



LAPORAN PENELITIAN

PEMODELAN RUN-UP GELOMBANG TSUNAMI DI PANTAI PROFINSI LAMPUNG AKIBAT GEMPA VULKANIK (GUNUNG ANAK KRAKATAU)

Oleh

Dr. Ahmad Zakaria

**Dibiayai oleh DIPA Universitas Lampung dengan
Surat Perjanjian Kontrak Penelitian
No:315/H26/8/KU/2009, Tertanggal 6 Agustus 2009**

**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDARLAMPUNG**

2009

LEMBAR PENGESAHAN

Judul : **PEMODELAN RUN-UP GELOMBANG TSUNAMI DI PANTAI PROFINSI LAMPUNG AKIBAT GEMPA VULKANIK (GUNUNG ANAK KRAKATAU)**

Nama : Ahmad Zakaria

NIP : 19670514 199303 1002

Instansi : Jurusan Teknik Sipil Universitas Lampung

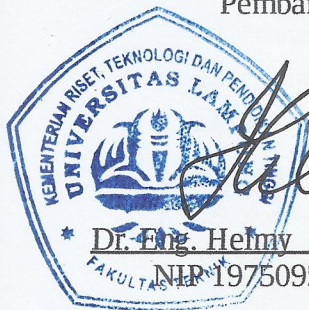
Pangkat/Golongan : Penata Tk. I / III d

Jabatan Fungsional : Lektor

Bandar Lampung, 8 Agustus 2016

Mengetahui,
a.n. Dekan Fakultas Teknik
Pembantu Dekan I

Penulis,



Dr. Eng. Helmy Etriawan, S.T., M.Sc.
NIP. 19750928 200112 1 002

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Ahmad Zakaria'.

Ir. Ahmad Zakaria, Ph.D.
NIP. 19670514 199303 1002

Menyetujui:

Ketua Lembaga Penelitian dan
Pengabdian Kepada Masyarakat (LPPM)



Warsono, Ph.D.
NIP. 196302161987031003

HALAMAN PENGESAHAN

1. Judul : PEMODELAN RUN-UP GELOMBANG TSUNAMI DI
: PANTAI PROFINSI LAMPUNG AKIBAT GEMPA
VULKANIK (GUNUNG ANAK KRAKATAU)
3. Ketua peneliti : Dr. Ahmad Zakaria
4. Jurusan : Teknik Sipil
5. Fakultas : Fakultas Teknik
6. Perguruan Tinggi : Universitas Lampung
7. Alamat : Jalan Sumantri Brojonegoro 1, Bandar Lampung
8. No Telp/fax : 721-788217
9. E-mail : ahmadzakaria@unila.ac.id
10. Lamanya Kegiatan : 10 bulan

Mengetahui
Dekan Fakultas Teknik

Bandar Lampung. 1 Desember 2008
Peneliti,

Dr. Ir. Lusmeilia Afriani, D.E.A.
NIP 196505101993032008

Dr. Ir. Ahmad Zakaria
NIP 196705141993031002

Mengetahui
Ketua Lembaga Penelitian

Prof. Dr. John Hendri, M.S.
NIP: 195810211987031001

DAFTAR ISI

	Halaman
DAFTAR TABEL	ii
DAFTAR GAMBAR	iii
BAB I. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar belakang	1
1.2. Tujuan khusus	2
1.3. Keutamaan penelitian	3
BAB II. STUDI PUSTAKA	7
2.1. Pendahuluan	7
2.2. Model hidrodinamik gelombang	7
2.3. Persamaan perambatan gelombang tsunami	9
2.4. Persamaan perambatan gelombang tsunami non linier (Goto dan Ogawa)	12
2.5. Persamaan perambatan gelombang tsunami non linier (Kowalik dan Murty)	13
2.6. Persamaan perambatan gelombang tsunami non linier (Shigihara, 1995)	14
2.7. Kondisi batas model	15
2.8. Kondisi awal model	17
2.9. Data bathymetri	17
BAB III. METODE PENELITIAN	
3.1. Bahan penelitian	19
3.2. Peralatan penelitian	19
3.3. Waktu dan tempat pelaksanaan penelitian	20
3.4. Metode pelaksanaan penelitian	20
3.5. Luaran penelitian	22
3.6. Indikator keberhasilan penelitian	22

BAB IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN	24
4.1. Hasil perambatan gelombang tsunami	24
4.2. Pembahasan perambatan gelombang tsunami	29
4.3. Hasil penelitian dengan topografi	30
4.4. Pembahasan penelitian dengan topografi	34
BAB V. KESIMPULAN DA SARAN	37
5.1. Kesimpulan	37
5.2. Saran	38
DAFTAR PUSTAKA	39

DAFTAR TABEL

	Halaman
Perbandingan waktu perambatan gelombang tsunami	35

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
1. Gambar 1. Bathimetri dan topografi untuk grid space 1 menit dari GEODAS.	18
2. Gambar 2. Bathimetri dan topografi untuk grid space 1 menit dari GEBCO.	18
3. Gambar 3. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 50$ detik	26
4. Gambar 4. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 100$ detik	26
5. Gambar 5. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 150$ detik	26
6. Gambar 6. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 200$ detik	26
7. Gambar 7. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 250$ detik	26
8. Gambar 8. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 300$ detik	26
9. Gambar 9. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 350$ detik	27
10. Gambar 10. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 400$ detik	27
11. Gambar 11. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 450$ detik	27
12. Gambar 12. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 500$ detik	27
13. Gambar 13. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 1000$ detik	27
14. Gambar 14. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 1500$ detik	27
15. Gambar 15. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 2000$ detik	28
16. Gambar 16. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 2500$ detik	28
17. Gambar 17. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 3000$ detik	28
18. Gambar 18. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 3500$ detik	28
19. Gambar 19. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 4000$ detik	28
20. Gambar 20. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 4500$ detik	28
21. Gambar 21. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 4750$ detik	29
22. Gambar 22. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 5000$ detik	29

23. Gambar 23. Peta topografi daerah perambatan gelombang tsunami	31
24. Gambar 24. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, t = 50 detik	31
25. Gambar 25. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, t = 100 detik	31
26. Gambar 26. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, t = 150 detik	31
27. Gambar 27. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, t = 200 detik	31
28. Gambar 28. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, t = 250 detik	31
29. Gambar 28. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, t = 300 detik	32
30. Gambar 30. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, t = 350 detik	32
31. Gambar 31. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, t = 400 detik	32
32. Gambar 32. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, t = 450 detik	32
33. Gambar 33. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, t = 500 detik	32
34. Gambar 34. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, t = 1000 detik	32
35. Gambar 35. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, t = 1500 detik	33
36. Gambar 36. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, t = 2000 detik	33
37. Gambar 37. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, t = 2500 detik	33
38. Gambar 38. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, t = 3000 detik	33
39. Gambar 39. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, t = 3500 detik	33
40. Gambar 40. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, t = 4000 detik	33
41. Gambar 41. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, t = 4500 detik	35
42. Gambar 42. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, t = 5000 detik	35

BAB I. PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Profinsi Lampung termasuk profinsi yang wilayah sangat dekat dengan Gunung Anak Krakatau. Sehingga wilayah pesisir pantai Profinsi Lampung rawan akan mengalami bencana tsunami, bila meletusnya Gunung Anak Krakatau. 125 tahun yang lalu, bencana tsunami juga pernah dialami masyarakat yang tinggal di wilayah pesisir pantai profinsi Lampung, akibat meletusnya Gunung Krakatau pada tanggal 26-27 Agustus 1883, yang menelan korban jiwa lebih kurang 36.417 orang. Saat kejadian itu tinggi muka air laut di wilayah pantai kota Bandar Lampung diperkirakan mencapai 22 meter (Mahi dan Zakaria, 2008).

Resiko terulangnya kejadian tsunami tahun 1883 sangat besar. Hal ini karena: pertama, sejak tahun 1927 sampai tahun 2005, yaitu selama 75 tahun ketinggian Gunung Anak Krakatau ini sudah mencapai 315 meter. Kedua, tanggal 26 Oktober 2007, badan PVBMG pernah menetapkan kondisi gunung ini dalam status Siaga/level III, karena saat itu kondisi aktivitas vulkaniknya cukup tinggi, bahkan nelayan dan wisatawan tidak diperkenankan untuk mendekati gunung ini dalam radius 3 kilometer. Ini menunjukkan bahwa resiko akan meletusnya gunung ini dalam waktu dekat adalah besar sekali (Mahi dan Zakaria, 2008).

Untuk memperkirakan resiko terjadinya tsunami apabila meletusnya Gunung Anak Krakatau adalah dapat dilakukan, salah satunya adalah dengan memodelkan atau mensimulasikan run-up gelombang tsunami secara numerik. Pemodelan simulasi run-up gelombang tsunami sudah banyak dilakukan oleh peneliti, baik akibat gempa vulkanik maupun akibat gempa tektonik. Untuk pemodelan tsunami akibat gempa tektonik sudah dilakukan oleh Marchuk dkk

(2001), Horrillo dkk (2004), Watts dkk (2003, 2005), Kowalik dan Proshutinsky (2006). Untuk pemodelan tsunami akibat gempa vulkanik dilakukan oleh antara lain oleh Kawamata dkk (1993) Hantoro dkk (2007). Disini pengkajian ulang peristiwa tsunami yang ditimbulkan akibat Krakatau tahun 1883. Dalam pemodelan simulasi tsunami, Hantoro dkk (2007) hanya menggunakan satu type persamaan hidrodinamik dengan pendekatan eksplisit beda hingga untuk akurasi order 2.

1.2. Tujuan Khusus

Tujuan khusus dari penelitian ini adalah untuk memberikan perhitungan yang akurat mengenai resiko bencana yang akan terjadi bila Gunung Anak Krakatau meletus seperti kejadian meletusnya Gunung Anak Krakatau di tahun 1883 atau 125 tahun yang lampau. Dengan melakukan pengkajian ulang pemodelan simulasi perambatan gelombang akibat meletusnya Gunung Krakatau, dimana dengan menggunakan kekuatan letusan yang sama dengan letusan yang terjadi saat itu, dan dengan menggunakan bathymetri untuk kondisi sekarang ini, maka akan didapat prediksi atau perkiraan tinggi gelombang tsunami dan waktu gelombang tsunami saat mencapai pantai di wilayah pesisir Profinsi Lampung. Dengan mengetahui kemungkinan tinggi tsunami dan waktu tsunami mencapai pantai Lampung maka akan dapat dihitung berapa besar resiko bencana yang akan terjadi.

Selama ini pemodelan numerik atau simulasi numerik yang sudah dilakukan untuk memodelkan perambatan gelombang tsunami baik akibat gempa tektonik maupun akibat gempa vulkanik belum pernah melakukan pengujian akurasi model, baik dengan cara membandingkan hasil simulasi antara satu type model persamaan hidrodinamiknya dengan type model persamaan lainnya, maupun dengan cara membandingkan hasil simulasi antara satu model persamaan hidrodinamik gelombang panjang yang menggunakan pendekatan beda hingga akurasi orde 2(dua) dengan pendekatan beda hingga yang menggunakan akurasi yang lebih tinggi, yaitu akurasi orde ke 4 (empat) sampai dengan akurasi orde 20

(duapuluh). Hasil simulasi perambatan gelombang tsunami yang umumnya dipresentasikan di dalam penelitian biasanya adalah hanya untuk satu type model persamaan hidrodinamika dengan akurasi orde rendah atau order ke 2 (dua). Akan tetapi apabila dalam pemodelan dilakukan pengujian dan pengkajian akurasi ini, maka hasil penelitian yang berupa tinggi gelombang dan waktu sampainya gelombang ke pantai akan didapat dengan lebih akurat. Hasil simulasi perambatan gelombang tsunami yang akurat ini akan dapat memberikan masukan bagi pemerintah Profinsi Lampung dalam melaksanakan program Mitigasi bencana.

1.3. Keutamaan Penelitian

Menurut undang-undang no 24 tahun 2007, penanggulangan bencana di Indonesia adalah menjadi tanggung jawab pemerintah. Dinas Perikanan Profinsi Lampung dan Pemerintah Profinsi Lampung merasa berkewajiban untuk memenuhi undang-undang tersebut di atas sehingga dilakukanlah penyusunan rencana strategis dan rencana aksi mitigasi bencana Kota Bandar Lampung (Mahi dan Zakaria, 2008).

Keutamaan dari penelitian ini adalah karena penelitian ini merupakan suatu penelitian yang hasilnya akan dapat memberikan masukan pemerintah profinsi Lampung dalam menguatkan kebijakan dalam renstra mitigasi bencana. Renstra dengan kebijakannya akan baik apabila data hasil perhitungan yang dipergunakan untuk menentukan kebijakan tersebut adalah sudah benar, atau data yang dipergunakan adalah benar-benar baik. Untuk mendapatkan hasil yang benar, tentu penelitian yang dilakukan juga sudah benar-benar akurat dan dapat dipertanggung jawabkan.

Dilihat dari jenis bencana yang terjadi di Indonesia pada umumnya dan di Profinsi Lampung pada khususnya, bencana akibat tsunami adalah yang paling banyak menelan korban jiwa. Berdasarkan sejarah, Profinsi Lampung pernah mengalami bencana tsunami akibat meletusnya gunung Krakatau pada tanggal 26-27 Agustus 1883 yang menelan korban jiwa kurang lebih 36.417. Bencana tsunami ini akan terulang lagi dengan kondisi dimana kehidupan di pesisir pantai

Profinsi Lampung yang juga termasuk profinsi Banten, penduduknya sangat padat bila dibandingkan dengan jumlah penduduk pada saat terjadi bencana tsunami akibat meletusnya gunung Krakatau tahun 1883, ditambah lagi frekuensi lalulintas penyebrangan laut dari pelabuhan Bakauhuni ke Profinsi Banten adalah sangat tinggi, baik barang maupun penumpang. Maka apabila bencana tsunami terulang kembali seperti tahun 1883, maka bencana yang ditimbulkan diperkirakan akan jauh lebih besar dari pada yang terjadi di tahun 1883. Oleh karena itu sangat perlu bagi Profinsi Lampung khususnya dan Indonesia pada umumnya untuk dapat mengetahui secara akurat run-up gelombang tsunami yang akan terjadi apabila Gunung Anak Krakatau meletus. Dengan kondisi sekarang, berapa perkiraan ketinggian gelombang tsunami dan waktu gelombang sampai di pantai pesisir profinsi lampung khususnya dan di pantai lainnya di Indonesia pada umumnya.

Selama ini, penelitian yang melakukan kajian mengenai perambatan gelombang tsunami akibat gempa vulkanik sangat sedikit sekali, bahkan hampir tidak ada. Penelitian perambatan gelombang tsunami sepanjang pengetahuan penulis hanya dilakukan oleh Kawamata dkk (1993) dan Hantoro dkk (2007). Karena penelitian yang melakukan kajian perambatan gelombang tsunami akibat gempa vulkanik sangat sedikit maka sangatlah mungkin kalau kajian akurasi perambatan gelombang tsunami belum ada. Kajian yang banyak dilakukan biasanya perambatan gelombang tsunami akibat gempa tektonik, karena kejadian tsunami akibat gempa tektonik lebih sering dibandingkan dengan kejadian tsunami akibat gempa vulkanik. Sedangkan persamaan pengatur hidrodinamik yang dikembangkan baik untuk kajian simulasi perambatan gelombang tsunami akibat gempa vulkanik dan tektonik adalah sama.

Dalam penelitian ini, akan dilakukan kajian tingkat akurasi atau ketelitian dalam mensimulasikan perambatan gelombang, juga dengan menggunakan berbagai type persamaan seperti persamaan hidrodinamik perambatan gelombang tsunami yang dipergunakan Kawamata dkk (1993) dan Hantoro dkk (2007) serta Goto dan Ogawa (1992), persamaan momentum dan kontinuitas perambatan gelombang perairan dangkal non linier yang dipergunakan oleh Kowalik dan Murty (1993), persamaan hidrodinamik untuk persamaan gelombang model

Boussinesq non linier seperti yang dipergunakan oleh Shigihara dkk (2005) dan Horrillo dkk (2006). Ketiga model persamaan pengatur perambatan gelombang tsunami seperti tersebut di atas didekati menggunakan metode beda hingga (finite-difference) dengan akurasi atau tingkat ketelitian order 2(dua) untuk turunan ruangnya (x,y). Untuk meningkatkan ketelitian dalam perhitungan numerik mereka biasanya hanya menggunakan metode lompat katak (leap-frog) atau sering juga disebut dengan metode stagger grid untuk skema grid numeriknya. Untuk kondisi batas, metode free boundary biasanya dipergunakan, juga dengan menggunakan akurasi orde 2(dua).

Dalam penelitian ini, simulasi perambatan gelombang tsunami, akan menggunakan ketiga tipe persamaan hidrodinamik perambatan gelombang tsunami seperti yang telah dijelaskan di atas. Untuk meningkatkan akurasi perhitungan numerik perambatan gelombang agar perhitungan menjadi lebih akurat dan dispersi grid menjadi jauh lebih kecil, maka persamaan hidrodinamik perambatan gelombangnya turunan ruangnya (x,y) akan didekati dengan menggunakan pendekatan metode beda hingga dengan akurasi yang lebih tinggi dari orde ke 2(dua), yaitu akurasi orde ke 4 sampai dengan akurasi orde ke 20, seperti yang dipergunakan oleh Zakaria (2003) juga akan dilakukan pendekatan dengan menggunakan metode pseudo spectral (Zakaria, 2003).

Untuk mengurangi *non physical reflection* atau refleksi dari boundary, maka untuk boundary nya akan dipergunakan metode free boundary yang pertamakali dipresentasikan oleh Reynolds (1978) dengan tingkat akurasi orde ke 2 (dua) dan metode Reynolds yang sudah dimodifikasi oleh Zakaria (2003). Dengan menggunakan metode untuk kondisi batas yang terbaik, maka hasil simulasi yang didapat juga akan menjadi akurat.

Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa untuk mendapatkan kepastian dan keakuratan perhitungan simulasi perambatan gelombang tsunami maka perlu dilakukannya kajian type persamaan yang dipergunakan dan kajian akurasi, baik untuk perhitungan persamaan hidrodinamiknya maupun akurasi untuk persamaan kondisi batasnya. Dengan melakukan perhitungan yang lebih akurat maka, kepastian tinggi gelombang dan waktu perambatan gelombang tsunami sampai ke

pantai akan menjadi lebih akurat.

Perhitungan tinggi gelombang dan waktu gelombang tsunami sampai ke pantai akurat akan dapat memberikan gambaran resiko dampak gelombang tsunami apabila gunung Anak Krakatau meletus seperti kejadian meletusnya Krakatau di tahun 1883. Kajian ini sangat diperlukan sekali karena dampak dari bencana tsunami Anak Krakatau tidak hanya akan membawa korban jiwa dan harta yang terbesar di Indonesia, akan tetapi juga dapat menjadi bencana terbesar dunia.

BAB II. STUDI PUSTAKA

2.1. Pendahuluan

Model matematik yang dipergunakan untuk mensimulasikan perambatan gelombang tsunami dalam penelitian ini mempergunakan model hidrodinamik persamaan gelombang panjang yang diturunkan dari persamaan Navier-Stokes.

2.2. Model hidrodinamik gelombang

Model Hidrodinamika yang sering dipergunakan dalam model perambatan gelombang biasanya diturunkan dari persamaan Navier-Stokes. Dalam teori gelombang, dianggap bahwa komponen vertikal dan kecepatan tidak mempengaruhi distribusi tekanan yang dianggap hidrostatis. Sehingga persamaan gelombang tersebut adalah dapat dipresentasikan sebagai berikut,

Persamaan kontinuitas.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial [(d+h).u]}{\partial x} + \frac{\partial [(d+h).v]}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Persamaan momentum,

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = f.v + F^{(x)} - g \frac{u \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2.(d+h)} \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -f \cdot u + F^{(y)} - g \frac{v \sqrt{u^2 + v^2}}{C^2 \cdot (d+h)} \quad (3)$$

Dimana:

u =komponen kecepatan dalam arah x

v =komponen kecepatan dalam arah y

g =percepatan gravitasi

t =waktu

x =posisi

h =tinggi gelombang di atas permukaan air rerata

f =parameter coriolis

C =koefisien De Chezy

d =kedalaman

$F^{(x)}$ $F^{(y)}$ =komponen gaya-gaya luar dalam arah x dan

y seperti stress angin dan tekanan barometrik.

Dalam Studi sering faktor ini tidak diperhitungkan, dan f diabaikan karena pengaruh gaya Coriolis pada aliran sungai yang mempunyai dimensi lateral yang kecil dan tidak berarti. Stabilitas dari solusi numerik ini ditentukan oleh kriteria stabilitas Friedrich-Courant-Lewy sebagai berikut:

$$\Delta t < \frac{\Delta x}{\sqrt{2 \cdot g \cdot h_{max}}} \quad (4)$$

Dimana:

Δt = langkah waktu

Δx = lebar sel

h_{max} = kedalaman maksimum sel di dalam domain

2.3. Persamaan perambatan gelombang tsunami

Berdasarkan persamaan Navier Stokes di atas dapat diturunkan persamaan hidrodinamika yang dapat dipergunakan untuk memodelkan perambatan gelombang tsunami secara 2 dimensi (2-D), salah satunya adalah persamaan gelombang panjang sederhana, seperti yang dipergunakan oleh Kawamata dkk (1993) dan Hantoro dkk (2007) sebagai berikut,

- persamaan kontinuitas,

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

- persamaan momentum,

arah - x

$$\frac{\partial M}{\partial t} + g \cdot D \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{r}{D^2} \cdot M \cdot \sqrt{(M^2 + N^2)} = 0 \quad (6)$$

arah- y

$$\frac{\partial N}{\partial t} + g \cdot D \cdot \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{r}{D^2} \cdot N \cdot \sqrt{(M^2 + N^2)} = 0 \quad (7)$$

dimana:

$M = \int_{-h}^{\eta} u \cdot dt$	= transport in x – direction = discharge fluxes in x - direction
$N = \int_{-h}^{\eta} v \cdot dt$	= transport in y – direction = discharge fluxes in y - direction
$M = u \cdot D$	= $u \cdot (h + \eta)$
$N = v \cdot D$	= $v \cdot (h + \eta)$
$D = (h + \eta)$	= total water depth
u	= vertical averaged horizontal particle velocities in x - direction

- v = vertical averaged horizontal particle velocities in y - direction
 g = gravitational acceleration
 h = still water depth
 η = vertical displacement of the water surface above the still water level ($z = 0$)
 r = friction coefficient (0.47)
 n = manning's roughness coefficient

Persamaan di atas merupakan teori perambatan gelombang yang dikembangkan oleh kawamata (1993).

Teori persamaan gelombang ini masih menghasilkan osilasi yang merupakan dispersi program. Untuk mengurangi osilasi, Goto dan Shuto (1983) mengusulkan adanya faktor reduksi sebagai berikut,

$$\text{faktor reduksi dalam arah x } R_x = \beta \cdot (\Delta x)^3 \sqrt{\frac{g}{D}} \left| \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \right| \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \quad (8)$$

$$\text{faktor reduksi dalam arah y } R_y = \beta \cdot (\Delta y)^3 \sqrt{\frac{g}{D}} \left| \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right| \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \quad (9)$$

dimana:

β = konstanta yang menentukan derajat dispersi program

Persamaan (11) dan persamaan (12) dapat ditulis menjadi persamaan sebagai berikut,

$$\frac{\partial M}{\partial t} + g \cdot D \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{r}{D^2} \cdot M \cdot \sqrt{(M^2 + N^2)} = \beta \cdot (\Delta x)^3 \sqrt{\frac{g}{D}} \left| \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \right| \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \quad (10)$$

$$\frac{\partial N}{\partial t} + g \cdot D \cdot \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{r}{D^2} \cdot N \cdot \sqrt{(M^2 + N^2)} = \beta \cdot (\Delta y)^3 \sqrt{\frac{g}{D}} \left| \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right| \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \quad (11)$$

Diskretisasi persamaan kontinuitas dapat ditulis sebagai berikut,

$$\eta_{ij}^{k+1} = \eta_{ij}^k - \Delta t \left[\frac{M_{ij}^{k+\frac{1}{2}} - M_{i-1,j}^{k+\frac{1}{2}}}{\Delta x} - \frac{N_{ij}^{k+\frac{1}{2}} - N_{ij-1}^{k+\frac{1}{2}}}{\Delta y} \right] \quad (12)$$

Sedangkan untuk persamaan momentum, diskretisasi persamaannya dapat ditulis sebagai berikut,

$$M_{ij}^{k+\frac{1}{2}} = \left[M_{ij}^{k-\frac{1}{2}} - g \cdot D \cdot \frac{\Delta t}{\Delta x} \cdot [\eta_{i+1,j}^k - \eta_{ij}^k] \right] \cdot R_x \quad (13)$$

$$N_{ij}^{k+\frac{1}{2}} = \left[N_{ij}^{k-\frac{1}{2}} - g \cdot D \cdot \frac{\Delta t}{\Delta y} \cdot [\eta_{ij+1}^k - \eta_{ij}^k] \right] \cdot R_y \quad (14)$$

Agar program dapat berjalan dengan stabil maka kondisi stabilitas program dapat dihitung dengan menggunakan kriteria stabilitas program sebagai berikut,

$$\frac{c^2 (\Delta t)^2}{(\Delta x)^2} + \frac{\beta' \Delta t}{(\Delta x)^2} + \frac{(\beta')^2}{(\Delta x)^2 c^2} < 1 \quad (15)$$

dimana:

c = velocity of long wave linier propagation

$$\beta' = \beta (\Delta x)^3 \sqrt{\frac{g}{D}} \left| \frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} \right|$$

Untuk perambatan gelombang tsunami yang diakibatkan krakatau diusulkan $\beta' = 1,2$ (Kawamata, dkk, 1993)

2.4. Persamaan perambatan gelombang tsunami non linier (Goto dan Ogawa (1992))

Selain dari persamaan di atas, Goto dan Ogawa (1992) juga mengusulkan persamaan hidrodinamik gelombang panjang non linier untuk perambatan gelombang tsunami di perairan dangkal yang juga dipergunakan oleh Hantoro dkk (2007) sebagai berikut,

- Persamaan kontinuitas,

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial N}{\partial y} = 0 \quad (16)$$

- Persamaan momentum,

Arah - x

$$\frac{\partial M}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{M^2}{D} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{M \cdot N}{D} \right] + g \cdot D \cdot \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{g \cdot n^2}{D^{7/3}} \cdot M \cdot \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (17)$$

Arah - y

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{M \cdot N}{D} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{N^2}{D} \right] + g \cdot D \cdot \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{g \cdot n^2}{D^{7/3}} \cdot N \cdot \sqrt{M^2 + N^2} = 0 \quad (18)$$

Untuk memodelkan perambatan gelombang tsunami, maka turunan dari persamaan di atas didekati dengan menggunakan pendekatan beda hingga (*finite-difference*) seperti pendekatan sudah dijelaskan sebelumnya. Hantoro dkk (2007) serta Goto dan Ogawa (1992) menggunakan pendekatan akurasi orde 2 dan menggunakan skema leap-frog untuk perhitungan numeriknya.

2.5. Persamaan perambatan gelombang tsunami non linier (oleh Kowalik dan Murty (1993))

Kowalik dan Murty (1993) mengusulkan untuk persamaan non linier gerak gelombang di laut dangkal, persamaan kontinuitas dan momentum adalah sebagai berikut,

Persamaan kontinuitas,

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial (u \cdot D)}{\partial x} + \frac{\partial (v \cdot D)}{\partial y} = 0 \quad (19)$$

Persamaan momentum,

arah x

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\partial \eta}{\partial x} - \frac{r \cdot u \sqrt{u^2 + v^2}}{D} \quad (20)$$

arah y

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial y} + u \frac{\partial v}{\partial x} = -g \frac{\partial \eta}{\partial y} - \frac{r \cdot v \sqrt{u^2 + v^2}}{D} \quad (21)$$

dimana:

D = $h + \eta$ = total kedalaman (m)

h = kedalaman air

η = variasi elevasi permukaan air (m)

Dengan menggunakan persamaan ini, juga dimodelkan perambatan gelombang tsunami aceh tahun 2004 (Horrillo, 2006). Disini Horrillo dkk (2006) serta Kowalik dan Murty (1993), untuk mendekati turunan persamaan, mereka menggunakan pendekatan beda hingga akurasi orde 2(dua) dan untuk perhitungan numerik turunan persamaan terhadap ruang (x dan y) mereka menggunakan skema *staggered grid*. Bila dilihat dari prosedur perhitungannya, skema *staggered grid* ini juga sebenarnya merupakan skema *leap-frog*.

2.6. Persamaan perambatan gelombang Boussinesq non linier (Shigihara dkk, 2005)

Persamaan gerak perambatan gelombang tsunami untuk model Boussinesq non linier dipresentasikan dalam Horrillo dkk (2006) dan Shigihara dkk (2005) adalah sebagai berikut,

Persamaan kontinuitas,

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{\partial(u \cdot D)}{\partial x} + \frac{\partial(v \cdot D)}{\partial y} = 0 \quad (22)$$

Persamaan momentum,

arah x

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{1}{\rho D} r \cdot u \sqrt{u^2 + v^2} = \frac{\partial \psi}{\partial x} \quad (23)$$

arah y

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \frac{\partial v}{\partial y} + u \frac{\partial v}{\partial x} + g \frac{\partial \eta}{\partial y} + \frac{1}{\rho D} r \cdot v \sqrt{u^2 + v^2} = \frac{\partial \psi}{\partial y} \quad (24)$$

dimana fungsi potensial ψ didefenisikan sebagai berikut,

$$\psi = \frac{H^2}{3} \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} + \frac{\partial^2 v}{\partial y \partial t} \right) \quad (25)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan (23) dan persamaan (24) ke dalam persamaan (25) dan dengan mengabaikan nonlinier dan gesekan dari dasar perairan menghasilkan persamaan Poisson, untuk solusi dari fungsi ψ sebagai berikut,

$$\frac{H^2}{3} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} \right) - \psi = \frac{gH^2}{3} \left(\frac{\partial^2 \eta}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \eta}{\partial y^2} \right) \quad (26)$$

Fungsi potensial ψ merupakan faktor koreksi untuk tekanan. Model non linier perambatan gelombang Boussinesq juga sudah dipergunakan untuk

memodelkan peristiwa perambatan gelombang tsunami aceh tahun 2004 (Horrillo dkk, 2004).

Dari hasil pemodelan perambatan gelombang tsunami yang menggunakan persamaan non linier yang digunakan Kowalik dan Murty (1993) dan persamaan non linier Boussinesq model yang digunakan oleh Shigihara dkk (2005) menunjukkan bahwa tinggi gelombang (H) yang dihasilkan model Boussinesq lebih kecil dibandingkan dengan model yang digunakan oleh Kowalik dan Murty (1993), akan tetapi waktu running program yang dibutuhkan oleh model Boussinesq adalah 5,6 kali lebih lama dari waktu yang dibutuhkan untuk running model yang digunakan oleh Kowalik dan Murty (1993). Hal ini karena dalam perhitungan numeriknya fungsi potensial ψ harus diperhitungkan terlebih dahulu sebelum menghitung u , v , dan η . Berdasarkan waktu perambatan gelombangnya, model Boussinesq relatif lebih lambat dari waktu perambatan gelombang dari model yang dipergunakan oleh Kowalik dan Murty (1993).

2.7. Kondisi Batas Model

Persamaan untuk kondisi batas pertama kali diusulkan oleh Reynold (1978). Disini Reynold (1978) mengaplikasikan persamaan kondisi batasnya untuk masalah perambatan gelombang secara 2 dimensi yang menggunakan persamaan hyperbola. Persamaan ini juga mulai dikembangkan dan dimodifikasi (Zakaria, 2003), untuk mengurangi refleksi dari kondisi batasnya. Persamaan yang dipergunakan untuk menghitung kondisi batas (boundary condition) pada model perambatan gelombang tsunami adalah menggunakan persamaan kondisi batas yang dinamakan kondisi batas terbuka (Open Limit Boundary condition) yang diformulasikan sebagai berikut,

Dimana untuk kedalaman (h) yang konstan dapat dihitung,

$$\frac{\partial u}{\partial t} + g \frac{\partial \eta}{\partial x} = 0 \quad \text{and}$$

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + h \frac{\partial u}{\partial x} = 0 \quad (27)$$

Sehingga refleksi dari boundary dapat direduksi menjadi,

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} \pm \sqrt{g \cdot h} \cdot \frac{\partial}{\partial x} \right) \left(u \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \cdot \eta \right) = 0 \quad (28)$$

dari persamaan (30) didapat,

$$u \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \cdot \eta = \text{constant at } \frac{\partial x}{\partial t} = \pm \sqrt{gh} \quad (29)$$

Sehingga perambatan gelombang untuk arah negatif dapat ditulis sebagai berikut,

$$u_2 \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \cdot \eta_2 = u_1 \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \cdot \eta_1 \quad (30)$$

Dan perambatan gelombang untuk arah positif dapat ditulis menjadi,

$$u_2 \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \cdot \eta_2 = u_o \pm \sqrt{\frac{g}{h}} \cdot \eta_o \quad (31)$$

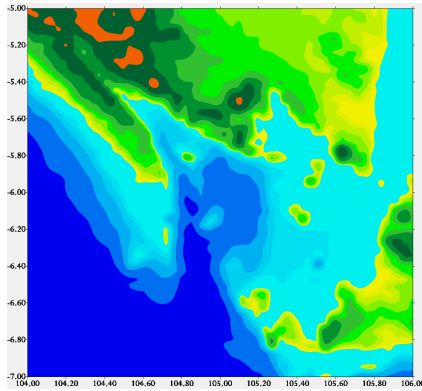
Persamaan kondisi batas ini sudah dipergunakan oleh Hantoro (2007) serta Goto dan Ogawa (1992) dalam memodelkan perambatan gelombang tsunami.

2.8. Kondisi Awal Model

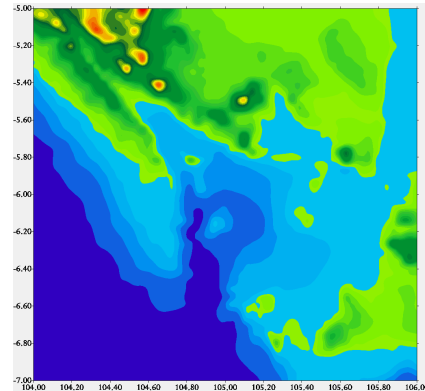
Untuk kondisi awal perambatan gelombang tsunami diasumsikan seperti diakibatkan meletusnya gunung Krakatau tahun (1883). Sumber gelombang didalam pemodelan numerik merupakan sumber yang berupa titik. Pada lokasi gunung Krakatau diasumsikan terjadi pergerakan muka air atau gelombang setinggi 200 meter (Hantoro dkk, 2007). Dengan pergerakan tinggi muka air atau tinggi gelombang di titik atau di lokasi meletusnya gunung Krakatau, maka gelombang tersebut akan mengalami perambatan (*propagation*). Dari perambatan gelombang inilah maka akan dihitung tinggi muka air atau tinggi gelombang (H) serta lamanya waktu gelombang mencapai pantai (T) di sepanjang provinsi Lampung khususnya.

2.9. Data Bathymetri

Untuk dapat memodelkan perambatan gelombang tsunami, diperlukan data kontur kedalaman air. Kontur kedalaman air laut ini dinamakan bathymetri. Format data bathymetri yang dipergunakan ini adalah dalam format x , y , dan z . Data ini dengan lebar grid Δx dan Δy atau dengan resolusi 1 menit atau lebih kurang 800 meter. Data bathymetri bisa didapat dari GEODAS dan GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans). Bathymetri dengan resolusi 1 menit dari GEBCO juga dipergunakan oleh Horrillo dkk (2006) untuk memodelkan perambatan gelombang tsunami untuk peristiwa tsunami Aceh tahun 2004. GEODAS dan GEBCO tidak hanya memberikan data bathymetri akan tetapi juga termasuk data topografi. Contoh dari bathymetri dan topografi yang didapat dari GEODAS dan GEBCO adalah sebagai berikut,



Gambar 1. Bathimetri dan topografi untuk grid space 1 menit dari GEODAS.



Gambar 2. Bathimetri dan topografi untuk grid space 1 menit dari GEBCO.

Dari kedua gambar di atas terlihat bahwa data dari GEODAS sedikit lebih teliti dari pada data dari GEBCO. Akan tetapi dalam pemodelan akan dipergunakan data bathimetri, baik yang berasal dari GEODAS maupun yang berasal dari GEBCO.

BAB III. METODE PENELITIAN

3.1. Bahan penelitian

Penelitian ini menggunakan metode numerik dan bukan merupakan pemodelan fisik sehingga bahan yang akan dipergunakan untuk penelitian ini adalah hanya bahan berupa bahan habis pakai.

3.2. Peralatan penelitian

Peralatan atau perangkat penelitian yang akan dipergunakan dalam penelitian ini terdiri dari peralatan atau perangkat keras dan perangkat lunak. Perangkat keras adalah berupa komputer, laptop ataupun desktop. Sedangkan perangkat lunak (softwares) yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah berupa software sistem operasi (operating system) dan software pendukung. Untuk sistem operasi dipergunakan Linux Debian versi 4.0. Untuk software pendukung dipergunakan Fortran 77 (g77 atau f77), matlab versi 5.3, Octave versi 2, OpenOffice 2.0, Gnumeric, GMT (the generic mapping tools), dan beberapa softwares lain yang dijalankan dibawah sistem operasi linux. Alasan mengapa dipergunakannya sistem operasi linux debian ini adalah karena program yang dijalankan dan dibuat dengan menggunakan software pendukung yang berjalan sistem operasi linux ini adalah jauh lebih cepat bila dibandingkan dengan

software yang dijalankan di sistem operasi windows (Microsofts), dan linux debian lebih stabil bila dibandingkan dengan linux lainnya dan jauh sangat stabil bila dibandingkan dengan sistem operasi windows (Microsofts). Oleh karena itu dalam penelitian ini dipergunakan sistem operasi linux debian versi 4.0 (terbaru).

3.3. Waktu dan tempat pelaksanaan penelitian

Waktu pelaksanaan ini adalah selama kurang lebih 10 bulan, yaitu mulai dari bulan Januari 2009 sampai dengan November 2009. Tempat pelaksanaan penelitian ini adalah di program Studi magister Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Lampung.

3.4. Metode pelaksanaan penelitian

Metode yang dipergunakan dalam penelitian ini adalah metode numerik. Karena simulasi perambatan gelombang tsunami yang dilakukan dengan cara pemodelan numerik membutuhkan biaya yang relatif lebih murah bila dibandingkan jika model dibuat dengan menggunakan model fisik. Didalam simulasi model perambatan gelombang ini akan dipergunakan tiga model persamaan hidrodinamik perambatan gelombang tsunami seperti, persamaan non linier perambatan gelombang tsunami yang dipergunakan oleh Goto dan Ogawa (1992), persamaan non linier perambatan gelombang tsunami yang dipergunakan oleh Kowalik dan Murty (1993) dan persamaan non linier Boussinesq model yang dipergunakan oleh Shigihara (2005). Hasil simulasi pemodelan numerik perambatan gelombang untuk skenario perambatan gelombang melewati batu karang yang diasumsikan sebagai breakwater tenggelam sudah dihasilkan (lihat Gambar 3 s/d Gambar 8). Simulasi yang dihasilkan dalam pemodelan ini, baik pendekatan turunannya maupun persamaan untuk kondisi batasnya masih menggunakan metode pendekatan eksplisit beda hingga (explicit finite-difference

method) dengan akurasi orde ke 2.

Untuk penelitian yang akan dilakukan selanjutnya, akan digunakan ketiga model persamaan non linier perambatan gelombang di atas. Dengan mendekati turunan persamaan dengan pendekatan beda hingga untuk akurasi yang lebih tinggi, yaitu akurasi orde ke 4 sampai dengan akurasi orde ke 20, dispersi yang dihasilkan serta tinggi gelombang dan waktu perambatan gelombang sampai ke pantai akan menjadi lebih akurat. Persamaan kondisi batas untuk akurasi orde yang lebih tinggi juga akan diterapkan untuk ketiga persamaan perambatan gelombang di atas. Lokasi sumber gelombang yang akan dipergunakan sebagai sumber letusan gunung Krakatau adalah pada lokasi dimana Krakatau saat itu meletus. Besarnya gelombang pada lokasi titik sumber tersebut adalah 200 meter, ini berdasarkan data yang dipergunakan oleh Hantoro dkk (2007). Untuk skenario perambatan gelombang tsunami memerlukan data bathimetri. Disini data bathimetri yang akan dipergunakan adalah data dari GEODAS dan data dari GABCO. Dengan menggunakan 2 skenario ini juga akan dibandingkan tinggi gelombang dan waktu yang dibutuhkan gelombang untuk mencapai pantai pada lokasi-lokasi yang ditentukan.

Dari ketiga persamaan non linier perambatan gelombang yang dihasilkan, baik dengan menggunakan variasi dari akurasi pemodelan maupun dengan menggunakan 2 data bathimetri yang berbeda akan dibandingkan dengan data kejadian peristiwa tsunami tahun 1883. Dengan membandingkan tinggi gelombang hasil model numerik perambatan gelombang tsunami dengan skenario meletusnya gunung Krakatau dengan data real tinggi gelombang tsunami akibat meletusnya gunung Krakatau pada lokasi-lokasi tertentu yang tercatat, maka dapat ditentukan persamaan model perambatan gelombang mana yang memberikan hasil yang lebih mendekati. Juga akan dapat ditentukan, mana data bathimetri yang lebih baik untuk dapat digunakan untuk memodelkan skenario perambatan gelombang tsunami akibat meletusnya gunung Krakatau. Setelah didapat hasil yang terbaik maka selanjutnya dengan persamaan tersebut, dan dengan akurasi yang terbaik, bathimetri yang terbaik serta dengan menggunakan kekuatan letusan

krakatau seperti peristiwa letusan tahun 1883, akan dimodelkan skenario letusan Gunung Anak Krakatau. Dengan menggunakan persamaan non linier model perambatan gelombang tsunami yang terbaik inilah diharapkan hasil simulasi perambatan gelombang yang berupa tinggi gelombang dan waktu gelombang sampai di sepanjang pantai provinsi Lampung dapat ditentukan dengan akurat.

3.5. Luaran penelitian

Luaran dari penelitian ini adalah sebagai berikut,

- a) Didapat model numerik perambatan gelombang tsunami yang dapat memodelkan perambatan gelombang tsunami akibat meletusnya gunung krakatau dan dapat dipergunakan untuk mensimulasikan perambatan tsunami bila Gunung Anak Krakatau meletus dengan akurasi yang lebih baik.
- b) dapat memetakan resiko bencana tsunami untuk setiap kabupaten di provinsi Lampung yang wilayah pantainya beresiko terjadi bencana tsunami khususnya dan wilayah lain yang ada di Indonesia pada umumnya.
- c) submit papar hasil penelitian baik ke jurnal nasional maupun ke jurnal internasional
- d) Seminar hasil penelitian baik di tingkat nasional maupun di tingkat internasional.

3.6. Indikator keberhasilan penelitian

Penelitian ini dikatakan berhasil apabila bisa mendapatkan model numerik perambatan gelombang yang terbaik dengan akurasi tinggi dan dapat memodelkan perambatan gelombang tsunami untuk skenario meletusnya gunung krakatau.

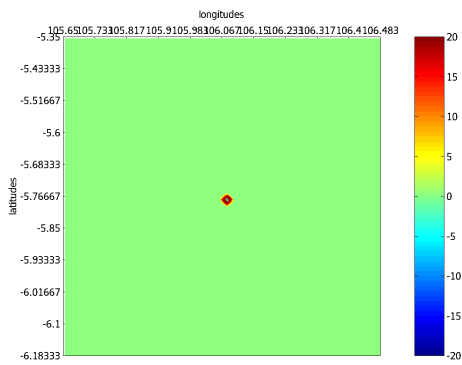
Hasil pemodelan yang berupa tinggi gelombang tsunami pada lokasi lokasi yang tercatat paling mendekati dengan data yang ada. Selain itu seminar nasional serta submit paper ke jurnal nasional juga dapat dijadikan indikator keberhasilan penelitian ini. Sedangkan untuk submit paper ke jurnal ke jurnal internasional membutuhkan waktu yang lebih lama dari penelitian ini, sehingga tidak dapat dijadikan indikator keberhasilan penelitian. Namun didalam penelitian ini juga ditargetkan untuk dapat submit hasil penelitian ke jurnal internasional.

BAB IV HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

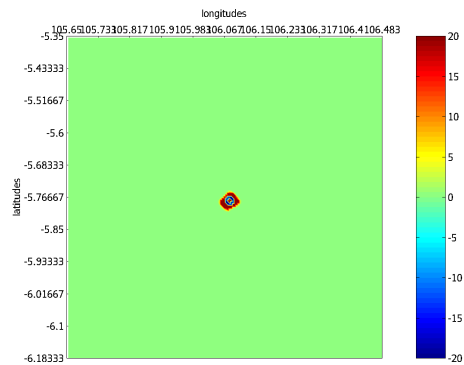
4.1. Hasil Perambatan Gelombang

Didalam pemodelan numerik, sebagai sumber gelombang adalah gelombang titik, yang merupakan gelombang tunggal. Untuk memodelkan gelombang permukaan, model gelombang Ricker dipergunakan dan diaplikasikan sebagaimana dipergunakan di dalam Zakaria (2003). Skema numerik yang dipergunakan untuk mensimulasikan perambatan gelombang tsunami yang disebabkan oleh meletusnya gunung Anak Krakatau. Data bathimetri yang dipergunakan didalam simulasi numerik diambil dari GEODAS dan GEBCO, dimana untuk data bathimetri dari GEODAS dalam akurasi 1 menit dengan lebar grid $\Delta x = \Delta y = 1,7$ kilometer, sedangkan untuk data bathimetri dari GEBCO bisa memberikan akurasi 30 detik (0,5 menit) dengan lebar grid $\Delta x = \Delta y = 850$ meter. Dimana posisi gunung anak Krakatau diasumsikan sama dengan posisi sumber gelombang, yaitu pada posisi $6^{\circ}06'00''$ Lintang Selatan dan $105^{\circ}24'00''$ Bujur Timur. Tinggi gelombang pada posisi sumber gelombang tersebut diasumsikan sama dengan 200 meter. Dimana prediksi kejadian meletusnya gunung anak Krakatau akan mempunyai kekuatan dan menimbulkan tinggi gelombang tsunami atau elevasi yang sama dengan dengan tinggi gelombang pada kejadian meletusnya gunung Krakatau pada tahun 1883 yang silam. Dari $5^{\circ}20'24''$ Lintang Selatan s/d $6^{\circ}42'30''$ Lintang Selatan, $105^{\circ}19'30''$ Bujur Timur s/d $106^{\circ}09'00''$ Bujur Timur. Didalam model ini dipergunakan data bathimetri dari GEBCO dengan banyaknya grid yang dipergunakan untuk adalah 181×181 grid.

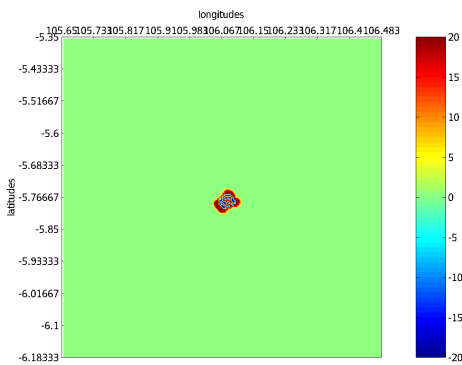
Berdasarkan hasil penelitian seperti yang dipresentasikan dalam Gambar berikut menunjukkan simulasi perambatan gelombang tsunami akibat meletusnya gunung anak Krakatau untuk setiap waktu t mulai dari 50 detik sampai dengan 5000 detik. Dari penelitian yang dilakukan, dihasilkan 100~200 gambar simulasi perambatan gelombang tsunami. Sumber gelombang yang dipergunakan untuk mensimulasikan letusan gunung anak Krakatau adalah berupa sumber gelombang titik dengan tipe Ricker wavelet. Signal atau gelombang yang disimulasikan ini adalah merupakan gelombang tunggal. Dengan menggunakan Ricker wavelet, gelombang yang dihasilkan lebih halus bila dibandingkan dengan gelombang sinus. Dari posisi koordinat $6^{\circ}06'00''$ Lintang Selatan dan $105^{\circ}24'00''$ Bujur Timur, bila tinggi gelombang tsunami dengan ketinggian 100 meter merambat ke pantai provinsi Lampung dan provinsi Banten. Dalam perambatannya gelombang terhalang oleh pulau-pulau disekitarnya, sehingga gelombang tsunami yang merambat tersebut terdispersi seperti tergambar. Warna merah tua dengan skala 20 menunjukkan bahwa elevasi muka air atau amplitudo gelombang maksimum sama dengan 20 meter dan warna biru tua dengan skala 20 menunjukkan bahwa elevasi muka air minimum atau amplitudo minimum adalah sama dengan 20 meter, sedangkan warna hijau muda menunjukkan bahwa elevasi muka air sama dengan 0 meter.



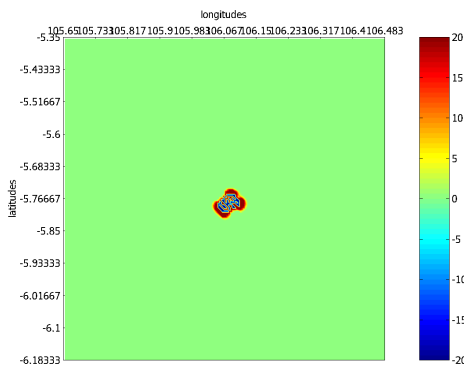
Gambar 3. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 50$ detik



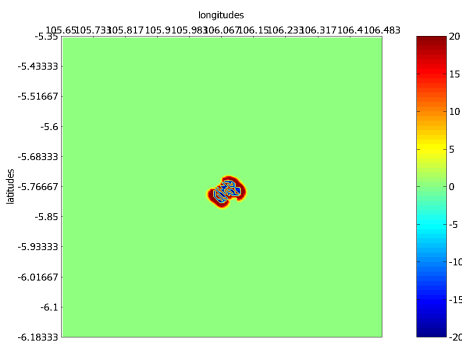
Gambar 4. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 100$ detik



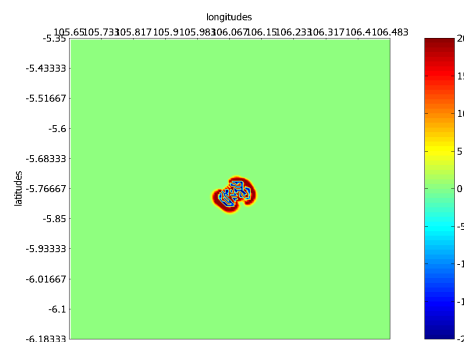
Gambar 5. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 150$ detik



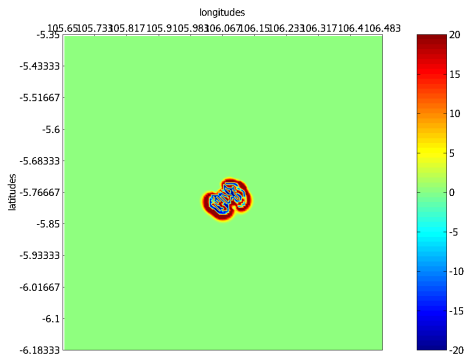
Gambar 6. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 200$ detik



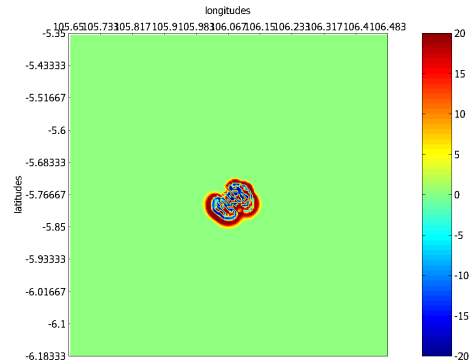
Gambar 7. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 250$ detik



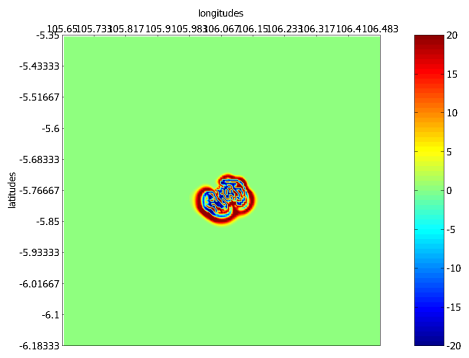
Gambar 8. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 300$ detik



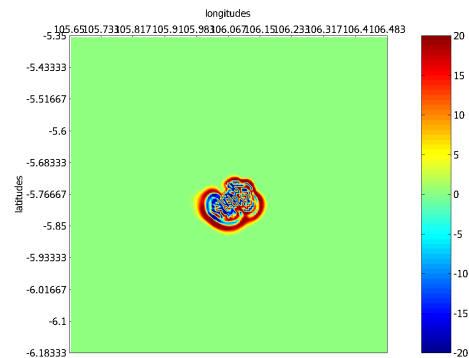
Gambar 9. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 350$ detik



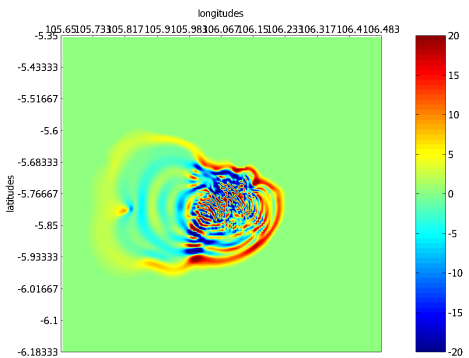
Gambar 10. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 400$ detik



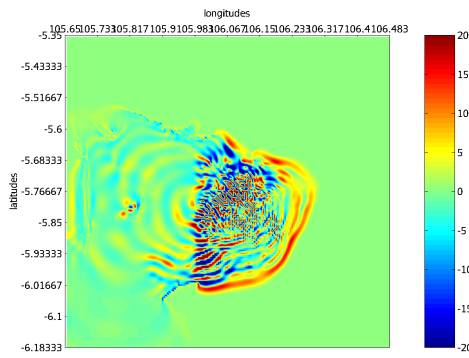
Gambar 11. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 450$ detik



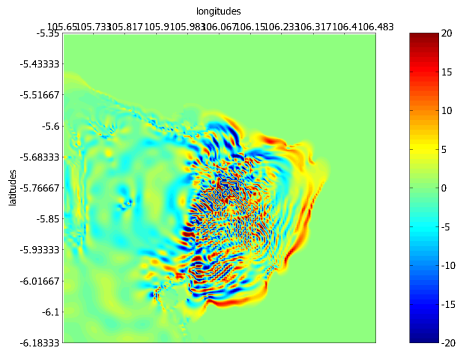
Gambar 12. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 500$ detik



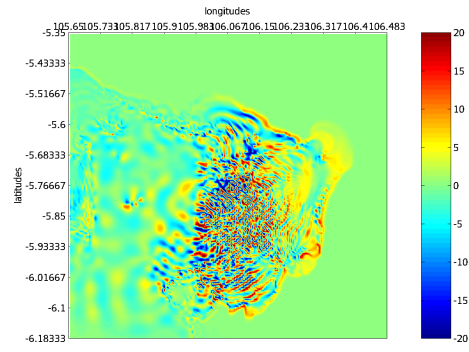
Gambar 13. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 1000$ detik



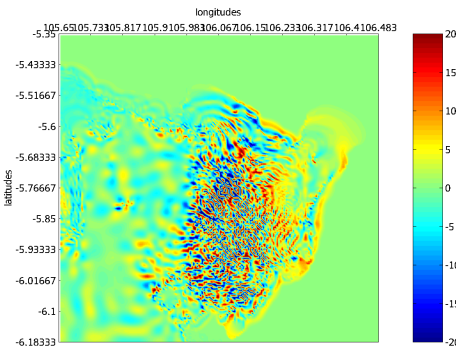
Gambar 14. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 1500$ detik



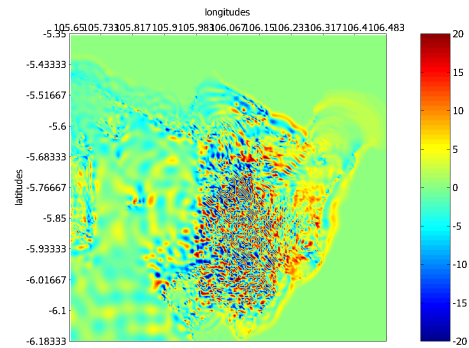
Gambar 15. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 2000$ detik



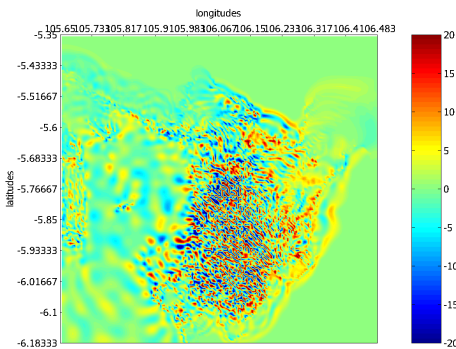
Gambar 16. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 2500$ detik



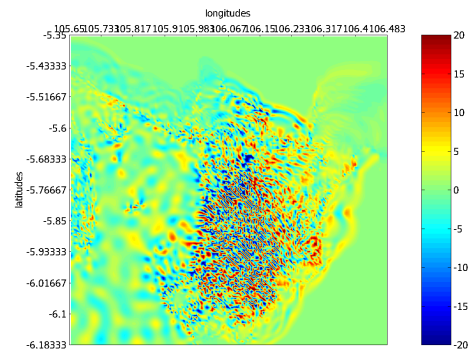
Gambar 17. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 3000$ detik



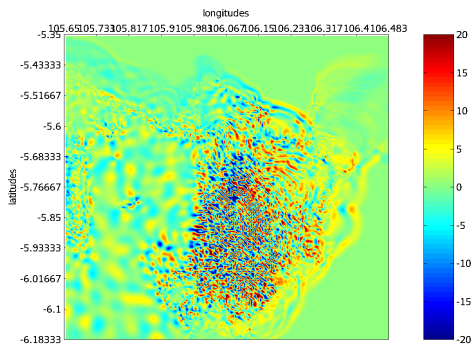
Gambar 18. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 3500$ detik



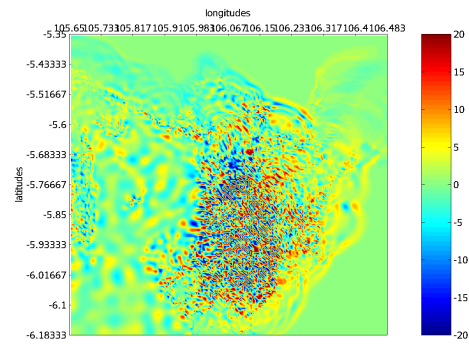
Gambar 19. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 4000$ detik



Gambar 20. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 4500$ detik



Gambar 21. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 4750$ detik



Gambar 22. Snapshot perambatan gelombang tsunami saat $t = 5000$ detik

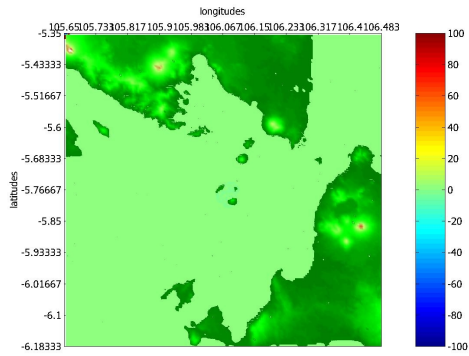
4.2. Pembahasan Perambatan Gelombang Tsunami

Dari Gambar 3 s/d Gambar 22 terlihat perambatan gelombangnya dari sumber gelombang titik yang merupakan sumber gelombang Tsunami yang berasal dari gunung Anak Krakatau. Simulasi Gelombang tsunami yang diakibatkan oleh meletusnya gunung Anak Krakatau tersebut akan merambat dengan kecepatan perambatan gelombang yang tergantung dari kedalaman air yang dilaluinya. Dari Gambar 3 s/d 12 terlihat jelas bahwa gelombang maksimum akan terlebih dahulu merambat menuju pantai dibandingkan dengan gelombang minimum. Warna merah menunjukkan gelombang maksimum atau positif dan warna biru menunjukkan gelombang minimum atau gelombang negatif. Warna hijau muda menunjukkan bahwa pada lokasi tersebut amplitudo gelombang adalah sama dengan nol. Amplitudo nol bisa berarti peralihan amplitudo gelombang atau lokasi dengan bathymetri negatif atau lokasi dengan kontur topografi. Dari gambar ini juga terlihat batas antara daerah basah (dengan kedalaman laut) dan daerah kering atau dengan kontur topografi. Batas tersebut merupakan batas run-up gelombang tsunami, dengan asumsi gelombang tidak merambat terus ke wilayah dengan kontur topografi, dan tsunami hanya merambat

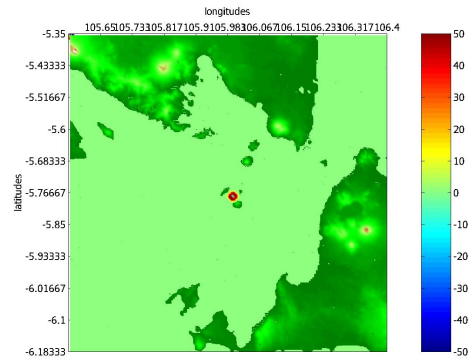
pada daerah yang mempunyai kontur bathymetri. Perambatan gelombang tsunami juga dipengaruhi oleh pulau-pulau yang ada disekitar lokasi perambatan gelombang. Dispersi gelombang terjadi setelah gelombang merambat melewati pulau pulau yang berada didekatnya. Dispersi juga dipengaruhi oleh variasi kedalaman laut atau kekasaran bathymetri dan kekasaran grid yang dipergunakan untuk menjalankan program ini. Koreksi kedalaman bathymetri juga perlu dilakukan agar perhitungan program menghasilkan pendekatan yang konvergen, dan tidak menghasilkan pendekatan yang divergen. Artinya, program dapat berhasil dijalankan dan tidak menjadi error.

4.3. Hasil Penelitian dengan Topografi

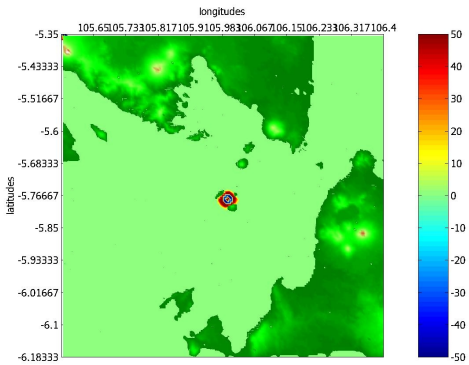
Hasil penelitian yang sudah memasukkan kontur topografi dapat dilihat pada gambar -gambar sebagai berikut,



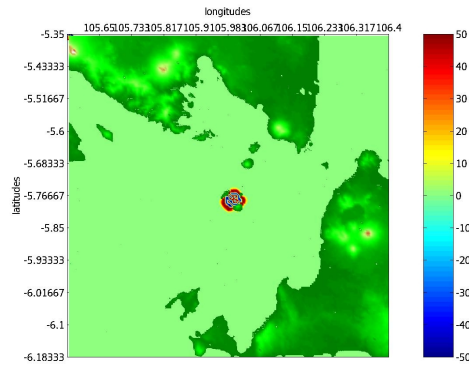
Gambar 23. Peta topografi daerah perambatan gelombang tsunami



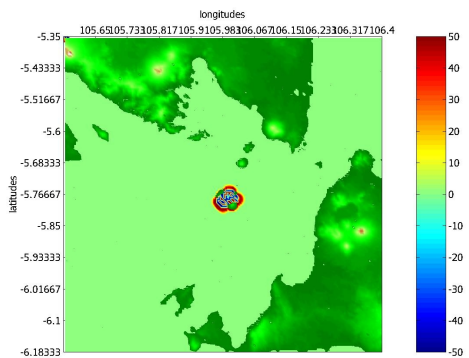
Gambar 24. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, $t = 50$ detik



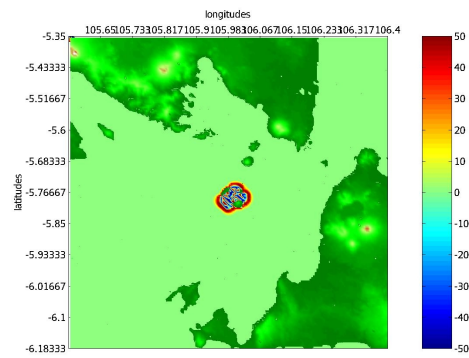
Gambar 25. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, $t = 100$ detik



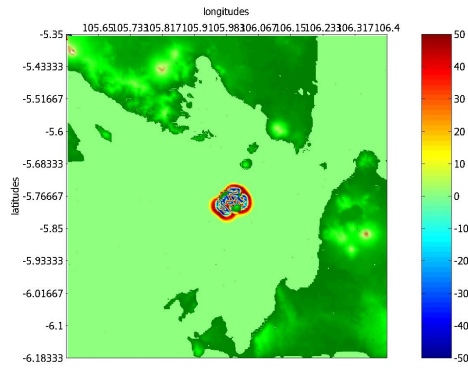
Gambar 26. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, $t = 150$ detik



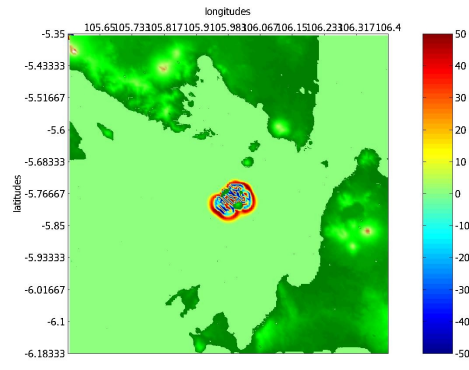
Gambar 27. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, $t = 200$ detik



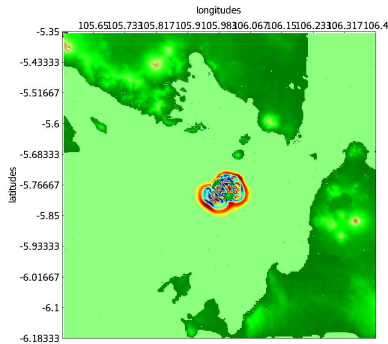
Gambar 28. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, $t = 250$ detik



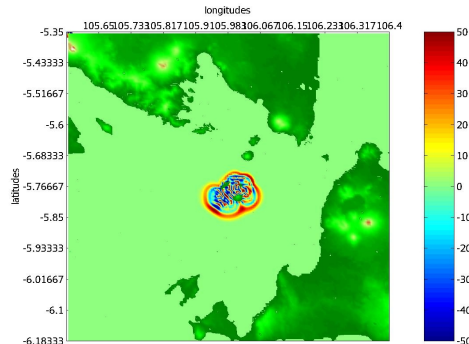
Gambar 29. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, $t = 300$ detik



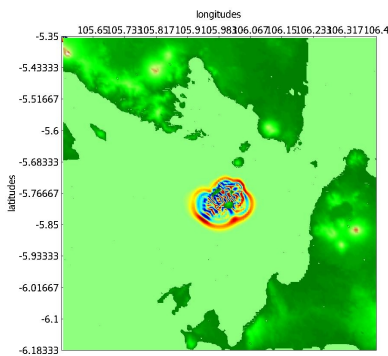
Gambar 30. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, $t = 350$ detik



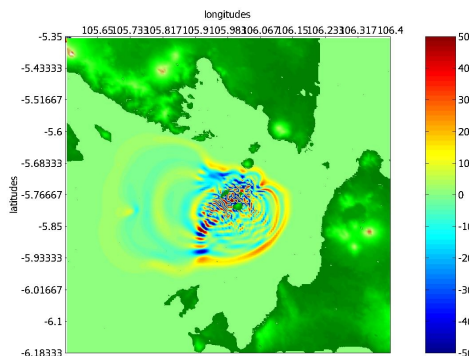
Gambar 31. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, $t = 400$ detik



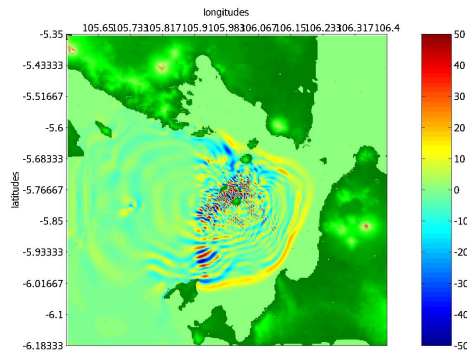
Gambar 32. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, $t = 450$ detik



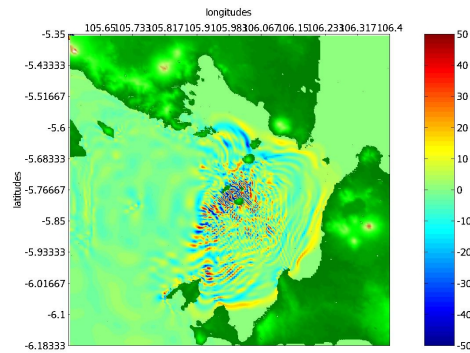
Gambar 33. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, $t = 500$ detik



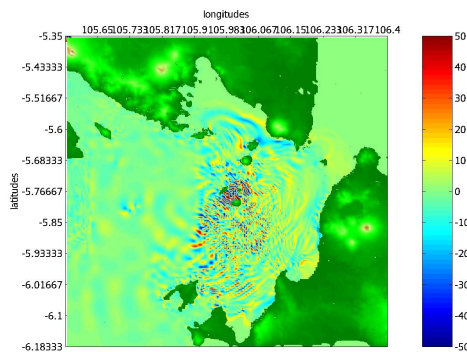
Gambar 34. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, $t = 1000$ detik



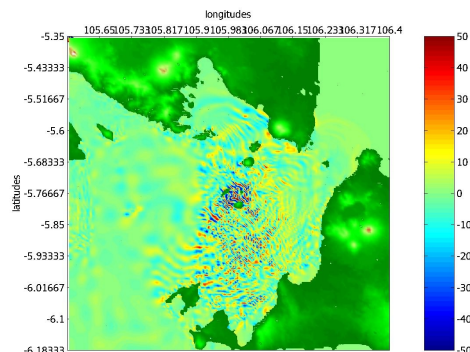
Gambar 35. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, $t = 1500$ detik



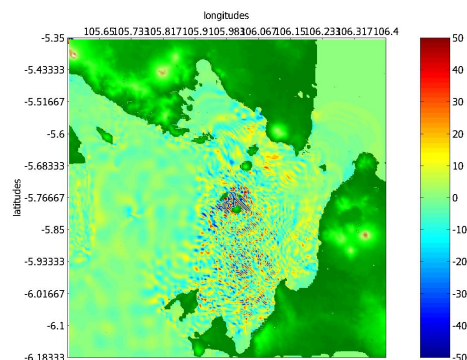
Gambar 36. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, $t = 2000$ detik



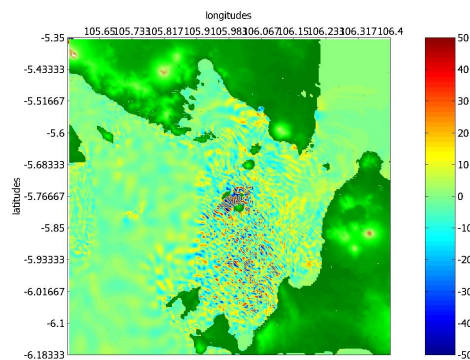
Gambar 37. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, $t = 2500$ detik



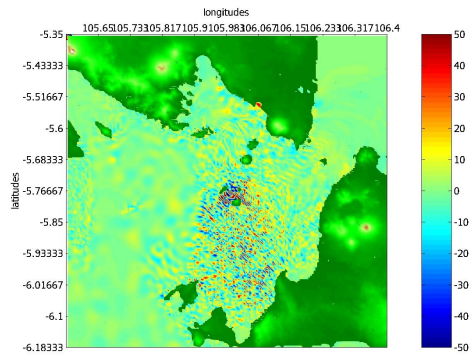
Gambar 38. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, $t = 3000$ detik



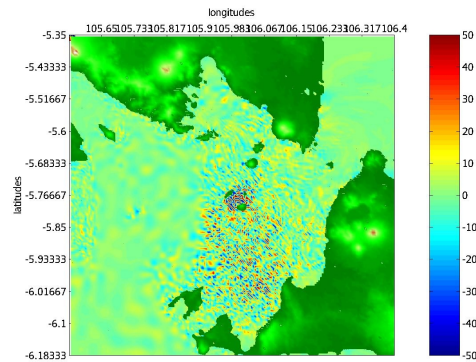
Gambar 39. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, $t = 3500$ detik



Gambar 40. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, $t = 4000$ detik



Gambar 41. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, $t = 4500$ detik



Gambar 42. Topografi dan snapshot perambatan gelombang tsunami, $t = 5000$ detik

4.4. Pembahasan penelitian dengan Topografi

Gambar 23, 24, 25, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41 sampai dengan Gambar 42 merupakan gambar snapshot perambatan gelombang dengan memasukkan peta situasi atau kontur topografi. Gelombang tsunami dengan memasukkan gambar situasi topografi perambatan gelombang tsunami di provinsi Lampung dan provinsi Banten untuk snapshot saat waktu perambatan gelombang tsunami, $t = 50, 100, 150, 200, 250, 300, 350, 400, 450, 500, 1000, 1500, 2000, 2500, 3000, 3500, 400, 4500,$ dan 5000 detik. Pada Gambar 1 s/d Gambar 20 menggunakan skala dengan asumsi maksimum dan minimum sama dengan 20 meter. Sedangkan Gambar 23 s/d 42 di atas menggunakan skala tinggi gelombang 100 meter, atau amplitudo maksimum dan minimum sama dengan 50 meter.

Didalam penelitian ini, perhitungan numerik dengan menggunakan akurasi orde yang lebih tinggi sudah dicoba. Karena diasumsikan dengan mempergunakan akurasi yang lebih tinggi, program akan menghasilkan simulasi gelombang yang lebih akurat, akan tetapi ternyata jalannya program menjadi tidak stabil. Sehingga untuk pemodelan perambatan gelombang tsunami, untuk menjaga

kesetabilan dengan akurasi yang lebih baik, didalam perhitungan numeriknya hanya mempergunakan metode *staggered grid* atau *leap frog* (lompat katak). Hal ini terjadi dikarenakan kontur bathymetri pada beberapa lokasi sangat bervariasi, terutama pada lokasi sekitar lokasi gunung anak Krakatau menuju ke wilayah terluar.

Pada penelitian ini dipergunakan beberapa persamaan gelombang panjang. Persamaan gelombang panjang yang dipergunakan di dalam penelitian ini sesuai dengan metode penelitian yang diusulkan untuk dipergunakan. Persamaan gelombang panjang yang diusulkan oleh Kawamata dkk (1993) menghasilkan simulasi perambatan gelombang tsunami yang lebih stabil untuk variasi kedalaman dasar laut di wilayah studi, dibandingkan dengan persamaan gelombang lainnya, yang menghasilkan simulasi perambatan gelombang tsunami yang kurang stabil dan sering menjadi divergen, sehingga hasil yang diberikan dalam penelitian ini mempergunakan persamaan gelombang panjang dari Kawamata dkk (1993). Didalam persamaannya kawamata (1993) mempergunakan faktor reduksi yang diusulkan oleh Goto dan Shuto (1983). Walaupun demikian fortran code sudah dikembangkan untuk beberapa persamaan gelombang panjang, sesuai dengan tujuan penelitian ini.

Hasil penelitian ini dapat dibandingkan dengan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh Hantoro dkk (2007), yang mensimulasikan perambatan gelombang tsunami akibat meletusnya gunung Krakatau diketahui seperti dalam Tabel 1 sebagai berikut,

Tabel 1. Perbandingan waktu perambatan gelombang tsunami

Lokasi	Simulasi oleh Hantoro dkk (2007)			Hasil Penelitian
	Simulasi 1	Simulasi 2	Simulasi 3	
Teluk Betung	76 menit	82 menit	78 menit	< 5000 detik (83,33 menit)
Kalianda	48 menit	48 menit	45 menit	2500 detik (41,67 menit)
Merak	51 menit	47 menit	58 menit	< 3500 detik (58,33 menit)

Dari Tabel 1 terlihat kesesuaian waktu perambatan gelombang tsunami dari hasil penelitian yang dilakukan oleh peneliti dan dengan waktu perambatan gelombang tsunami dari hasil penelitian yang dilakukan oleh Hantoro dkk (2007). Hasil ini mempresentasikan waktu perambatan gelombang tsunami mencapai pantai provinsi Lampung dan provinsi Banten akibat meletusnya gunung Krakatau tahun 1883. Dari perbandingan hasil penelitian ini menunjukkan bahwa waktu perambatan gelombang tsunami mencapai pantai provinsi Lampung (Teluk Betung dan Kalianda) dan pantai provinsi Banten (Merak), yang dihasilkan dalam penelitian sangat mendekati dengan hasil penelitian yang dilakukan oleh Hantoro dkk (2007). Ini menunjukkan bahwa model yang dibuat mendekati dengan model yang sudah dilakukan dalam penelitian lainnya.

BAB V. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari hasil penelitian ini adalah bahwa stabilitas simulasi gelombang tsunami sangat ditentukan oleh tingkat variasi bathymetri yang dipergunakan dan persamaan gelombang panjang yang dipergunakan. Persamaan gelombang panjang yang diperkenalkan oleh Kawamata dkk (1993) menghasilkan perambatan gelombang yang lebih stabil dibandingkan dengan persamaan gelombang panjang yang dihasilkan dari persamaan gelombang lainnya. Dan untuk simulasi perambatan gelombang dkk (1993) disarankan mempergunakan persamaan gelombang panjang seperti yang dipergunakan oleh Kawamata dkk (1993) yang dapat dipergunakan untuk kondisi tingkat variasi sama dengan kontur topografi yang dipergunakan di dalam penelitian ini. Sedangkan untuk daerah yang kedalaman lautnya tidak terlalu bervariasi, dapat dipergunakan model perambatan gelombang panjang lainnya.

Perambatan gelombang tsunami yang dimodelkan ini hanya akibat sumber gelombang berupa titik yang diasumsikan sebagai letusan gunung berapi di tengah laut, seperti meletusnya gunung Krakatau dan gunung Anak Krakatau. Sedangkan perambatan gelombang tsunami akibat patahan belum dilakukan pada penelitian ini, sedangkan peluang dan resiko terjadinya perambatan gelombang tsunami akibat patahan lebih besar dibandingkan dengan perambatan gelombang akibat

meletusnya gunung di tengah laut. Didalam penelitian ini juga belum bisa mensimulasikan penggenangan akibat gelombang tsunami.

5.2. SARAN

Pada penelitian lanjutan disarankan, untuk melakukan penelitian atau pemodelan yang dapat mensimulasikan perambatan gelombang tsunami akibat patahan yang terjadi di tengah lautan atau akibat gempa tektonik, selain itu juga perlu dilakukan penelitian lanjutan sejauh mana penggenangan yang terjadi akibat gerak gelombang tsunami di pantai provinsi Lampung. Karena dengan mengetahui luasan penggenangan yang terjadi, kerugian akibat tsunami dapat direvisi lebih baik lagi.

DAFTAR PUSTAKA

- Goto, C. dan Ogawa, Y., 1992, Numerical method of tsunami simulation with leap-frog scheme, Disaster Control Research Center, Tohoku University.
- Goto, C. dan Shuto, 1983, Numerical simulation of tsunami propagations and run-up, In *Tsunami-Their Science and Engineering*, edited by K. Iida and T. Iwasaki, pp. 439-451. Terra Scientific Publ. Comp.; Tokyo.
- Hantoro, W. S., Latief, H., Susilohadi, and Airlangga, A.Y., 2007, Volcanic tsunami of Krakatau: chronology model and its mitigation in Sunda Strait, *Proceedings of International Symposium on Geotechnical Hazards: Prevention, Mitigation and Engineering Response*. pp.331-354.
- Horrillo, J., Kowalik, Z. Shigihara, Y., 2006, Wave dispersion study in the Indian Ocean-tsunami of December 26, 2004, *Marine Geodesy*, Vol. 29, pp.149-166.
- Horrillo J. J., Kowalik, Z. and Kornkven, E., 2004, The third international workshop on long-wave runup models, report.
- Kowalik, Z., Proshutinsky T. dan Proshutinsky, A., 2006, Tide-tsunami interactions, *Science of Tsunami Hazards*, Vol. 24, No. 4, pp.242-256.
- Kowalik, Z. and Murty, T. S., 1993, Numerical simulation of two-dimensional tsunami runup, *Marine Geodesy*, Vol.16, pp.87-100.

- Kawamata, S., Imamura, F., dan Shuto, N., 1993, Numerical Simulation of the 1883 Krakatau Tsunami, Proceedings of XXV Congress of International Association for Hydraulic Reserch IV, pp. 24-31
- Mahi, A. K., Zakaria., A., 2008, Rencana strategis dan rencana aksi mitigasi bencana Kota Bandar Lampung, Laporan Proyek, DKP Profinsi Lampung,156 hal.
- Marchuk, Andrei J. dan Anisimov, A., 2001, A method for numerical modeling run-up on the coast of an arbitrary profile, ITS 2001 Proceedings, Session 7, Number 7-27.
- Reynold, A. C. 1978, Boundary condition for the numerical solution of wave propagation problems, Geophysics, Vol. 43 No. 6, pp.1099-1110.
- Shigihara, Y., K. Fujima, M. Homma and K. Saito, 2005, Numerical methods of linier dispersive wave equation for the practical problems, Asian and Pacific Coasts, Sept.4-8, Jeju, South Korea, pp.14.
- Watts, P., Ioualalen, M., Grill, S., Shi, F. dan Kirby, J. T., 2005, Numerical simulation of December 26, 2004 Indian ocean tsunami using higher order boussinesq model, Ocean waves measurement and analysis, Fifth International Symposium WAVES 2005, 3rd July, 2005, Madrid, Spain, No.221.
- Watts, P., Grill, S.T., Kirby, J. T., Fryer G. J., and Tappin, D. R., 2003, Landslide tsunami case studies using a boussinesq model and a fully nonlinier tsunami generation model, Natural Hazards and Earth System Sciences, Vol. 3, pp.391-402.
- Zakaria, A., 2008, Pemodelan numerik perambatan gelombang 2 dimensi melalui breakwater tenggelam, Prosiding Satek 2008, Universitas Lampung.
- Zakaria, A., 2003, Numerical modelling of wave propagation using higher order finite difference formulas, Thesis (Ph.D.), Curtin University f Technology, Perth, Western Ausstralia, 247 hal.