

ESTIMASI MODEL KECEPATAN LOKAL 1-D DI PULAU FLORES MENGUNAKAN METODE INVERSI WAKTU KEDATANGAN GELOMBANG P DAN S

Ika Trilestari dan Madlazim

Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Negeri Surabaya

Abstract. It was done research about estimation of local velocity model 1-D on the island of Flores using the P and S wave arrival time inversion. Purpose of this research to estimate the local velocity model 1-D on the Island of Flores by using the method of *Arrival Time Inversion of P and S waves* and to estimate the depth and velocity in each layer of Conrad and Moho. The data used in this study were drawn from the catalog WebDC (<http://www.WebDC.eu/arclink/query?sesskey=e18d507e>), with boundary-8.97° LS s / d-8.19° LS and 119.34° BT s / d 123.9° BT of year 2006 - 2012, and recorded data there are 30 events and 10 seismic stations located on the island of Flores. Based on the data we have gained from the research, then we do the picking phase arrival times of P and S waves using SeisGram2K60 software and further analyzed using the software HypoGA.CG2010. The results obtained are the velocity and depth of P and S waves are found in Conrad and Moho layer. Local velocity model of P and S waves have the same depth in the layer of the magnitude of the Conrad and Moho in a row is 0.000 km - 20.250 km and 20.250 km - 37.400 km. While the velocity of the two different models. Model of P and S wave velocity, the successive layers of Conrad (6.115 ± 0.248) km/s and (3.557 ± 0.201) km / s, where as the Moho layer of (7.003 ± 0.232) km/s and (4.065 ± 0.172) km/s. Comparison of velocity between P and S waves of (1.721 ± 0.054) km/s and obtained rms of 0.001. From these results shows that each layer is different and more velocity into the velocity the greater because its density is also large. In addition, the rms value of the resulting small, the velocity model obtained from this study have a greater degree of accuracy.

Keywords : Conrad, Moho, Upper crust, Lower crust, Upper mantle, HypoGA.CG2010.

Abstrak. Telah dilakukan penelitian tentang estimasi model kecepatan lokal 1-D di Pulau Flores menggunakan metode inversi waktu kedatangan gelombang P dan S. Dengan tujuan untuk mengestimasi model kecepatan lokal 1-D di Pulau Flores dengan menggunakan metode *Inversi Waktu Kedatangan Gelombang P dan S* dan untuk mengestimasi kedalaman dan kecepatan pada masing-masing lapisan *Conrad* dan *Moho*. Data yang digunakan dalam penelitian ini diambil dari catalog WebDC (<http://www.WebDC.eu/arclink/query?sesskey=e18d507e>), dengan batas wilayah - 8.97° LS s/d -8.19° LS dan 119.34° BT s/d 123.9° BT dari tahun 2006 - 2012, dan data yang direkam ada 30 event dan 10 stasiun seismik yang terletak di Pulau Flores. Berdasarkan data yang telah kita peroleh dari penelitian, kemudian kita lakukan proses *picking* fase waktu kedatangan gelombang P dan S dengan menggunakan *software* SeisGram2K60 dan selanjutnya dianalisis dengan menggunakan *software* HypoGA.CG2010. Hasil yang diperoleh adalah kecepatan dan kedalaman gelombang P dan S yang terdapat pada lapisan *Conrad* dan *Moho*. Model kecepatan lokal gelombang P dan S mempunyai kedalaman yang sama pada lapisan *conrad* dan *moho* yang besarnya secara berturut-turut adalah 0,000 km - 20,250 km dan 20,250 km - 37,400 km. Sedangkan besar kecepatan kedua model berbeda. Model kecepatan gelombang P dan S, pada lapisan *conrad* berturut-turut sebesar ($6,115 \pm 0,248$) km/s dan ($3,557 \pm 0,201$) km/s, sedangkan pada lapisan *moho* sebesar ($7,003 \pm 0,232$) km/s dan ($4,065 \pm 0,172$) km/s. Perbandingan kecepatan antara gelombang P dan S sebesar ($1,721 \pm 0,054$) km/s dan *rms* yang didapatkan sebesar 0,001. Dari hasil tersebut terlihat bahwa tiap lapisan kecepatannya berbeda dan semakin kedalam kecepatannya semakin besar karena kerapatannya juga besar. Di samping itu, dengan nilai *rms* yang dihasilkan kecil maka model kecepatan yang didapatkan dari penelitian ini mempunyai taraf ketelitian yang lebih besar.

Kata-kata kunci : Conrad, Moho, Upper crust, Lower crust, Upper mantle, HypoGA.CG2010.

1. PENDAHULUAN

Indonesia merupakan sebuah negara yang memiliki potensi bencana alam yang sangat tinggi. Jika dilihat secara geografis Indonesia merupakan negara kepulauan yang berada pada pertemuan empat lempeng tektonik yaitu lempeng Benua Australia, Benua Asia, Samudera Pasifik dan Lempeng Samudera Hindia. Secara geologi kondisi yang membuat wilayah Pulau Flores berpotensi gempa karena menjadi daerah pertemuan tiga lempeng penyusun kulit bumi yakni Indoaustralia, Eurasia, dan Pasifik. Ketiga lempeng relatif bergerak satu terhadap yang lain sehingga Pulau Flores mengalami aktivitas gempa bumi yang sangat tinggi akibat muncul patahan yang juga merupakan generator aktivitas gempa bumi [1].

Pulau Flores merupakan bagian dari busur gunung api Sunda-Banda yang terbentuk akibat tumbukan antara lempeng Australia dengan lempeng Asia. Interaksi kedua lempeng tersebut dicerminkan oleh aktivitas gempa yang intensitas disertai aktivitas gunung api. Di selatan, zona tumbukan kedua lempeng tersebut dijumpai di sebelah selatan Pulau Timor. Di sebelah utara pulau Flores yang merupakan daerah belakang busur dijumpai sesar sungkup yang berarah relatif barat-timur, sejajar dengan busur kepulauan, yang dikenal sebagai *Flow thrust* [2].

Pulau Flores berada pada daerah yang mempunyai aktifitas gempa yang cukup tinggi. Pada beberapa tahun terakhir ini bencana alam akibat gempa bumi semakin sering terjadi di Pulau Flores oleh karena itu dengan menggunakan data lokal yaitu data jarak pusat gempa dengan stasiun pencatat gempa, diharapkan memperoleh ketelitian model kecepatan gelombang P1-D yang lebih teliti, maka dilakukan penelitian yang berjudul "Estimasi Model Kecepatan Lokal 1-D Di Pulau Flores Menggunakan Metode Inversi Waktu Kedatangan Gelombang P dan S".

II. METODE PENELITIAN

A. Jenis Penelitian

Jenis penelitian yang telah dilakukan adalah jenis eksperimen laboratorium yang berbasis komputasi atau inversi, dimana data yang telah diperoleh dari catalog webDc kemudian dianalisis di laboratorium komputasi, dengan judul penelitian "Estimasi Model Kecepatan Lokal 1-D Di Pulau Flores Menggunakan Metode Inversi Waktu Kedatangan Gelombang P dan S".

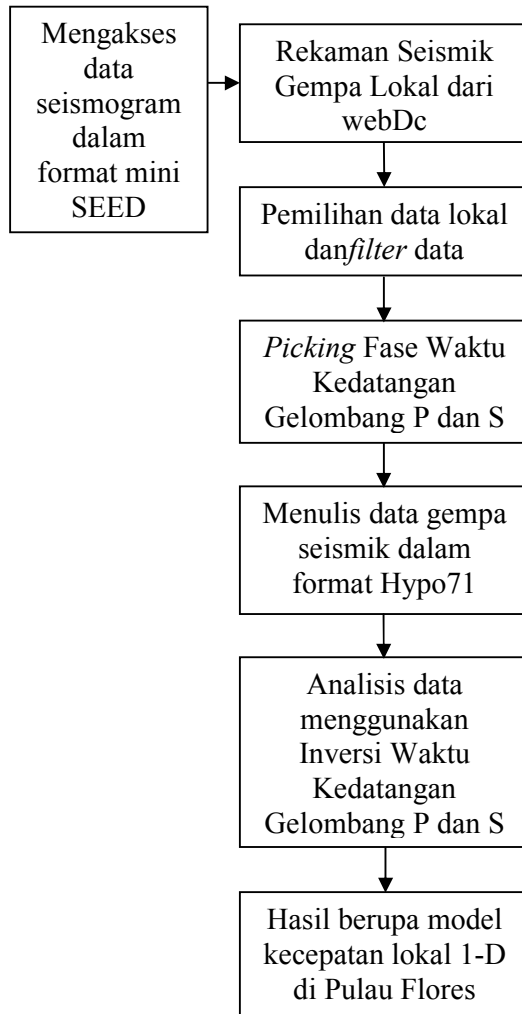
B. Software Penelitian

HypoGA CG2010 merupakan *software* utama yang digunakan dalam penelitian ini dengan menggunakan Linux. Program hypoGA digunakan untuk menentukan model kecepatan gelombang seismik, dimana suatu program yang menerapkan metode Algoritma Genetika. Metode Algoritma Genetika adalah suatu metode yang menerapkan ilmu biologi yaitu hukum evolusi alam dimana untuk menghasilkan suatu model yang terbaik melalui beberapa tahapan antara lain tahapan reproduksi, seleksi, dan mutasi. HypoGA CG2010 diperkenalkan oleh Lopes dan Marcelo pada tahun 2011.

Sedangkan mseed2sac-1.7 merupakan *software* kedua yang digunakan untuk merubah data dalam bentuk SEED menjadi data dalam bentuk SAC. Kemudian data dalam bentuk SAC tersebut akan di *picking* dengan menggunakan *software* ketiga yaitu SeisGram2K60. *Picking* data dengan menggunakan *software* SeisGram2K60 akan diperoleh waktu kedatangan gelombang P dan gelombang S. Selain itu diperoleh pula nama stasiun dari masing-masing data.

C. Langkah Penelitian

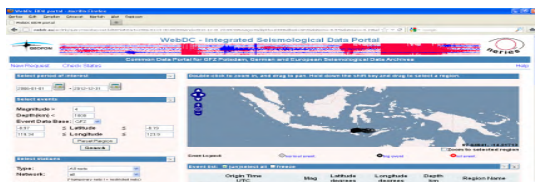
1. Rancangan Penelitian



Gambar 1. Rancangan Penelitian

2. Akses Data

Dalam penelitian ini data yang digunakan yaitu kita akses data seismogram dalam format mini SEED dari sumber gempa di Pulau Flores yang dicatat oleh catalog webDc (<http://www.webDc.eu/arclink/query?sesskey=e18d507e>), dengan batas wilayah -8.97°LS s/d -8.19°LS dan 119.34°BT s/d 123.9°BT , dengan rentang waktu kejadian gempa bumi sejak tahun 2006 sampai tahun 2012. Tampilan awal pada webDc seperti gambar berikut ini:



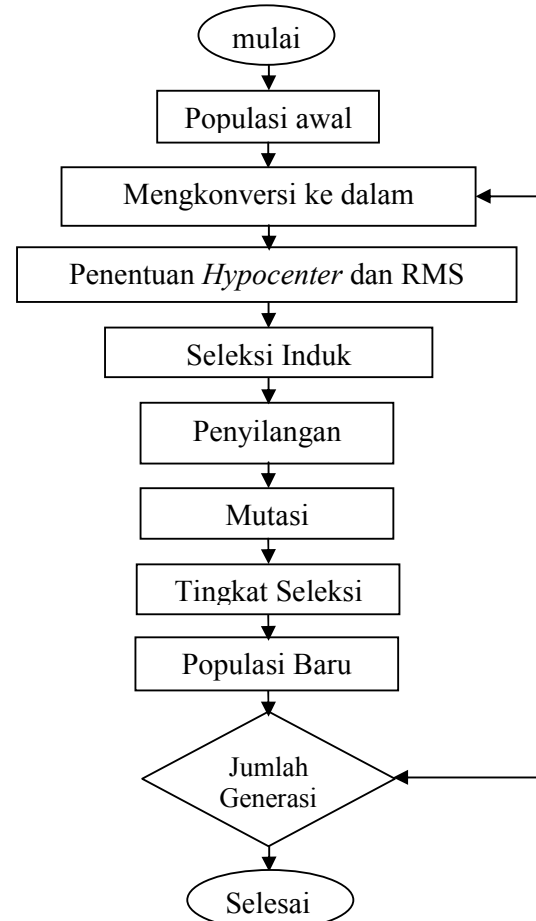
Gambar 2. Tampilan webDc

Adapun data webDc seperti pada gambar di bawah ini:

Origin Time UTC	Mag	Latitude degrees	Longitude degrees	Depth km	Region Name
2012-04-15 09:33:07	4.2	8.49 S	119.67 E	168	
2012-01-20 20:32:54	5.7	8.68 S	119.60 E	132	
2012-01-07 00:32:22	4.6	8.46 S	121.61 E	10	
2011-11-03 05:42:25	4.4	8.29 S	119.71 E	173	
2011-05-26 08:57:35	5.3	8.35 S	121.73 E	31	
2011-05-16 11:27:09	4.8	8.85 S	119.59 E	130	
2011-01-25 17:02:58	4.5	8.38 S	119.66 E	159	
2010-12-13 13:30:49	5.3	8.28 S	119.76 E	181	
2010-11-17 00:28:45	4.5	8.39 S	120.01 E	161	
2010-11-04 17:07:33	4.7	8.80 S	119.77 E	129	

Gambar 3. Data webDc

3. Flowcart Algoritma Genetika



Gambar 4. Flowchart dari Algoritma Genetika, (Afonso, 2010)

Dalam penelitian ini, metode algoritma genetika (GA) atau metode Inversi Waktu Kedatangan Gelombang P dan S digunakan untuk menentukan model 1-D dengan menggunakan program Hypo7.1. Berdasarkan penjelasan pada tinjauan pustaka, Algoritma Genetika (AG) atau Inversi Waktu Kedatangan Gelombang P dan S terdiri dari seperangkat proses yang

terinspirasi oleh ilmu biologi yaitu reproduksi, seleksi, dan mutasi untuk menghasilkan model generasi baru atau nilai yang lebih baik dari seluruh parameter yang ada. Populasi awal dipilih secara acak di ruang pencarian sehingga berevolusi untuk berkumpul ke model yang terbaik semua. Setiap model dievaluasi dengan fungsi obyektif yaitu *root mean square (rms) travel time* dari semua penentuan *hypocenter*. Model yang memiliki nilai lebih rendah dari fungsi obyektif maka itu model yang terbaik.

Langkah pertama kita mencari *rms* yang kecil dari *travel time* gelombang P dan S, dan fungsi obyektif F_0 yang diminimalkan adalah:

$$F_0(m_n) = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^{nsis} rms_i^2 N_i \right] \left[\sum_{i=1}^{nsis} N_i \right]^{-1}}$$

..... (10) (Lopes dan Marcelo, 2011)

Dimana *nsis* merupakan jumlah event gempa; N_i merupakan waktu kedatangan gelombang P dan S dari event; dan rms_i merupakan *rms travel time* dari event. Langkah selanjutnya yaitu model dipilih untuk proses *crossover* yang nantinya untuk menghasilkan keturunan. Dimana model yang sesuai untuk dipilih sebagai pasangan yaitu model yang memiliki probabilitas tinggi. Model dengan *fitness* terbaik (nilai fungsi obyektif rendah) mampu menghasilkan jumlah salinan (keturunan) maksimum 100 *sample*. Sedangkan model yang jumlah turunannya hanya satu yaitu terburuk. Disamping mengalami penyilangan, individu juga bisa mengalami mutasi dengan probabilitas kecil, ini memastikan bahwa ruang model secara keseluruhan tertutup untuk mencegah populasi berevolusi ke minimum lokal. Individu yang dihasilkan dari penyilangan dan mutasi dipilih untuk ke generasi berikutnya (*rank selection*), dengan tetap menjaga jumlah populasi misalnya 100 individu. Jadi probabilitas model yang dipilih untuk ke generasi

berikutnya tergantung pada *fitness*-nya (Afonso, 2010). Parameter yang digunakan untuk mencari model 1D adalah kecepatan gelombang P dari *upper crust* (V_1), *lower crust* (V_2), dan *upper mantle* (V_3), kedalaman *crust* dan *upper crust* (Z_c dan Z_1 secara berurutan), dan rasio V_P / V_S , dengan ruang pencarian yang terbatas pada rentang yang ditentukan sesuai dengan data *literature*, untuk menghindari ketidakrealistikan model [3].

Tabel 1. Rentang nilai model kecepatan gelombang P dan S 1-D (kecepatan dalam km/s dan kedalaman dalam km) (Lopes dan Marcelo, 2011)

Parameter	Rentang nilai
Kecepatan <i>Upper crust</i> (V_1)	5,75 - 6,50
Kecepatan <i>Lower crust</i> (V_2)	6,55 - 7,48
Kecepatan <i>Upper mantle</i> (V_3)	7,88 - 8,50
Kedalaman <i>Upper crust</i> (Z_1)	9,5 - 25,0
Kedalaman <i>Crust</i> (Z_c)	28,3 - 50,0
V_P/V_S	1,65 - 1,80

4. Pemilihan data lokal dan *filter* data

Data yang diperoleh dari catalog webDc dipilih yang gempa lokal saja yaitu gempa dengan jarak episenternya terhadap stasiun pencatat tidak melebihi dari 800 kilometer. Data yang diperoleh dari catalog webDc terdapat 51 data mulai dari tahun 2006 sampai tahun 2012 kemudian di *filter* kembali menjadi 30 data. Karena data yang jelek gelombangnya maka data tersebut tidak dipakai. Selain itu stasiun yang diperoleh dari 30 data tersebut terdapat 10 stasiun, yaitu WSI, DNP, IGBI, MMRI, KHK, SOEI, BBSI, BKSI, BASI, dan BATI.

5. *Picking* gelombang P dan S

Untuk memperoleh waktu kedatangan gelombang P, gelombang S, dan stasiun yang berada di Pulau Flores dengan langkah setelah mengakses data dari situs webDc berupa OPENSSL file kemudian diubah menjadi sebuah file dengan cara menginstal program Win32OpenSSL-1_0_1 terlebih dahulu

supaya berupa file dalam bentuk SEED. Langkah-langkah tersebut dimasukkan melalui DOS dengan perintah sebagai berikut:

```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
Microsoft Windows XP [Version 5.1.2600]
(C) Copyright 1985-2001 Microsoft Corp.

C:\Documents and Settings\ryanika>cd "My Documents"
C:\Documents and Settings\ryanika\My Documents>cd Downloads
C:\Documents and Settings\ryanika\My Documents\Downloads>cd "data dr uehdc pulau flores"
C:\Documents and Settings\ryanika\My Documents\Downloads\data dr uehdc pulau flores>cd 2006
C:\Documents and Settings\ryanika\My Documents\Downloads\data dr uehdc pulau flores>cd "2006-06-12 155642"
C:\Documents and Settings\ryanika\My Documents\Downloads\data dr uehdc pulau flores>2006-06-12 155642>openssl des-cbc -pass pass:19Nw60P6 -in 1483833.mseed -out 20060612155642.mseed
WARNING: can't open config file: C:\OpenSSL-Win32\bin\openssl.cfg
C:\Documents and Settings\ryanika\My Documents\Downloads\data dr uehdc pulau flores>2006-06-12 155642>
```

Gambar 5. Tampilan DOS untuk mengubah ke bentuk file

Maka akan berubah menjadi sebuah file seperti sebagai berikut:



Gambar 6. Tampilan bentuk file

Kemudian data berupa file ini yang dalam bentuk SEED kemudian diolah ke dalam bentuk SAC menggunakan *software* mseed2sac-1.7 dengan memasukkan direktori melalui DOS dengan perintah sebagai berikut:

```
C:/Documents and Settings\ryanika>cd
(untuk mencari letak dimana hasil bentuk zip diletakkan)
C:/Documents and Settings\ryanika>
mseed2sac-1.7.exe (spasi nama file yang sesuai dengan nama folder yang diberikan)
<enter>
```

Seperti gambar dibawah ini :

```
C:\WINDOWS\system32\cmd.exe
Microsoft Windows XP [Version 5.1.2600]
(C) Copyright 1985-2001 Microsoft Corp.

C:\Documents and Settings\ryanika>cd "My Documents"
C:\Documents and Settings\ryanika\My Documents>cd Downloads
C:\Documents and Settings\ryanika\My Documents\Downloads>cd "data dr uehdc pulau flores"
C:\Documents and Settings\ryanika\My Documents\Downloads\data dr uehdc pulau flores>cd 2006
C:\Documents and Settings\ryanika\My Documents\Downloads\data dr uehdc pulau flores>cd "2006-06-12 155642"
C:\Documents and Settings\ryanika\My Documents\Downloads\data dr uehdc pulau flores>2006-06-12 155642>mseed2sac-1.7.exe 20060612155642.mseed
Write 19592 samples to 10.DMP..BH2.D:2006.163.15.55_28.SAC
Write 17623 samples to 10.DMP..BH2.D:2006.163.15.53_35.SAC
Write 18620 samples to 10.DMP..BH2.D:2006.163.15.53_35.SAC
C:\Documents and Settings\ryanika\My Documents\Downloads\data dr uehdc pulau flores>2006-06-12 155642>
```

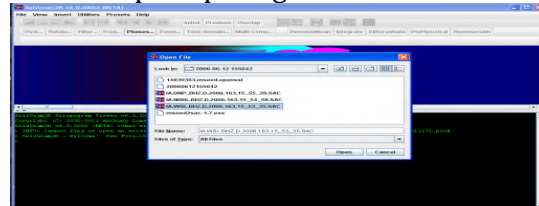
Gambar 7. Tampilan DOS untuk mengubah ke bentuk SAC

Kemudian file dalam bentuk SEED akan berubah ke dalam bentuk SAC seperti gambar dibawah ini:



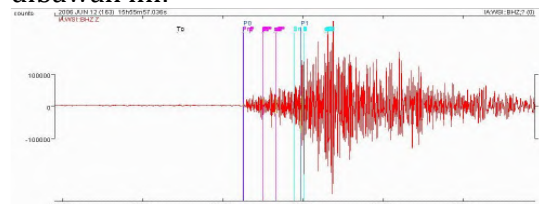
Gambar 8. Tampilan bentuk SAC

Kemudian melakukan proses *picking* dengan menggunakan *software* SeisGram2K60. Langkah pertama yang dilakukan adalah pemilihan data terlebih dahulu seperti pada gambar berikut ini:



Gambar 9. Tampilan Open file dalam SeisGram2K60

Kemudian kita *picking* gelombang P dan S menggunakan *software* SeisGram2K60. Dimana hasil keluarannya akan diperoleh waktu kedatangan gelombang P, gelombang S, dan stasiun yang berada di Pulau Flores yang akan digunakan untuk analisis dalam algoritma genetika seperti gambar dibawah ini:



Gambar 10. Tampilan proses *picking* gelombang P dan S dalam SeisGram2K60

Berdasarkan gambar 10 diatas gelombang P adalah awal dari gelombang datang sedangkan gelombang S adalah gelombang terbesar setelah gelombang datang dan sebelum gelombang permukaan.

6. Menulis data gempa seismik dalam format Hypo7.1

Setelah data terkumpul yang data lokal saja, kemudian data ditulis dalam hypo.dat yang ada di dalam program hypoGA. Parameter gempa yang ditulis

dalam hypo.dat terdiri dari nama stasiun, fase gelombang P dan S, waktu kejadian gempa (tanggal, bulan, tahun, jam, dan menit), waktu kedatangan gelombang P dan S dalam sek. Format dari hypo.dat dapat dilihat seperti dibawah ini:

WSI	060121093530.550	49.577
WSI	060424133311.700	30.227
WSI	060612155707.750	26.377
WSI	070402221119.950	38.677
DNP	080603173257.150	54.312
IGBI	080603220547.295	44.637
MMRI	080603234403.670	33.329
KHK	080804032807.350	43.024
IGBI	080902110120.575	55.549
MMRI	090130165028.070	46.696
SOEI	090212202555.270	24.679
SOEI	090327185759.670	35.043
BBSI	090603181658.450	33.673
WSI	090819144227.700	46.627
BKSI	090903090515.090	34.216
SOEI	100314224308.720	27.496
MMRI	100322063800.170	18.696
SOEI	100624175800.770	19.746
BASI	100824030658.990	17.477
BBSI	100902033910.130	29.537
BASI	100927170202.290	32.470
BATI	101012155748.188	17.997
BASI	101117092920.790	40.117
BKSI	110125170345.650	04.217
BASI	110516112741.310	00.637
SOEI	110526085822.470	52.679
BASI	111103054302.301	21.257
SOEI	120107003312.270	42.679
DNP	120120203359.238	29.047
SOEI	120415093417.970	48.079

Nama stasiun

Origin time

Waktu kedatangan gelombang P

Waktu kedatangan gelombang S

Gambar 11. Hypo.dat

Selain mengisi hypo.dat kita juga harus mengisi station.crd. Dimana terdiri dari nama stasiun yang dipilih dan lokasinya seperti gambar di bawah ini:

WSI	0940.80S	12017.52E
DNP	0840.39S	11512.35E
IGBI	0849.05S	11508.44E
MMRI	0838.09S	12214.15E
KHK	0821.51S	11536.35E
SOEI	0945.19S	12416.02E
BBSI	0529.15S	12234.13E
BKSI	0519.19S	12007.21E
BASI	1013.08S	12034.40E
BATI	1012.23S	12339.48E

Nama stasiun

Lokasi stasiun

Gambar 12. Station.crd

7. Analisis data menggunakan inversi waktu tempuh gelombang P dan S

Setelah menulis data gempa seismik dalam format Hypo7.1 kemudian kita olah dengan menggunakan *software* HypoGA CG2010. Dalam proses menjalankan HypoGA pertama setelah membuka terminal kemudian masuk ke dalam direktori dimana kita menyimpan data yang akan di jalankan dengan hypoGA seperti perintah dibawah ini: cd Documents/ → ls → cd ika → ls →

cd ga-hyo_CG2010/ → ls

Proses pertama tersebut seperti seperti pada gambar di bawah ini:

```
File Edit View Bookmarks Settings Help
siidespc@linux-qdgy:~> cd Documents/
siidespc@linux-qdgy:~/Documents> ls
devibarudata ga-hypo ika ikahasil
devihypo ga-hyponya-Esde ika data PIC hypoGAny SiiEsde
siidespc@linux-qdgy:~/Documents> cd ika
siidespc@linux-qdgy:~/Documents/ika> ls
ga-hypo_CG2010 GA_VEL_MOD.pdf
siidespc@linux-qdgy:~/Documents/ika> cd ga-hypo_CG2010/
siidespc@linux-qdgy:~/Documents/ika/ga-hypo_CG2010> ls
```

Gambar 13. Tampilan terminal

Kemudian membuka readme untuk melihat tahapan dari metode Algoritma Genetika, dengan menulis script pada lanjutan langkah sebelumnya yaitu: vi readme => klik tab, setelah itu akan muncul tampilan seperti gambar di bawah ini:

```
1) Introduction to users
2) First of all, execute the script compiler.sh
   Linux Prompt: ./script_compiler.sh
   Linux Prompt: ./script_compiler.sh
3) The script compiler.sh make two executables (that are: hypoGA and hypo_res)
   The hypo_res (compiled version of hypoGA) is used only by hypoGA
4) To test the hypoGA we put a example case. (Each case need only two input files
   that are station.crd (Station model) and hypo.dat (with P and S arrival times).
   The name of files are always the same. Because this we suggest you make a
   directory for each project. Include the files hypoGA and hypo_res in each
   directory project)
5) To a first test execute the hypoGA.
   Linux Prompt: ./hypoGA
   Use the option below:
   1) // HYPOT (Crust with two uniform layers)
   2) // Number of generations
   3) // Number of models in each generation
   4) // Crossover rate (in percentage)
   5) // Mutation rate (in percentage)
   6) // File name to save the tested models informations
   7) // File name to save the tested models informations
   Wait 1-3 minutes ... See the results in files gi and gn
   File gi: Call = generation number
           Call = new res
           Call = standard deviation
           Call = standard deviation
   File gn: Call = generation number
           Call = P (top in upper crust - km/s)
           Call = S (top in lower crust - km/s)
           Call = S (top in upper mantle - km/s)
```

Gambar 14. Tampilan readme pada terminal pertama hypoGA

Pada proses kedua kita membuka terminal baru dengan klik file => terminal, kemudian menulis script sebagai berikut:

cd Documents/ → ls → cd ika → ls →
cd ga-hyo_CG2010/ → ls → ./hypoGA

Kemudian enter, setelah itu isi populasi dan parameter sesuai dengan yang tercantum pada readme. Selesai mengisi semua tahapannya kemudian menulis script: Vi param.mod Seperti pada gambar berikut ini:

```
***** HypoGA - April/2010 *****
Alfonso E.V. Lopez & Marcilio Albuquerque
alfonso@lag.usp.br marcilio@lag.usp.br

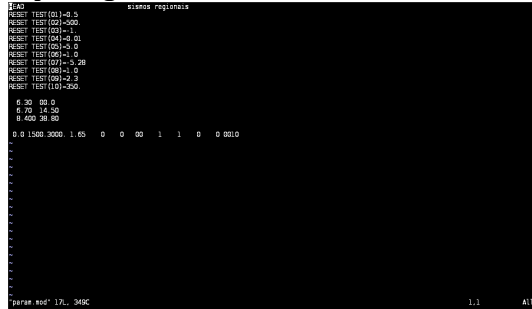
*** OBJECTIVE FUNCTION ***
Select the crustal model:
1) HYPOT (Crust with one uniform layer);
2) HYPOT2 (Crust with two uniform layers);

*** POPULATION OPTION ***
Number of generations:
> 100
Number of models in each generation:
> 50
Crossover rate (in percentage):
> 90
Mutation rate (in percentage):
> 5

*** DATA STORAGE PARAMETERS ***
File name to save the Generation Information:
> gi
File name to save the tested models informations:
> gn
File name to save the tested models informations:
Permission denied
File name to save the tested models informations:
siidespc@linux-qdgy:~/Documents/ika/ga-hyo_CG2010> vi param.mod
```

Gambar 15. Tampilan populasi dan parameter pada terminal kedua hypoGA

Setelah menulis Vi param.mod kemudian enter, maka hasilnya akan muncul yaitu berupa kecepatan dan kedalaman dari lapisan *conrad* dan *moho*, dan juga akan muncul nilai *rms*nya seperti gambar di bawah ini:



Gambar 16. Tampilan hasil hypoGA

D. Teknik Analisis Data

Dari data yang diperoleh, kita dapat mengetahui kecepatan dan kedalaman pada masing-masing lapisan yang terbaik serta nilai rms juga, dengan mengulang proses *running* sampai 10x. Setelah itu dirata-rata hasilnya. Kemudian dari hasil yang didapatkan dibuat grafik hubungan antara kedalaman dan kecepatan yang disebut model kecepatan 1-D. Dari grafik tersebut maka akan terlihat bahwa kecepatan dari setiap kedalaman berbeda-beda, karena struktur material tiap lapisan juga berbeda. Namun ketika pada lapisan yang sama kecepatannya juga sama.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Akan disajikan hasil dan pembahasan pada babIII ini dari data yang telah diperoleh dari penelitian gempa bumi yang terjadi di wilayah Pulau Flores dengan menggunakan metode inversi waktu kedatangan gelombang P dan S dalam program HypoGA. Hasil penelitian ini berupa kedalaman dan kecepatan pada masing-masing lapisan *Conrad* dan *Moho* serta model kecepatan gelombang seismik lokal 1-D. Selain itu kita juga akan mengetahui kegunaan estimasi model kecepatan lokal 1-D di Pulau Flores

dengan menggunakan metode *Inversi Waktu Kedatangan Gelombang P dan S*

A. Model Kecepatan Untuk Gelombang P 1-D

Adapun data yang dihasilkan dari proses *running* HypoGA untuk gelombang P adalah sebagai berikut :

Tabel 2. Hasil proses *running* HypoGA untuk gelombang P

No.	V1	V2	V3	Z1	Zc	Vp/Vs	rms
1	6.250	7.360	7.960	24.000	28.300	1.650	0.001
2	6.300	6.700	8.400	14.500	38.800	1.650	0.001
3	6.000	7.450	7.920	20.500	32.500	1.700	0.001
4	6.050	6.910	7.920	18.000	31.100	1.690	0.001
5	5.750	7.030	8.380	22.000	37.400	1.650	0.001
6	5.950	7.180	7.880	9.500	38.800	1.710	0.001
7	5.950	7.390	7.920	10.000	40.200	1.720	0.001
8	6.300	6.640	7.920	19.000	28.300	1.800	0.001
9	6.050	6.880	8.220	13.500	40.200	1.720	0.001
10	6.050	6.550	7.960	25.000	50.000	1.710	0.001
Rata-rata	6.065	7.009	8.048	17.600	36.560	1.700	0.001

Berdasarkan tabel 2 diatas diperoleh nilai rata-rata sebagai berikut:

$$V_1 = (6.065 \pm 0.174) \text{ km/s}$$

$$V_2 = (7.009 \pm 0.327) \text{ km/s}$$

$$V_3 = (8.048 \pm 0.203) \text{ km/s}$$

$$Z_1 = (17.600 \pm 5.532) \text{ km}$$

$$Z_c = (36.560 \pm 6.672) \text{ km}$$

$$V_p/V_s = (1.700 \pm 0.046) \text{ km/s}$$

Keterangan :

V_1 : kecepatan gelombang P pada *Upper Crust* (km/jam)

V_2 : kecepatan gelombang P pada *Lower Crust* (km/jam)

V_3 : kecepatan gelombang P pada *Upper Mantle* (km/jam)

Z_1 : kedalaman pada *Upper Crust* (km/jam)

Z_c : kedalaman pada *Crust* (km/jam)

V_p/V_s : perbandingan antara kecepatan gelombang P dan S (km/s)

Berdasarkan hasil dari proses *running* program HypoGA meliputi kecepatan gelombang P pada lapisan upper crust (V_1), kecepatan gelombang P pada lapisan lower crust (V_2), kecepatan gelombang P pada lapisan *upper mantle* (V_3), kedalaman upper crust (Z_1),

kedalaman crust (Z_c), perbandingan antara kecepatan gelombang P dan S (V_p/V_s), dan rms yang besar nilai dari masing-masing lapisan secara berturut-turut sebesar (6.065 ± 0.174) km/s, (7.009 ± 0.327) km/s, (8.048 ± 0.203) km/s, (17.600 ± 5.532) km, (36.560 ± 6.672) km, (1.700 ± 0.046) km/s dan 0.001. Nilai tersebut didapatkan dari rata-rata hasil proses *running* yang diulang sebanyak 10x dari setiap aspek dan standart deviasinya. Berdasarkan Tabel 2 ditunjukkan bahwa hasil proses *running* dari HypoGA gelombang P, data yang didapatkan mendekati stabil dari proses *running* yang pertama sampai proses *running* yang terakhir, karena ada sebagian data yang melebihi batas nilai maximum atau minimumnya, namun besar selisih tersebut sangat kecil atau kurang dari 0.5. Jadi data yang didapatkan bisa dikatakan stabil. Hal tersebut dikarenakan masih kurangnya ketelitian dalam proses *picking* data gempa untuk mendapatkan waktu kedatangan gelombang P. Di samping itu nilai rms yang didapatkan dari pengulangan pertama sampai terakhir nilainya sama dan sangat kecil sehingga data hasil program HypoGA gelombang P yang didapatkan ini mempunyai tingkat ketelitian yang besar.

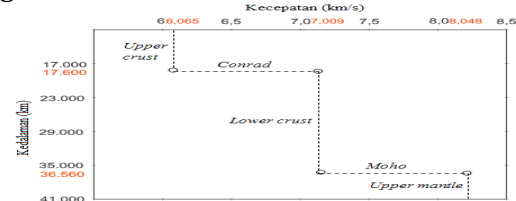
Dari hasil *running* tersebut kemudian dimodelkan dalam bentuk grafik sehingga terlihat jelas lapisannya dan kedalaman serta kecepatannya. Model kecepatan lokal gelombang P 1-D tersebut ditunjukkan pada tabel dibawah ini :

Tabel 3. Model kecepatan lokal gelombang P 1-D Wilayah Pulau Flores

Lapisan	Kedalaman (km)	Kecepatan (km/s)
Upper crust	0.000 - 17.600	(6.065 ± 0.174)
Lower crust	17.600 - 36.560	(7.009 ± 0.327)
Upper mantle	>36.560	(8.048 ± 0.203)

Berdasarkan Tabel 3 diperoleh kecepatan dan kedalaman gelombang P 1-D di pulau flores pada masing-masing lapisan yaitu lapisan *upper crust*, *lower*

crust, dan *upper mantle*. Besarnya kecepatan dan kedalaman pada lapisan *upper crust* adalah sebesar (6.065 ± 0.174) km/s yang terletak pada kedalaman 0.000km - 17.600km, pada lapisan *lower crust* pada kedalaman 17.600km - 36.560km mempunyai kecepatan sebesar (7.009 ± 0.327) km/s, dan kecepatan gelombang P pada lapisan *upper mantle* sebesar (8.048 ± 0.203) km/s dengan kedalaman di atas 36.560km. Model kecepatan gelombang P 1-D yang didapatkan terletak pada rentang nilai model kecepatan yang didukung pada hasil penelitian Lopes dan Marcelo (2011) (Tabel 3.1). Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar grafik di bawah ini :



Grafik 1. Model kecepatan gelombang P 1-D

Model kecepatan diatas adalah model kecepatan untuk gelombang P 1-D di wilayah Pulau Flores pada kerak bumi dan sebagian dari mantel atas bumi yang terletak pada kedalaman 0 km sampai 36.560km. Dari gambar tersebut (Grafik 1) kita bisa lihat secara jelas model dari kedalaman dan kecepatan gelombang P masing-masing lapisan. Di samping itu juga kita bisa mengetahui kedalaman dan kecepatan dari lapisan *conrad* dan *moho*. Kedalaman dan kecepatan pada lapisan *conrad* secara berturut-turut yaitu pada kedalaman 0.000 km - 17.600km mempunyai kecepatan (6.065 ± 0.174) km/s. Sedangkan kecepatan dan kedalaman pada lapisan *moho* secara berturut-turut sebesar (7.009 ± 0.327) km/s dan 17.600 km - 36.560 km. Kemudian perbandingan antara kecepatan gelombang P dan S adalah (1.700 ± 0.046) km/s dan rms yang didapatkan sebesar 0.001. Berdasarkan

grafik 1 menunjukkan bahwa pada tiap lapisan kecepatan dari gelombang P berbeda-beda. Semakin ke dalam kecepatan gelombang juga semakin besar. Hal ini disebabkan karena semakin ke dalam kerapatannya juga semakin besar sehingga kecepatannya besar. Sehingga secara otomatis terlihat bahwa tiap lapisan mempunyai jenis material yang berbeda-beda. Nilai *rms* yang didapatkan juga lebih kecil dibandingkan dengan penelitian sebelumnya dengan menggunakan *velest* yaitu sebesar 0.001. Hal ini menunjukkan bahwa model kecepatan gelombang P 1-D yang didapatkan mempunyai tingkat ketelitian tinggi, atau hasil yang didapatkan sudah optimum. Karena semakin minimum nilai *rms* yang didapatkan maka semakin optimum hasil yang didapatkan [3].

B. Model Kecepatan Untuk Gelombang S 1-D

Selain model kecepatan untuk gelombang P, hasil proses *running* hypoGA juga menghasilkan model kecepatan untuk gelombang S. Hasil dari model kecepatan untuk gelombang S adalah sebagai berikut:

Tabel 4 Hasil proses *running* HypoGA untuk gelombang S

No.	V1	V2	V3	Z1	Zc	Vp/Vs	rms
1	3.790	4.460	4.820	24.000	28.300	1.650	0.001
2	3.820	4.060	5.090	14.500	38.800	1.650	0.001
3	3.530	4.380	4.660	20.500	32.500	1.700	0.001
4	3.580	4.090	4.690	18.000	31.100	1.690	0.001
5	3.480	4.260	5.080	22.000	37.400	1.650	0.001
6	3.480	4.200	4.610	9.500	38.800	1.710	0.001
7	3.460	4.300	4.600	10.000	40.200	1.720	0.001
8	3.500	3.690	4.400	19.000	28.300	1.800	0.001
9	3.520	4.000	4.780	13.500	40.200	1.720	0.001
10	3.540	3.830	4.650	25.000	50.000	1.710	0.001
Rata-rata	3.570	4.127	4.738	17.600	36.560	1.700	0.001

Berdasarkan tabel 4 diatas diperoleh nilai rata-rata sebagai berikut:

$$V1=(3.570\pm 0.129) \text{ km/s}$$

$$V2=(4.127\pm 0.242) \text{ km/s}$$

$$V3=(4.738\pm 0.215) \text{ km/s}$$

$$Z1=(17.600\pm 5.532) \text{ km}$$

$$Zc=(36.560\pm 6.672) \text{ km}$$

$$Vp/Vs=(1.700\pm 0.046) \text{ km/s}$$

Keterangan:

V1 :kecepatan gelombang S pada *Upper Crust*(km/s)

V2:kecepatan gelombang S pada *Lower Crust* (km/s)

V3:kecepatan gelombang S pada *Upper Mantle*(km/s)

Z1:kedalaman pada *Upper Crust*(km)

ZC:kedalaman pada *Crust*(km)

Vp/Vs:perbandingan antara kecepatan gelombang P dan S(km/s)

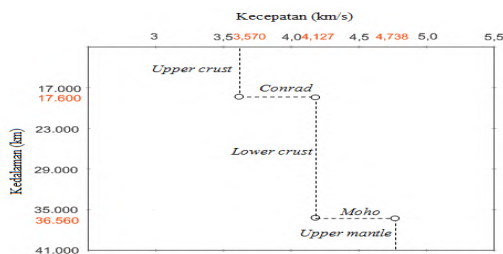
Berdasarkan hasil yang di dapatkan dari proses *running* program HypoGA gelombang S meliputi kecepatan gelombang S pada lapisan *Upper Crust* (V1), kecepatan gelombang S pada lapisan *lower crust* (V2), kecepatan gelombang S pada lapisan *upper mantle* (V3), kedalaman upper crust (Z1), Kedalaman crust (Zc), perbandingan antara kecepatan gelombang P dan S (Vp/Vs), dan *rms* yang nilainya masing-masing lapisan berturut-turut sebesar (3.570± 0.129) km/s, (4.127± 0.242) km/s, (4.738± 0.215) km/s, (17.600± 5.532) km, (36.560± 6.672) km, (1.700± 0.046) km/s dan 0.001. Sama halnya dengan gelombang P, pada gelombang S nilai tersebut didapatkan dari rata-rata hasil proses *running* yang diulang sebanyak 10x dan nilai standart deviasinya dari setiap aspek. Berdasarkan tabel 4 ditunjukkan bahwa hasil proses *running* hypoGA untuk gelombang S, parameter yang didapatkan sama dengan gelombang P yaitu kedalaman dan kecepatan pada lapisan *upper crust*, *lower crust*, *upper mantle*, dan perbandingan antara kecepatan gelombang P dan S serta *rmsnya*. Namun dari kedua hasil *running* tersebut yang membedakan adalah besar kecepatannya . Gelombang S mempunyai kecepatan yang lebih kecil dari gelombang P dalam

perambatannya dengan mediumnya sama. Hasil yang didapatkan dari *running* program HypoGA untuk gelombang S juga mendekati stabil karena masih ada sebagian data yang melebihi batas maximum atau minimumnya namun besar selisih tersebut kecil. Sama seperti hasil gelombang P yang tercantum pada penjelasan diatas tadi, hal tersebut dikarenakan oleh proses *picking* data gempa untuk mendapatkan nilai waktu kedatangan gelombang S. Nilai *rms* yang didapatkan juga sama yaitu dari pertama sampai terakhir nilai sebesar 0.001 sama halnya dengan gelombang P, dari hasil *running* tersebut kita modelkan kedalaman dan kecepatan dalam bentuk grafik, yang terlebih dahulu ditulis dalam tabel dibawah ini:

Tabel 5. Model kecepatan lokal gelombang S 1-D wiliyah Pulau Flores

Lapisan	Kedalaman(km)	kecepatan(km/s)
Upper crust	0.000 - 17.600	(3.570 ± 0.129)
Lower crust	17.600 - 36.560	(4.127 ± 0.242)
Upper mantle	>36.560	(4.738 ± 0.215)

Model kecepatan gelombang S 1-D meliputi lapisan *upper crust* dengan kedalaman 0.000 km - 17.600 km mempunyai kecepatan (3.570 ± 0.129) km/s, lapisan *lower crust* pada kedalaman 17.600 km - 36.560 km kecepatannya sebesar (4.127 ± 0.242) km/s, dan kedalaman lapisan *upper mantle* di atas 36.560 km kecepatannya (4.738 ± 0.215) km/s. Untuk lebih jelasnya dapat dilihat pada gambar grafik di bawah ini :



Grafik 2 Grafik model kecepatan gelombang S1-D

Model kecepatan diatas adalah model kecepatan untuk gelombang S 1-D pada kerak bumi dan sebagian dari

mantle atas bumi yang terletak pada kedalaman 0 km sampai 36.560 km. Sama seperti model kecepatan gelombang P, antara lapisan *upper crust* dan *lower crust* terdapat batas *conrad*, sedangkan batas *lower crust* dengan *upper mantle* adalah *moho*, yang kedalaman dan kecepatannya masing-masing berbeda. Kecepatan dan kedalaman pada lapisan *conrad* secara berturut-turut sebesar (3.570 ± 0.129) km/s pada kedalaman 0.000 km - 17.600 km, sedangkan kecepatan dan kedalaman pada lapisan *moho* secara berturut-turut (4.127 ± 0.242) km/s dengan kedalaman 17.600 km - 36.560 km. Perbandingan V_p/V_s nilainya sama seperti pada model kecepatan gelombang P yaitu (1.700 ± 0.046) km/s dan *rms* yang didapatkan sebesar 0.001

Pada grafik 2 menunjukkan bahwa pada tiap lapisan kecepatan dari gelombang S juga berbeda-beda. Semakin dalam kecepatan gelombang semakin besar. Hal ini disebabkan karena semakin ke dalam kerapatan juga semakin besar sehingga kecepatannya besar. Sehingga secara otomatis terlihat bahwa tiap lapisan jenis material yang dilewati gelombang S juga berbeda-beda. Tidak beda dengan model kecepatan gelombang P, nilai *rms* yang didapatkan oleh model kecepatan lebih kecil dari hasil yang didapatkan pada program *velest 3.3* yaitu sebesar 0.001. Hal ini menunjukkan bahwa model kecepatan gelombang S 1-D yang didapatkan sudah optimum. Berdasarkan model kecepatan yang didapatkan pada tabel 3 dan pada tabel 5, model kecepatan gelombang P berbeda dengan model kecepatan gelombang S. Kedua model tersebut, pada kedalaman yang sama mempunyai kecepatan yang berbeda-beda. Gelombang S mempunyai kecepatan menjalar kurang dari kecepatan gelombang P pada medium yang sama. Namun kalau dilihat dari polanya, Kedua model tersebut sama yaitu sama-sama

menghasilkan 3 lapisan yaitu permukaan, *conrad* dan *moho*. Hal ini sudah sesuai dengan teori bahwa gelombang P mempunyai kecepatan paling tinggi diantara gelombang yang lain salah satunya adalah gelombang S, dalam hal perambatan tapi merambat pada medium yang sama [4]. Hal ini menunjukkan semakin kedalam semakin cepat karena dari lapisan *upper crust* sampai *upper mantle* semakin kebawah lapisan penyusun bumi akan semakin rapat. Dari hasil penelitian diketahui bahwa karakteristik rambat gelombang pada daerah lapisan bumi seperti *upper crust*, *lower crust*, dan *upper mantle* keadaan kecepatan tetap kedalaman berubah sedangkan pada daerah batasan seperti *conrad* dan *moho* karakteristik rambat gelombang kecepatannya berubah dengan kondisi kedalaman yang sama.

Kegunaan estimasi model kecepatan lokal 1-D di Pulau Flores dengan menggunakan metode *Inversi Waktu Kedatangan Gelombang P dan S* adalah untuk mitigasi bencana gempa bumi dengan menganalisis data waktu tiba gelombang P dan S pada stasiun seismik lokal menggunakan metode inversi waktu kedatangan gelombang P dan S. Model kecepatan tersebut untuk menentukan keakuratan dari *hypocenternya* sehingga nanti bisa untuk mitigasi bencananya.

IV. PENUTUP

Berdasarkan hasil penelitian gempa bumi di wilayah Pulau Flores, dikemukakan kesimpulan dan saran sebagai berikut:

A. Simpulan

1. Estimasi model kecepatan lokal gelombang seismik 1-D di wilayah Pulau Flores menggunakan metode inversi waktu kedatangan gelombang P dan S, menghasilkan model kecepatan lokal gelombang P dan S 1-D. Kedua model

tersebut mempunyai pola yang berbeda namun masing-masing model terdiri dari lapisan yang sama. Lapisan tersebut adalah permukaan, *upper crust*, *lower crust*, dan *upper mantle*. Lapisan *upper crust* dan *lower crust* dibatasi oleh lapisan *conrad*, sedangkan antara lapisan *lower crust* dan *upper mantle* dibatasi oleh lapisan *moho*. Di samping itu model kecepatan gelombang yang dihasilkan mempunyai nilai *rms* yang kecil adalah sebesar 0.001.

2. Model kecepatan lokal gelombang P dan S mempunyai kedalaman yang sama yaitu pada lapisan *conrad* dan *moho* yang besarnya secara berturut-turut adalah 0.000 km - 17.600 km dan 17.600 km - 36.560 km. Sedangkan besar kecepatan kedua model berbeda. Model kecepatan gelombang P pada lapisan *conrad* mempunyai kecepatan sebesar (6.065 ± 0.174) km/s, sedangkan pada lapisan *moho* sebesar (7.009 ± 0.327) km/s. Kemudian model kecepatan gelombang S pada lapisan *conrad* mempunyai kecepatan (3.570 ± 0.129) km/s, sedangkan pada lapisan *moho* sebesar (4.127 ± 0.242) km/s.

3. Kegunaan estimasi model kecepatan lokal 1-D di Pulau Flores dengan menggunakan metode *Inversi Waktu Kedatangan Gelombang P dan S* adalah untuk mitigasi bencana gempa bumi dengan menganalisis data waktu tiba gelombang P dan S pada stasiun seismik lokal menggunakan metode inversi waktu kedatangan gelombang P dan S. Model kecepatan tersebut untuk menentukan keakuratan dari *hypocenternya* sehingga nanti bisa untuk mitigasi bencananya.

B. Saran

Adapun saran untuk penelitian ini adalah:

1. Diharapkan pada penelitian selanjutnya untuk proses *picking* data dilakukan secara otomatis sehingga waktu kedatangan gelombang P dan S

- didapatkan nilai yang bagus maka hasil yang diperoleh dapat lebih teliti lagi.
2. Diharapkan pada penelitian selanjutnya untuk hasil yang didapatkan dari proses *running* pada program HypoGA terutama untuk gelombang S akan lebih stabil lagi supaya tidak ada data yang melebihi batas maximum atau minimumnya dan akan diperoleh nilai *rms* yang lebih teliti lagi.
 3. Diharapkan pada penelitian selanjutnya untuk model kecepatan gelombang P dan S dapat dikerjakan secara 2-D maupun 3-D jadi tidak hanya secara 1-D saja.

UCAPAN TERIMA KASIH

Puji syukur kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat dan karunia-NYA kepada penulis, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang berjudul "Estimasi Model Kecepatan Lokal 1-D Di Pulau Flores Menggunakan Metode Inversi Waktu Kedatangan Gelombang P dan S" ini dengan baik. Keberhasilan dalam penulisan skripsi ini tentunya tidak lepas dari berbagai pihak, untuk itu penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Prof. Dr. Suyono, M.Pd selaku Dekan FMIPA Universitas Negeri Surabaya.
2. Dr. Madlazim, M.Si, selaku Dosen Pembimbing skripsi yang telah memberikan bimbingan, arahan dan saran serta selaku ketua Jurusan Fisika Universitas Negeri Surabaya.
3. Dzulkifli, S.Si. M.T., dan Drs Supardiyono, M.Si selaku Dosen Penguji skripsi yang telah memberikan saran yang membangun.
4. Seluruh Bapak dan Ibu dosen jurusan Fisika FMIPA UNESA yang telah dengan sabar mendidik dan memberikan ilmu pengetahuan yang berlimpah kepada peneliti.

5. Orang tua dan keluarga yang telah mencurahkan kasih sayang dan tidak putus-putusnya mendoakan serta memberi motivasi sejak kecil hingga saat ini.
6. Seluruh teman-teman Fisika Reguler 2008, banyak kenangan yang tak bisa terlupakan bersama kalian dan juga teman-teman seperjuangan "Skripsi" (Helvin, Devi, April, Budi, Rendra, Rizky dan Sulton). Serta teman-teman lainnya yang selalu mendukung.
7. Serta semua pihak yang ikut serta mendukung dalam pengerjaan skripsi ini yang tidak bisa disebutkan satu persatu.

Semoga amal baik yang diberikan kepada peneliti mendapat balasan dari Allah SWT. Penulisan skripsi ini masih jauh dari sempurna, oleh karena itu saran dan kritik yang membangun sangat diharapkan guna kesempurnaan skripsi ini. Besar harapan peneliti, jika skripsi ini dapat memberikan manfaat kepada kita semua baik saat ini maupun dimasa mendatang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Gempa Bumi. (online) (<http://www.gempabumi.bmkg.co.id/>) diakses pada tanggal 2 April 2012).
- [2] Silver, E.A., D. Reed., McCaffrey., and Y. Joyodiwiryo, 1983, Back arc thrusting in the Sulu arc, Indonesia, A consequence of arc-continent collision. *Jour. Geophys. Res.*, vol. 84, B9, 7429-798. Diakses pada 7 Februari 2012.
- [3] Lopes, Afonso. E. de Vasconcelos. 2010. *Genetic Algorithm Inversion of the Average 1D Crustal Structure Using Local and Regional Earthquakes*. Brazil : IAG-USP.
- [4] Rozaq, Aunur. 2011. *Penentuan Parameter Gempa Bumi di Daerah Blitar dan Madiun dengan Menggunakan TDS (Time Digital Seismograph) Tipe 303 Q (Laporan PKL yang tidak dipublikasikan)*. Malang: UNIBRAW.