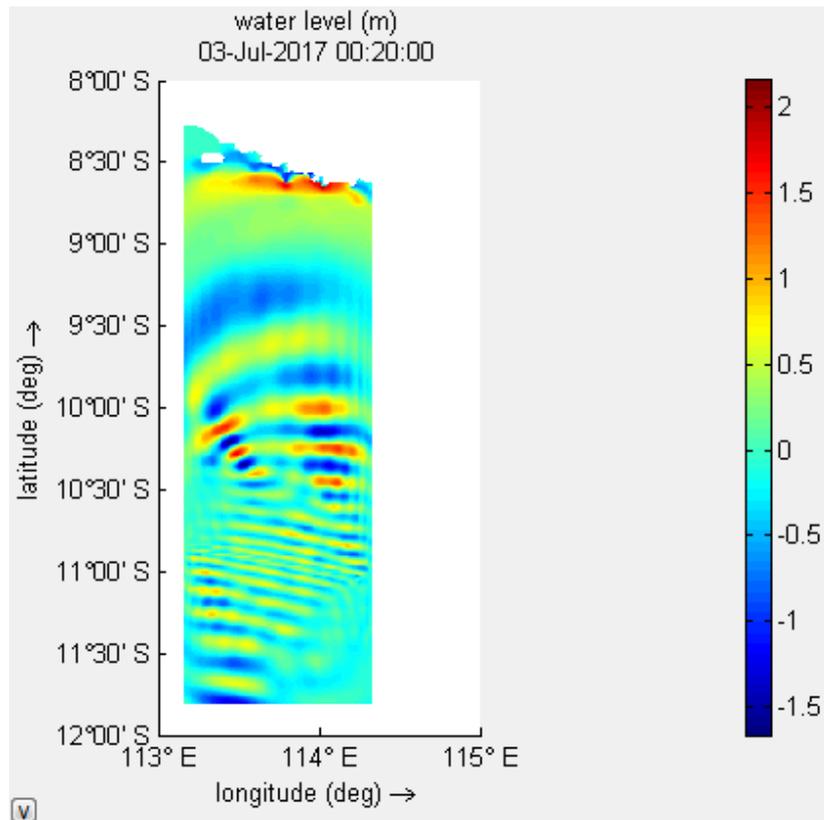
Visualisasi pada menit 00:17:00



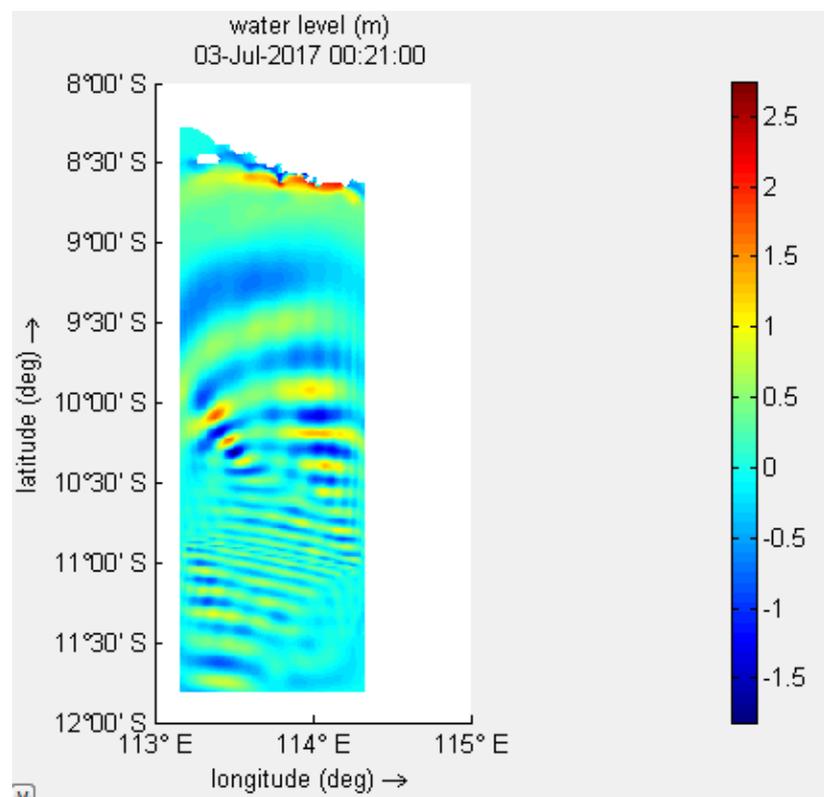
Visualisasi pada menit 00:18:00



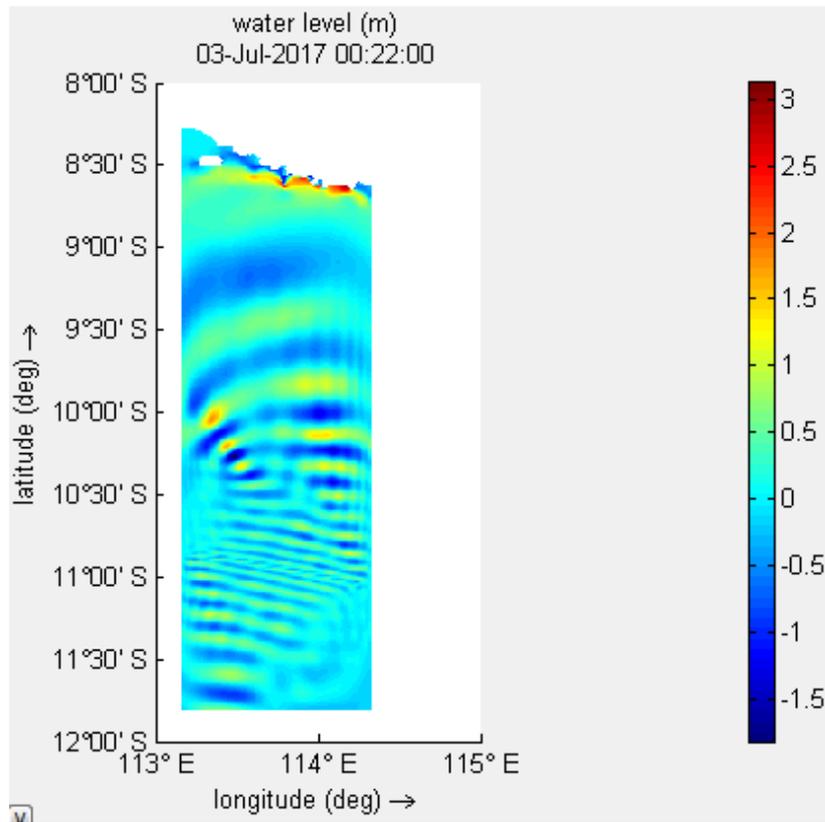
Visualisasi pada menit 00:19:00



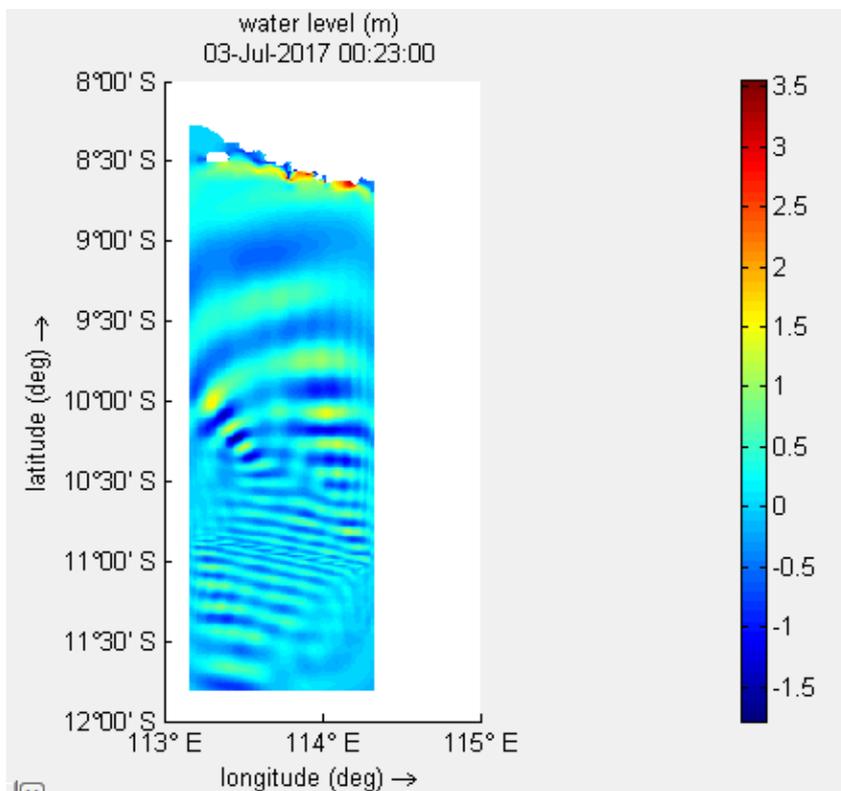
Visualisasi pada menit 00:20:00



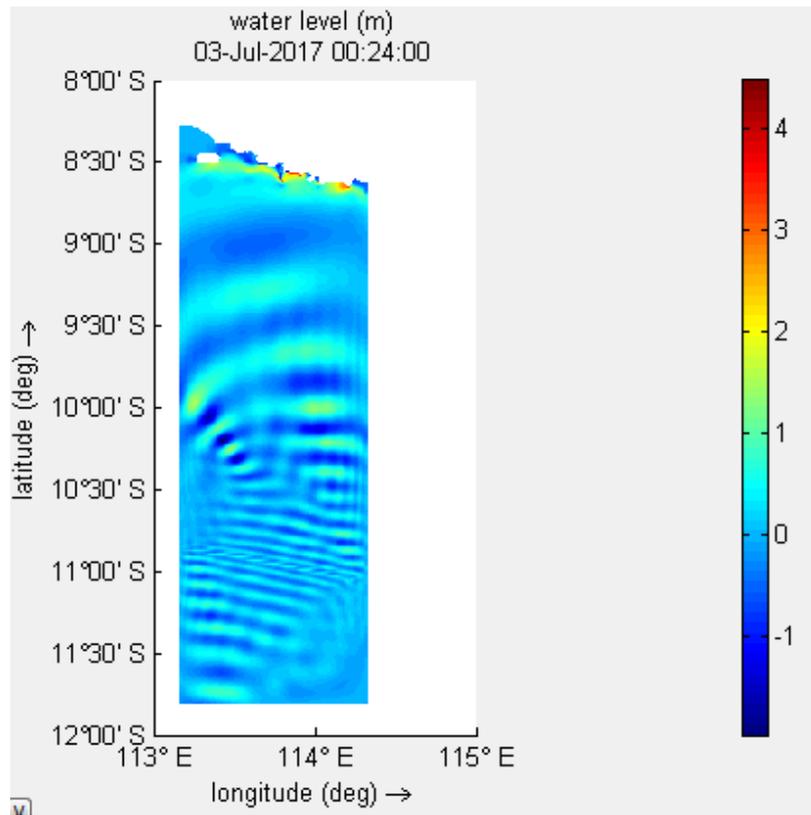
Visualisasi pada menit 00:21:00



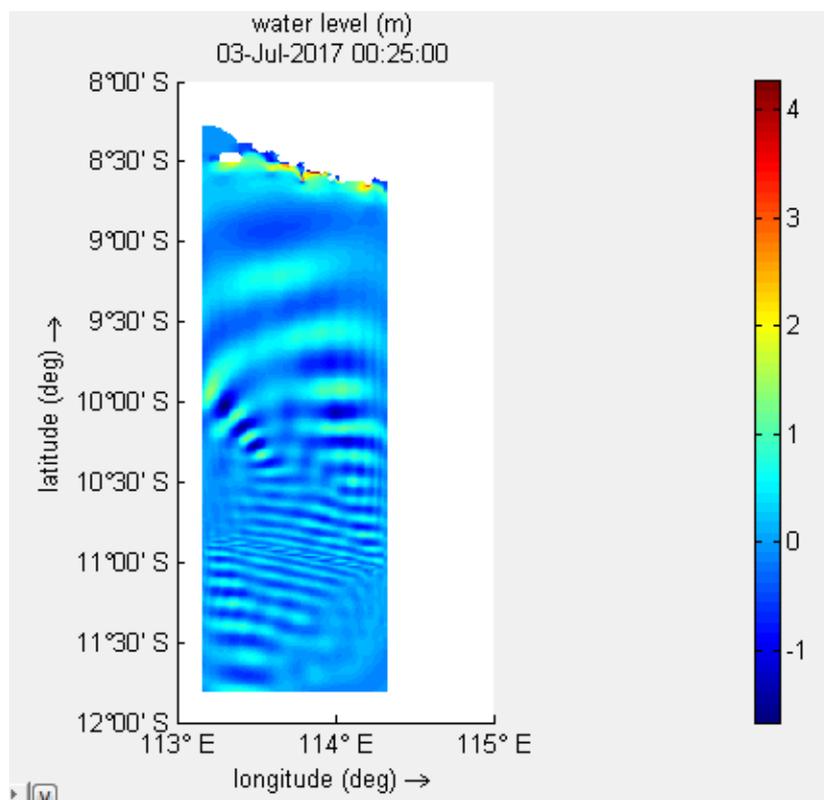
Visualisasi pada menit 00:22:00



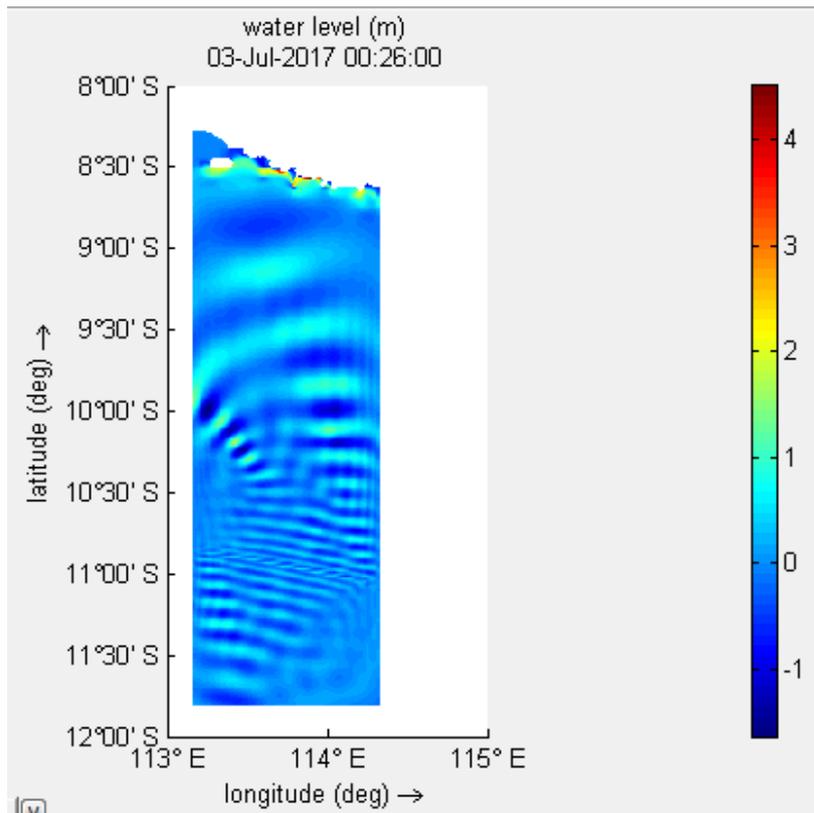
Visualisasi pada menit 00:23:00



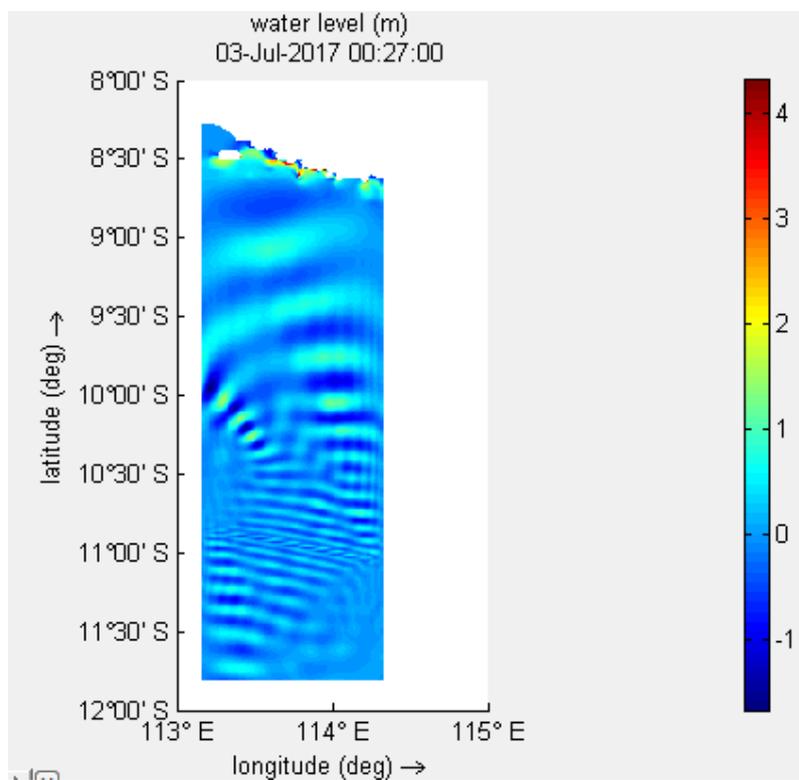
Visualisasi pada menit 00:24:00



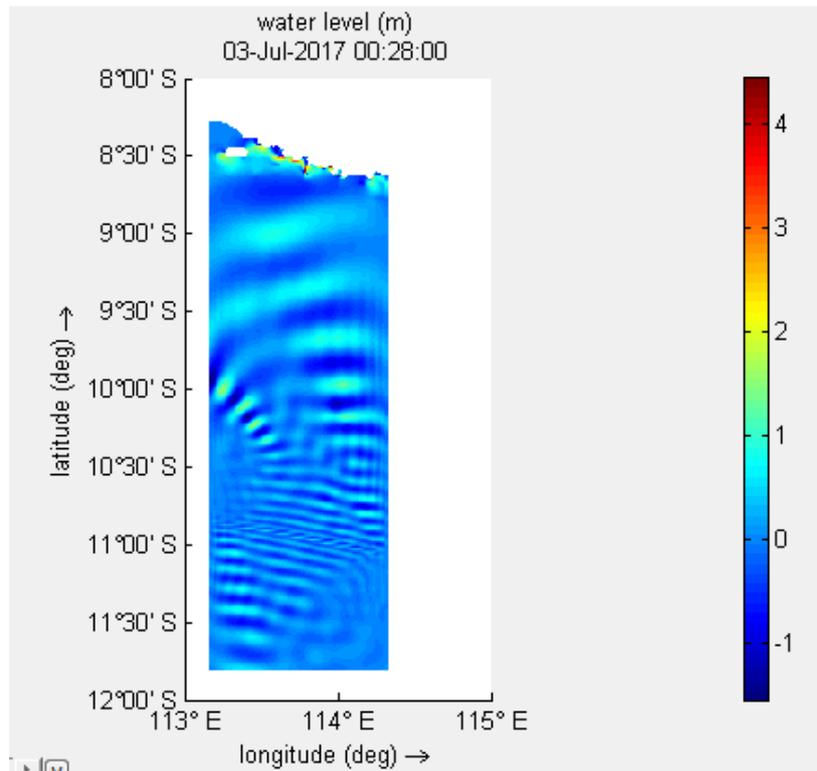
Visualisasi pada menit 00:25:00



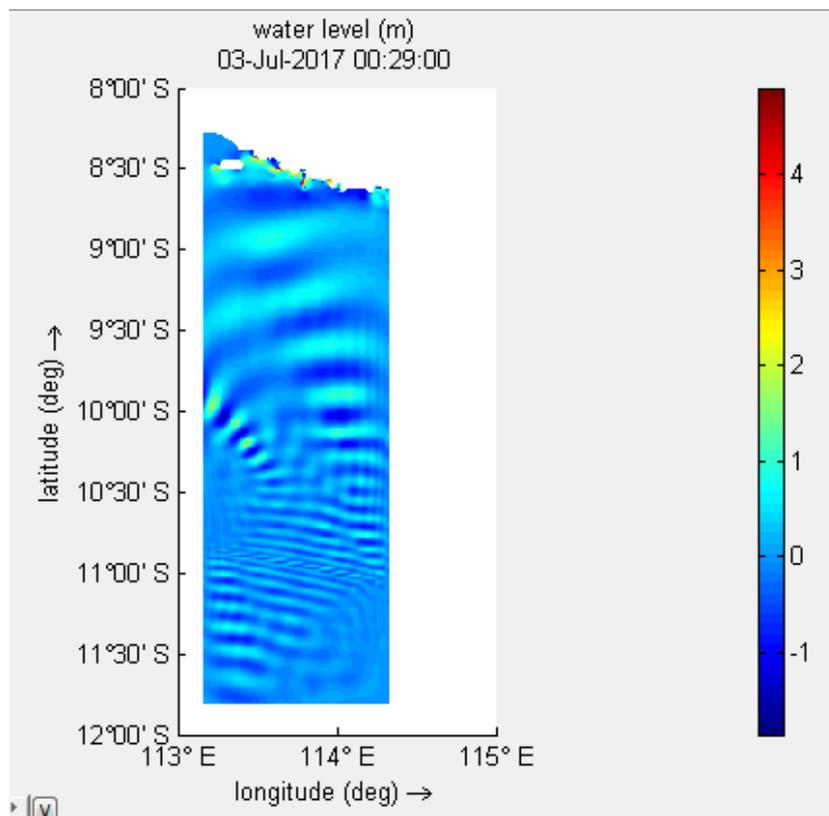
Visualisasi pada menit 00:26:00



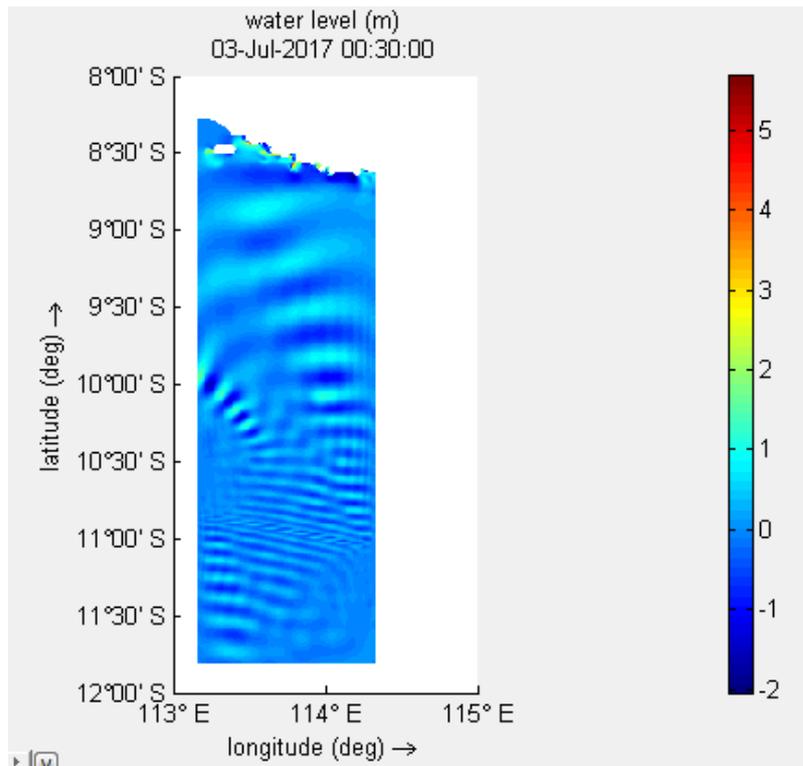
Visualisasi pada menit 00:27:00



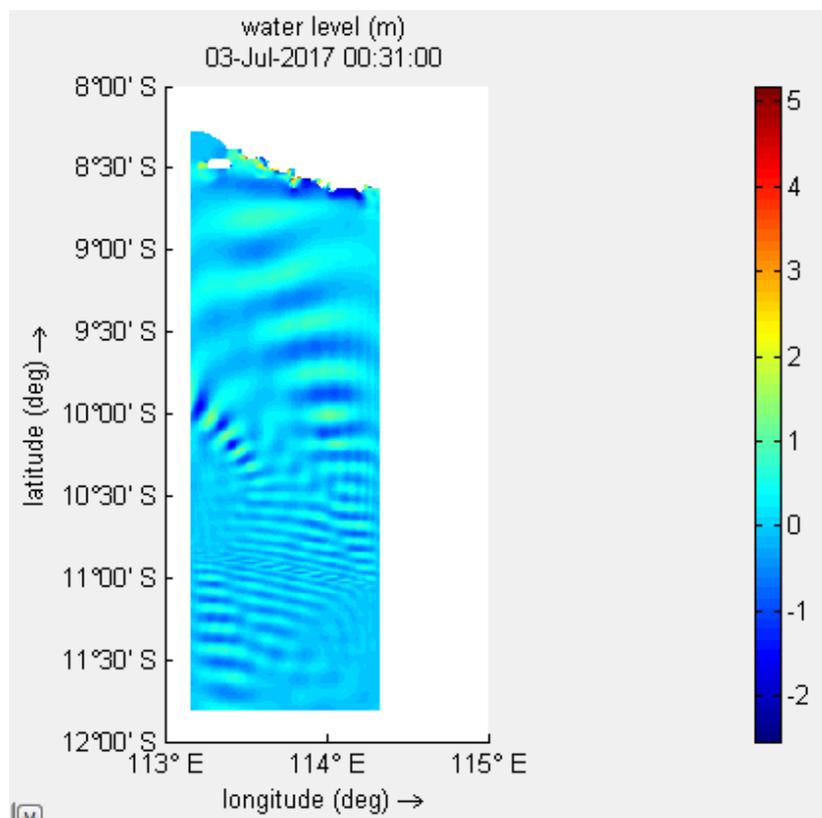
Visualisasi pada menit 00:28:00



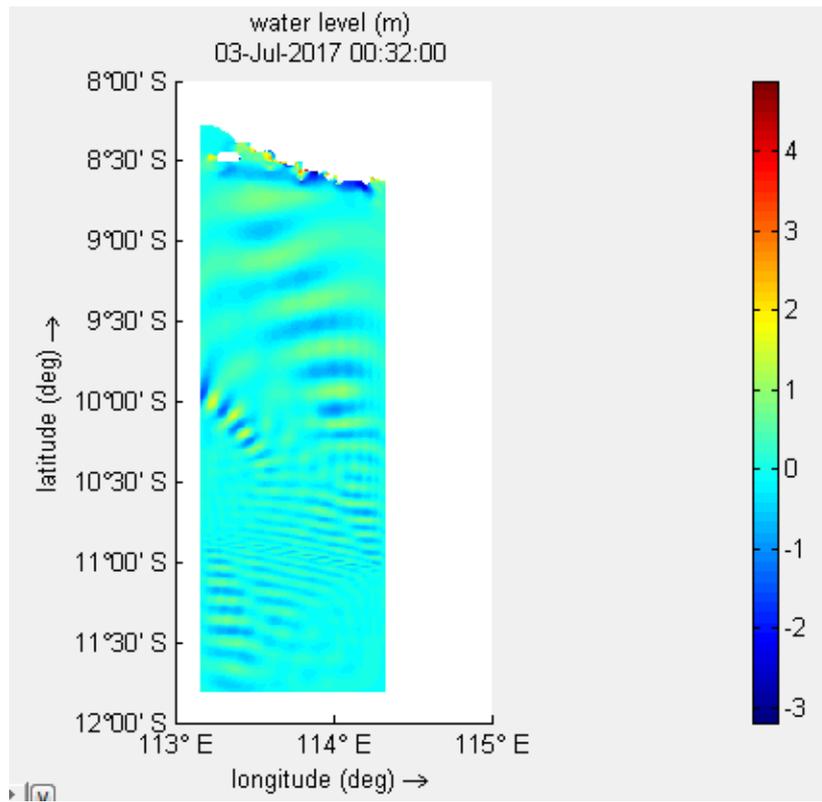
Visualisasi pada menit 00:29:00



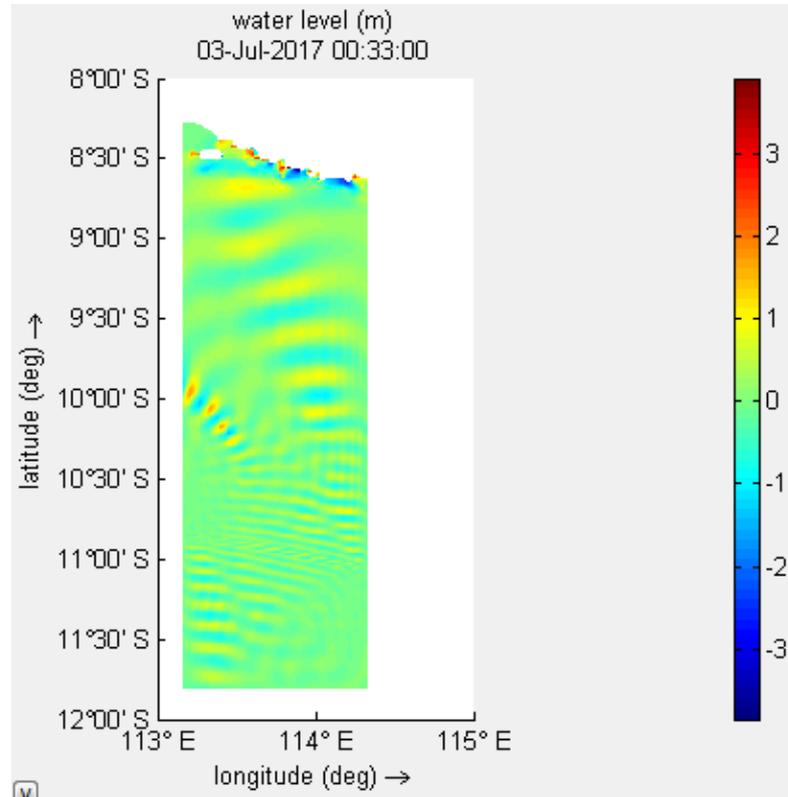
Visualisasi pada menit 00:30:00



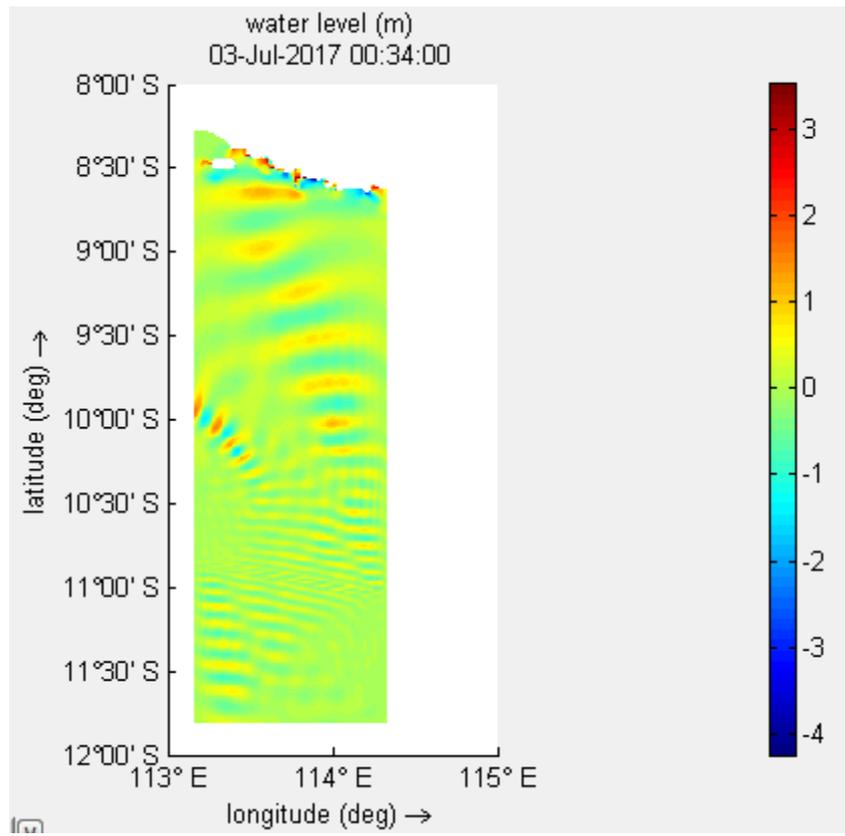
Visualisasi pada menit 00:31:00



Visualisasi pada menit 00:32:00



Visualisasi pada menit 00:33:00

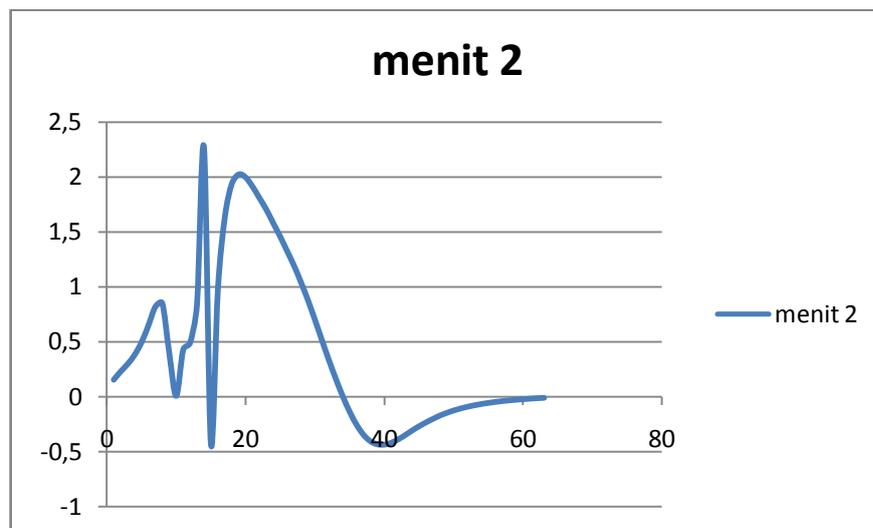
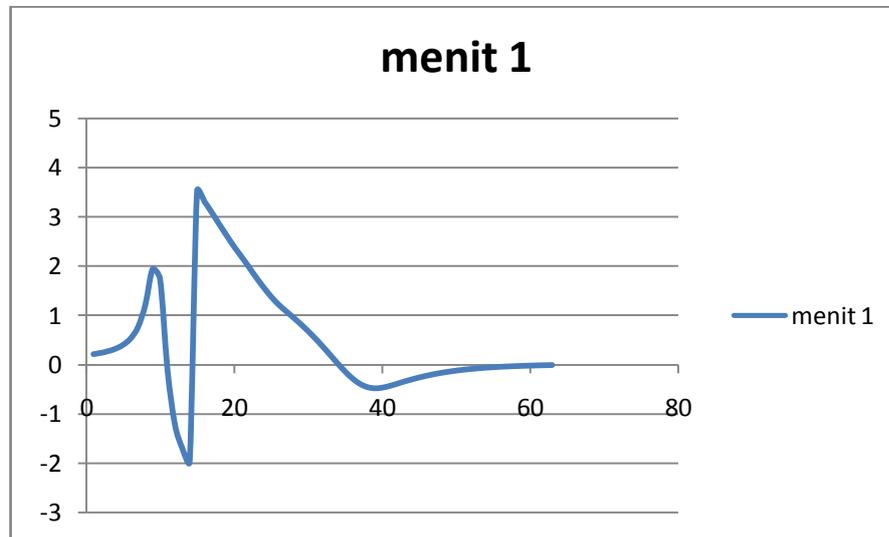


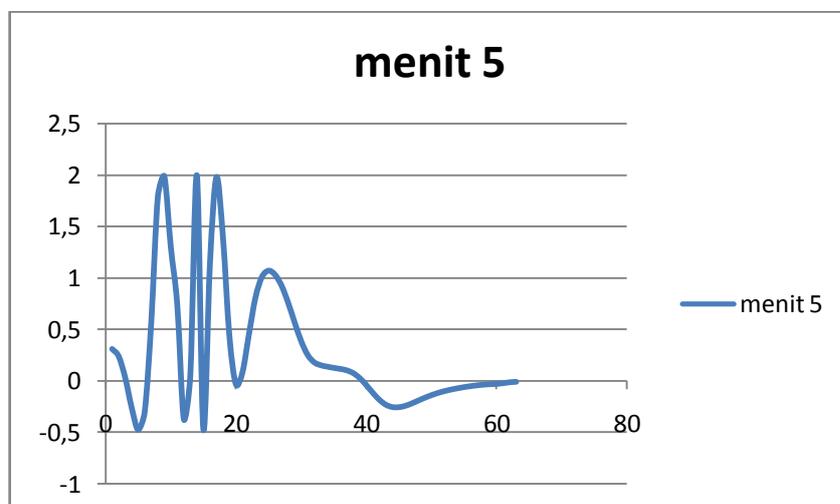
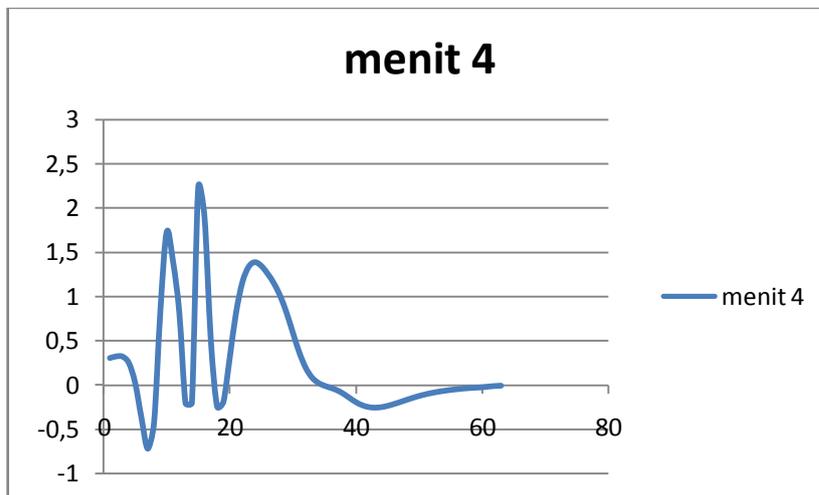
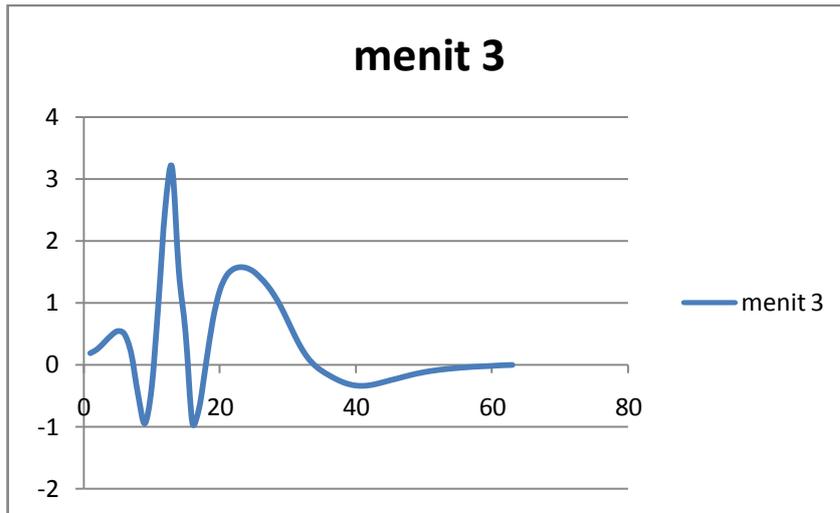
Visualisasi pada menit 00:34:00

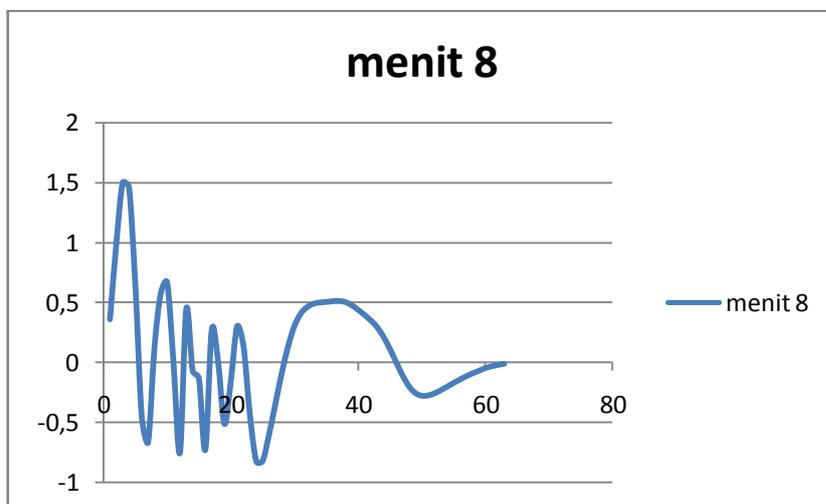
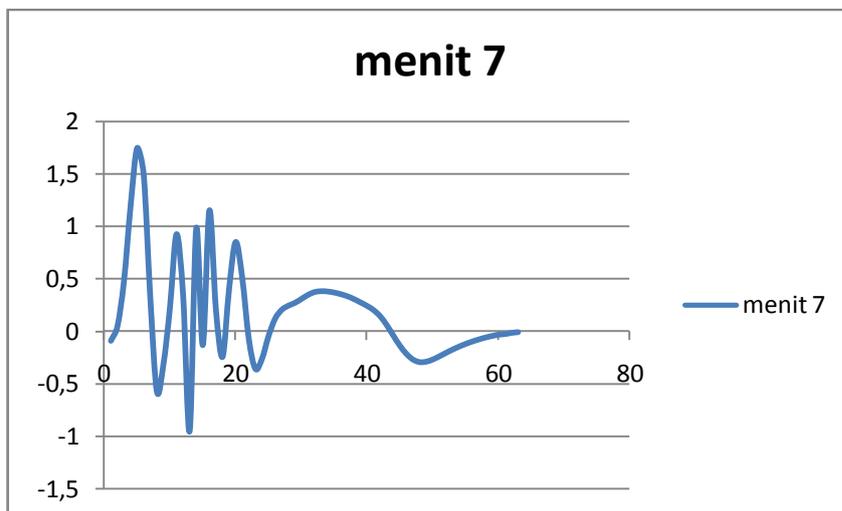
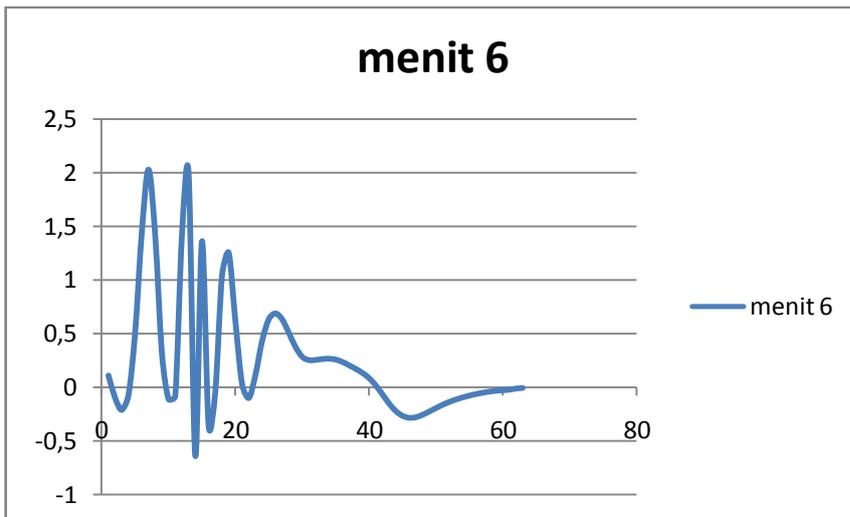
LAMPIRAN 4
GRAFIK HASIL PERMODELAN

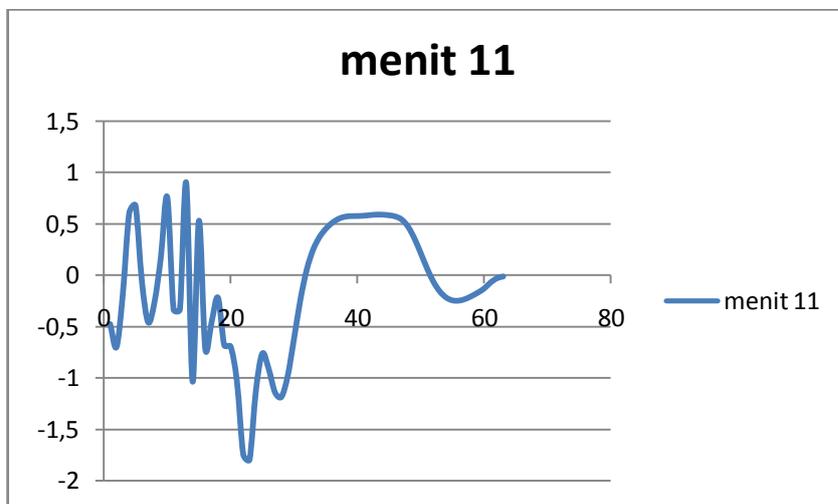
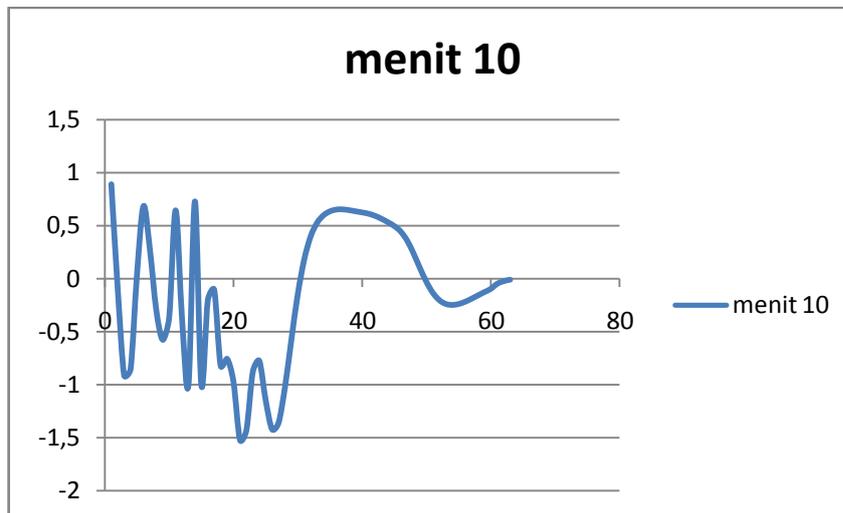
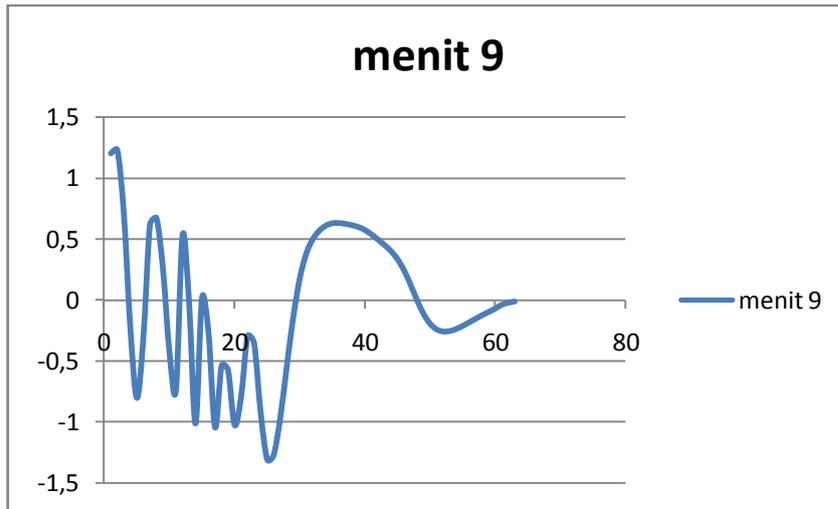
LAMPIRAN 5

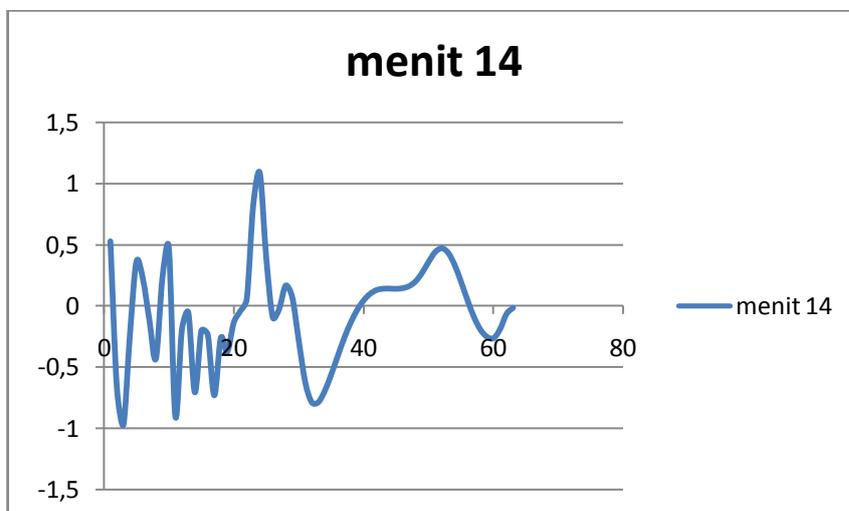
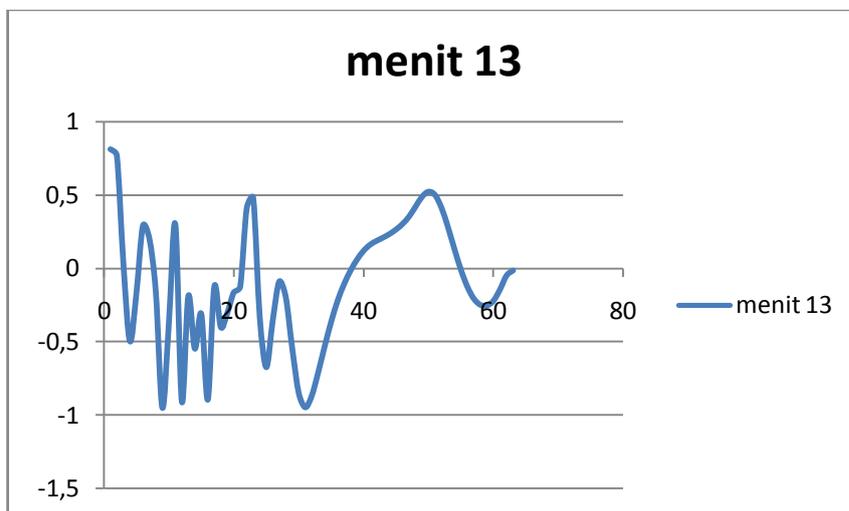
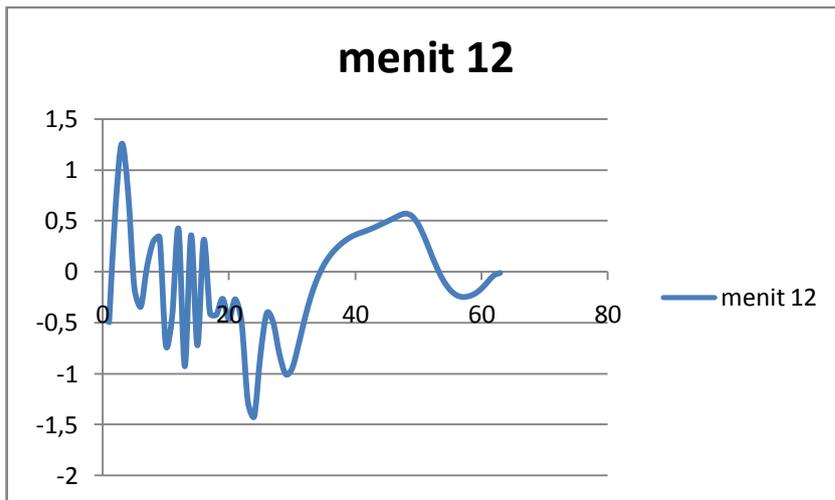
Grafik Hasil Permodelan

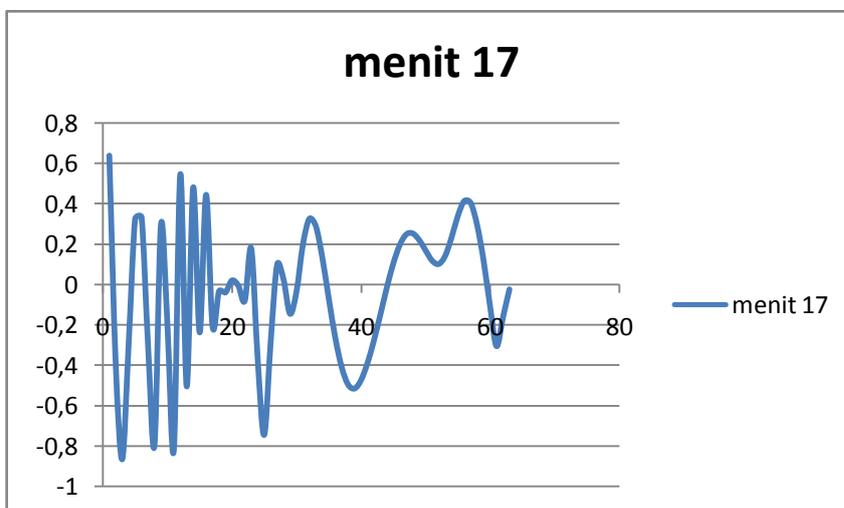
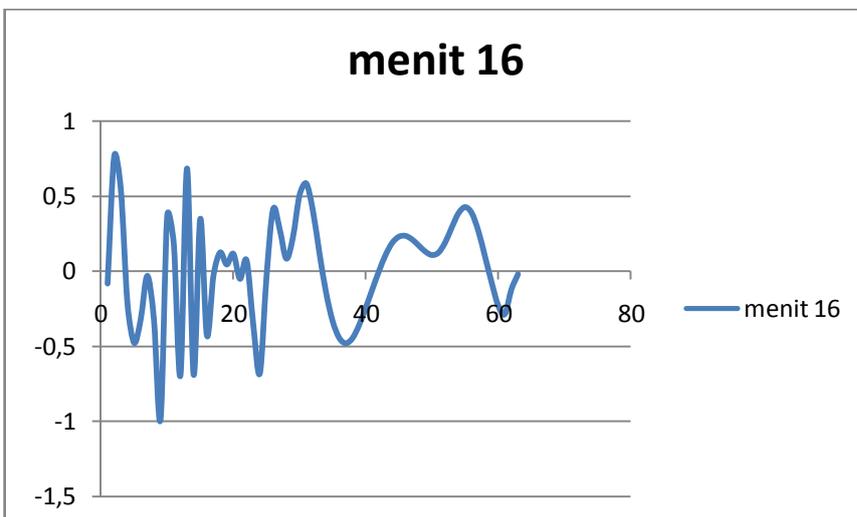
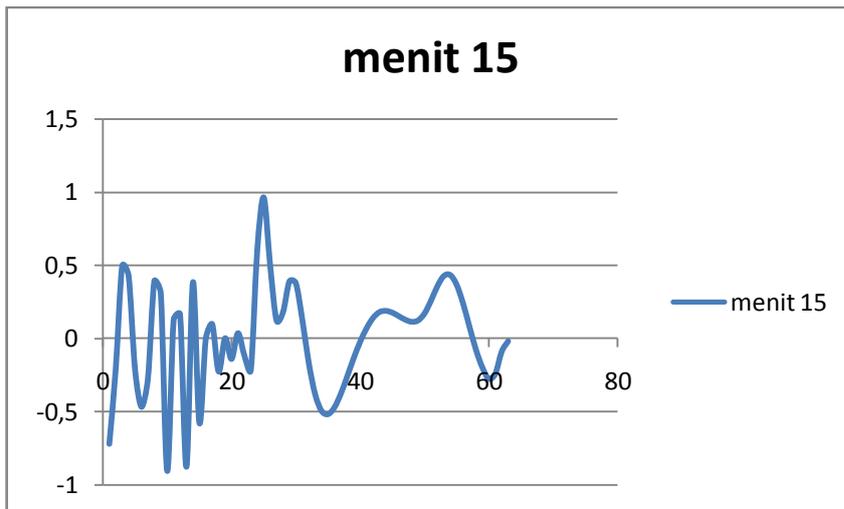


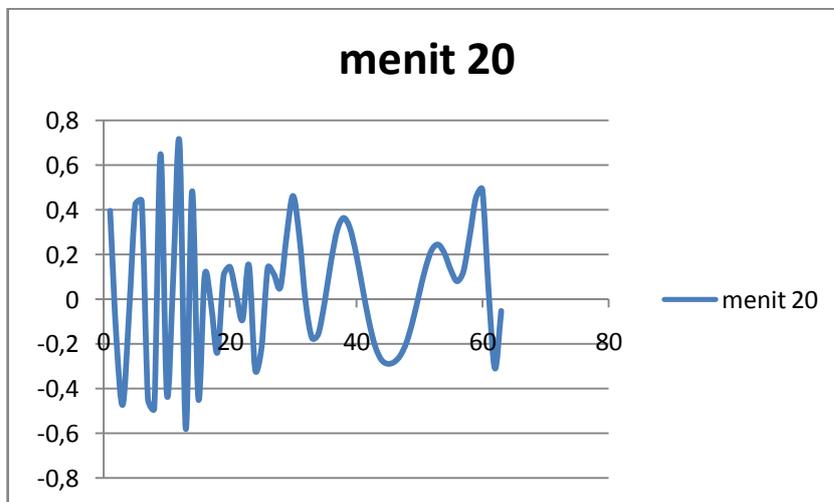
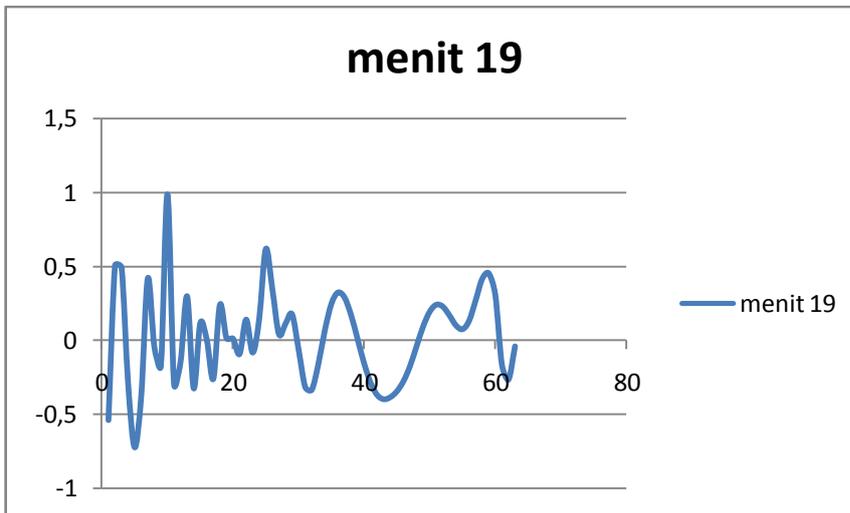
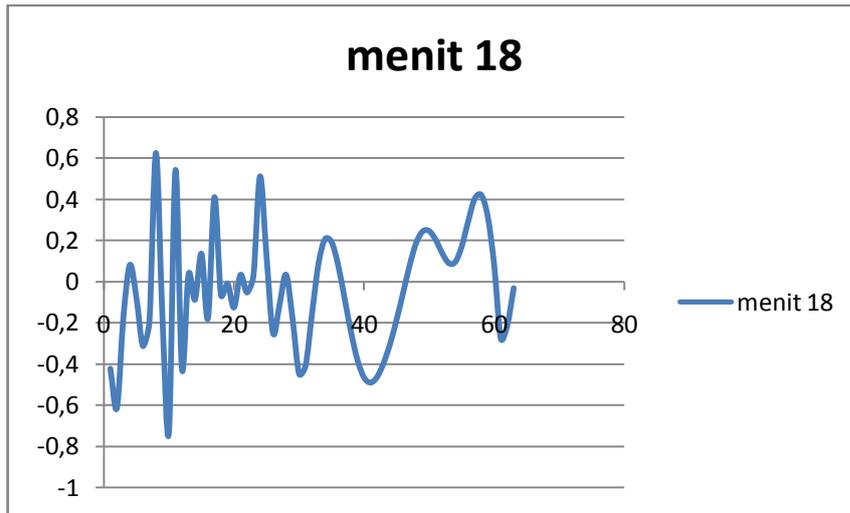




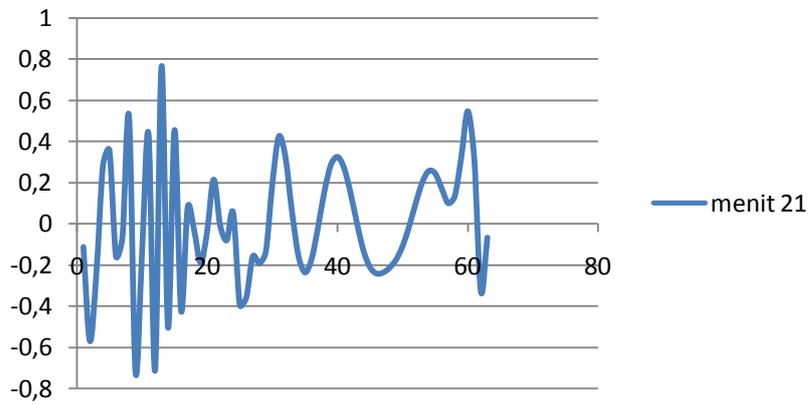




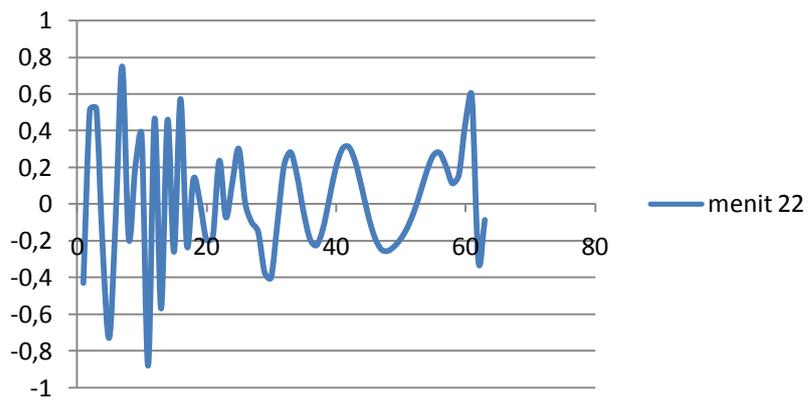




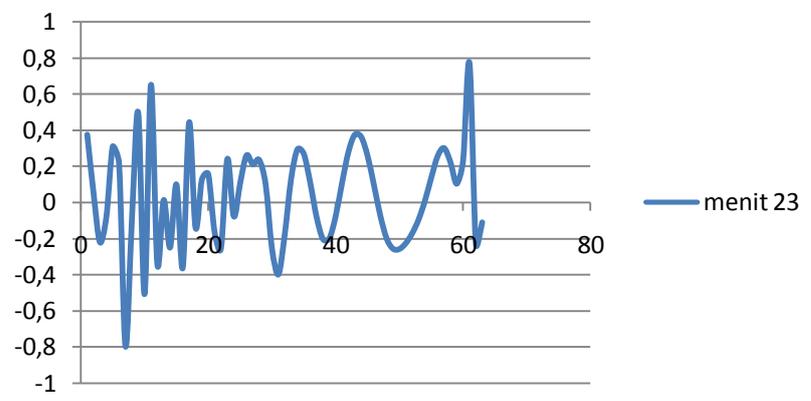
menit 21

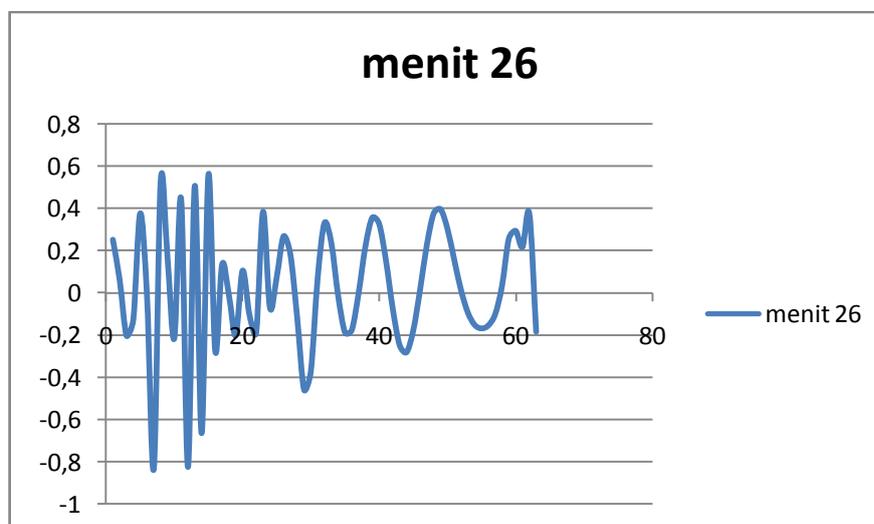
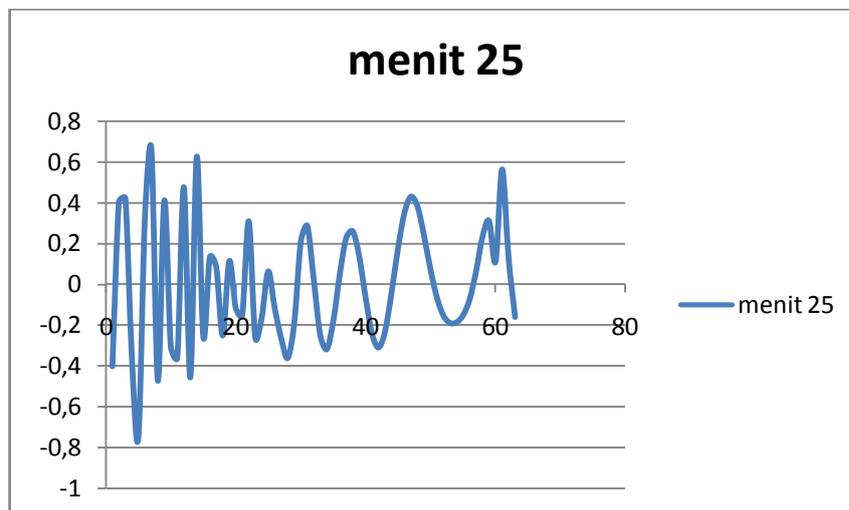
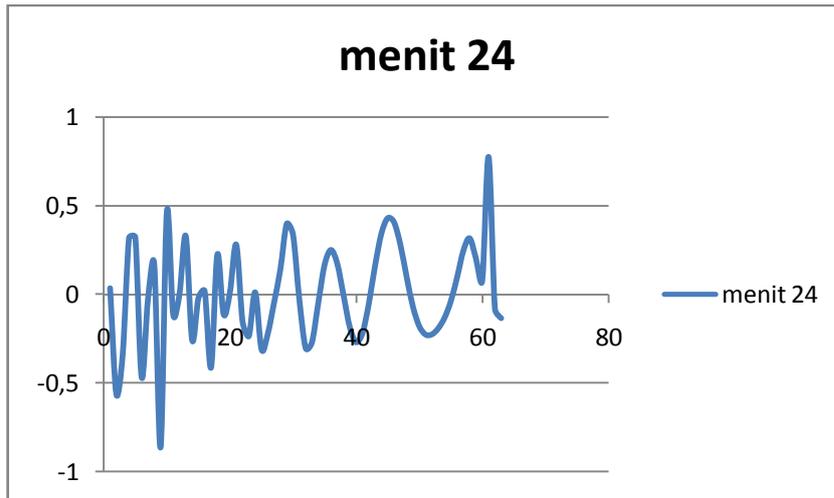


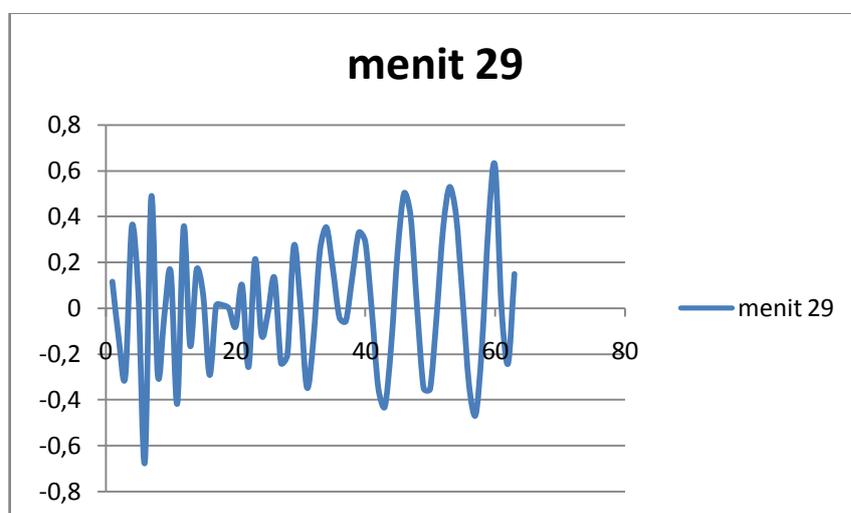
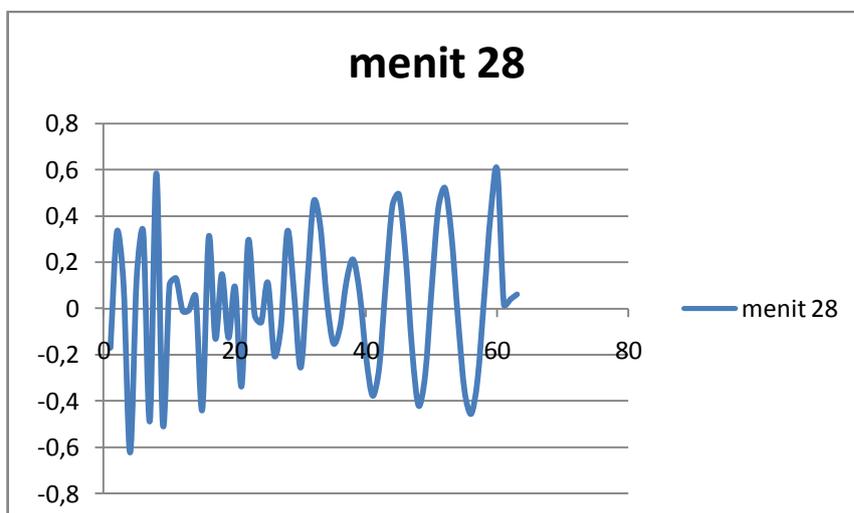
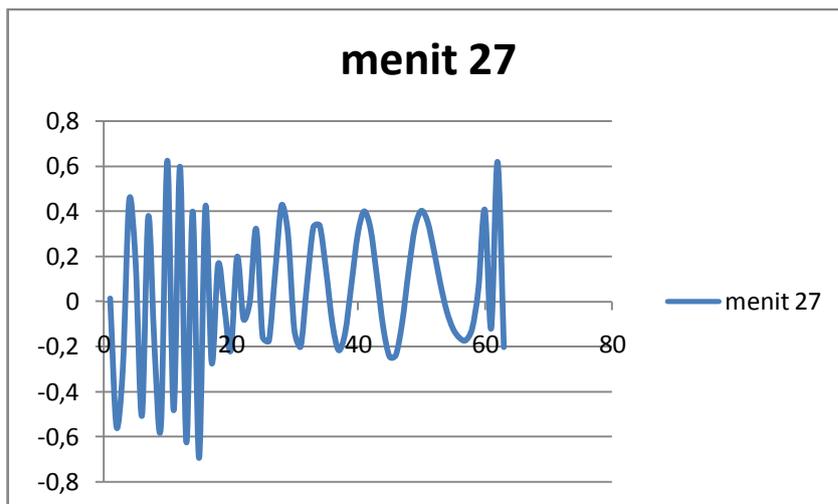
menit 22

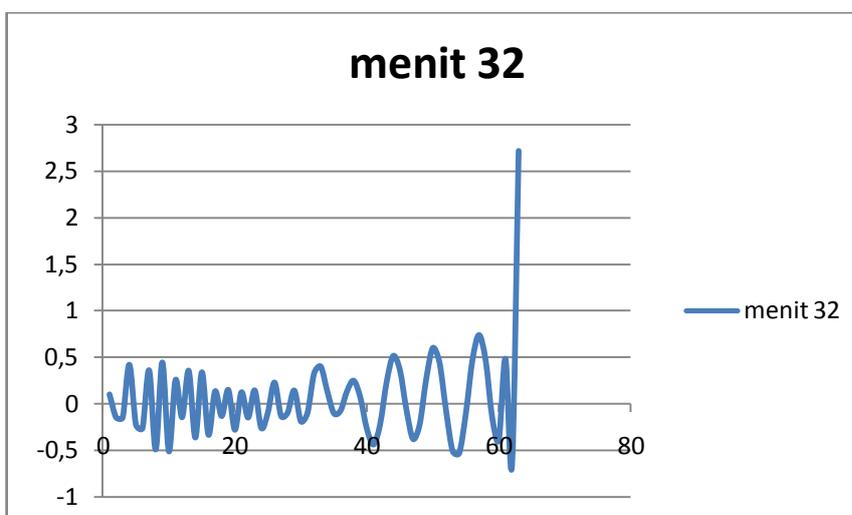
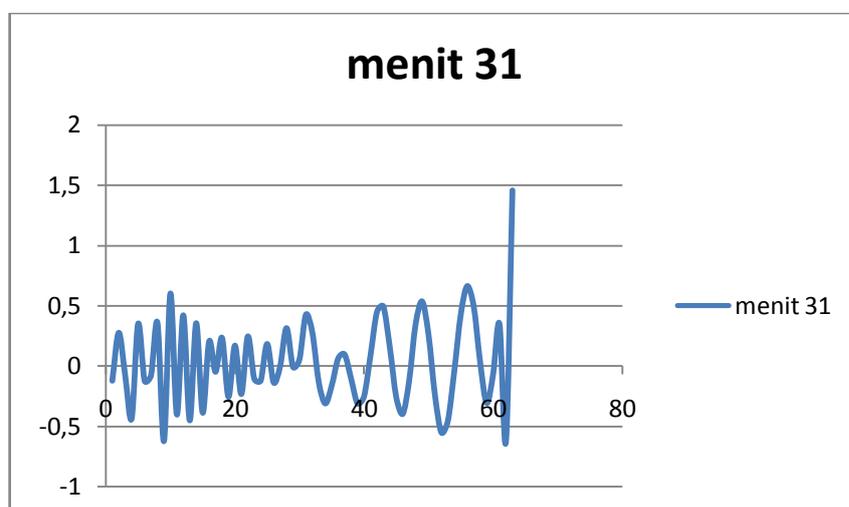
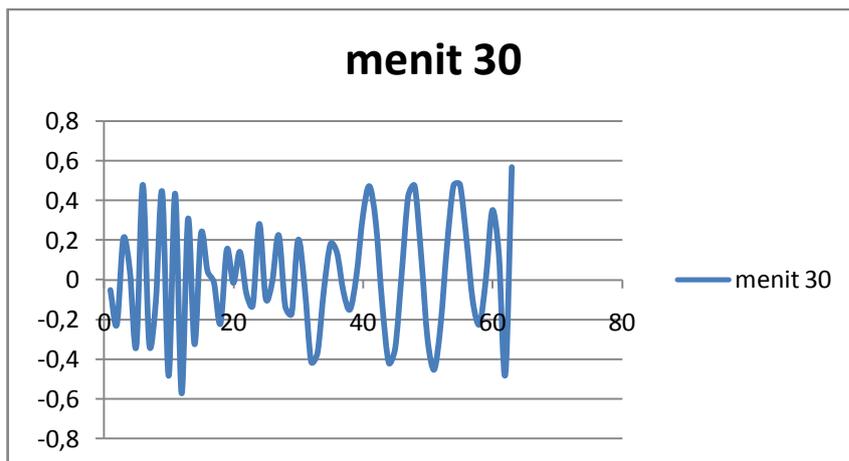




menit 23











BIODATA PENULIS



Wahyu Anggi Pratama, dilahirkan di Jember pada 28 Januari 1995. Anak pertama dari empat bersaudara dari pasangan Sugianto dan Murtiningsih. Pendidikan formal yang pernah ditempuh mulai dari TK Al Hidayah 83 Ambulu, SDN Tegalsari 1 Ambulu, SMP N 01 Ambulu, SMA N Ambulu. Pada tahun 2013, penulis diterima sebagai mahasiswa departemen Teknik

Kelautan, Fakultas Teknologi Kelautan, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Penulis terdaftar dengan NRP 4313100075.

Selama berkuliah di ITS penulis aktif di Himatekla, sebagai staff dari Departemen Sosial Masyarakat periode 2014/2015. Penulis juga aktif di Himpunan Mahasiswa Islam (HmI), tercatat sebagai Ketua Bidang Penelitian Pengembangan dan Pembinaan Anggota Komisariat Perkapalan periode 2015/2016, Ketua Bidang Penelitian, Pengembangan dan Pembinaan Anggota Koordinator Komisariat Sepuluh Nopember periode 2017/2018, Intstruktur HmI Cabang Surabaya periode 2017/2018. Penulis juga aktif di Dewan Perwakilan Mahasiswa Institut Teknologi Sepuluh Nopember, tercatat sebagai Ketua Komisi Kontrol periode 2015/2016. Di LDJ Bahrul Ilmi, penulis tercatat sebagai staff ahli dari Departemen Pendidikan periode 2015/2016. Hobi penulis adalah membaca dan berdiskusi. Untuk dapat berkorespondensi dengan penulis silahkan hubungi pratamaw46@gmail.com.