PENCITRAAN TOMOGRAFI SEISMIK 3D BAWAH PERMUKAAN WILAYAH TAIWAN

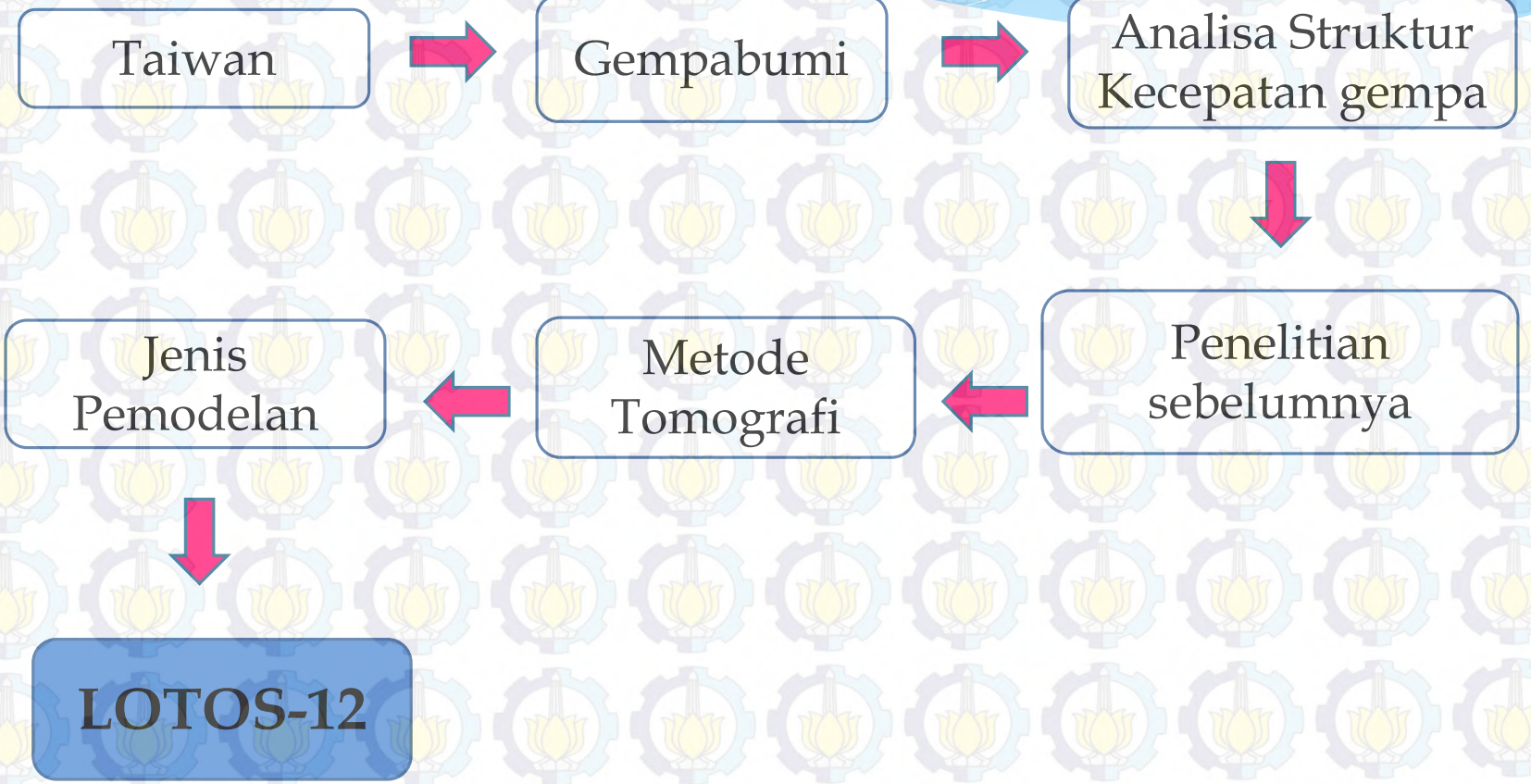
Susi Anggraini Diah Ningrum
NRP. 1113201028

Dosen Pembimbing
Prof. Dr. rer-nat. Bagus Jaya Santosa, S.U.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN GEOFISIKA JURUSAN FISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2015

PENDAHULUAN

- **Latar Belakang**



PENDAHULUAN

* Penelitian Sebelumnya

1. Rau, R. J., dan Wu, F. T. (1995), "Tomographic imaging of lithospheric structures under Taiwan
2. Wu, Y.-M., C.-H. Chang, L. Zhao, J. B. H. Shyu, Y.-G. Chen, K. Sieh, dan J.-P. Avouac (2007), "Seismic tomography of Taiwan: Improved constraints from a dense network of strong motion stations
3. Liao, Y. C., S. K. Hsu, C. H. Chang, W. B. Doo, M. Y. Ho, C. L. Lo, and C. S. Lee (2008), "Seismic tomography off SW Taiwan: A joint inversion from OBS and onshore data of 2006 Pingtung aftershocks

PENDAHULUAN

Tujuan

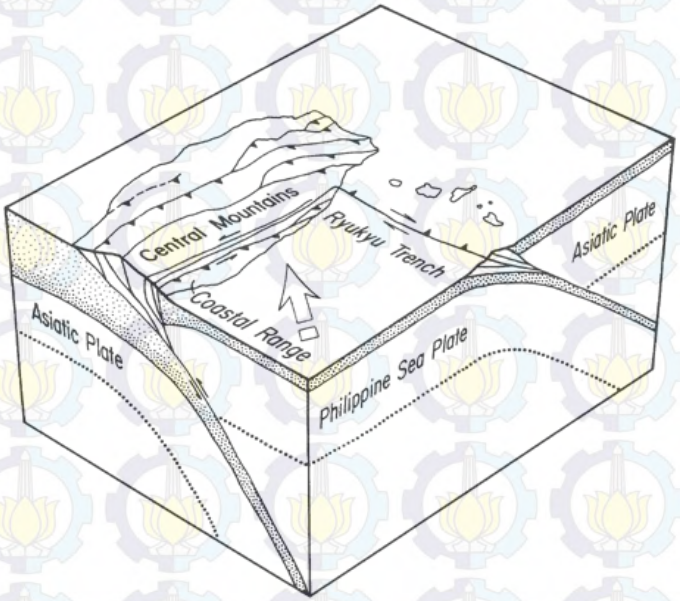
Mendapatkan pencitraan distribusi anomali kecepatan gelombang P (Vp), kecepatan gelombang S (Vs), rasio Vp/Vs yang dihasilkan dengan metode inversi tomografi.

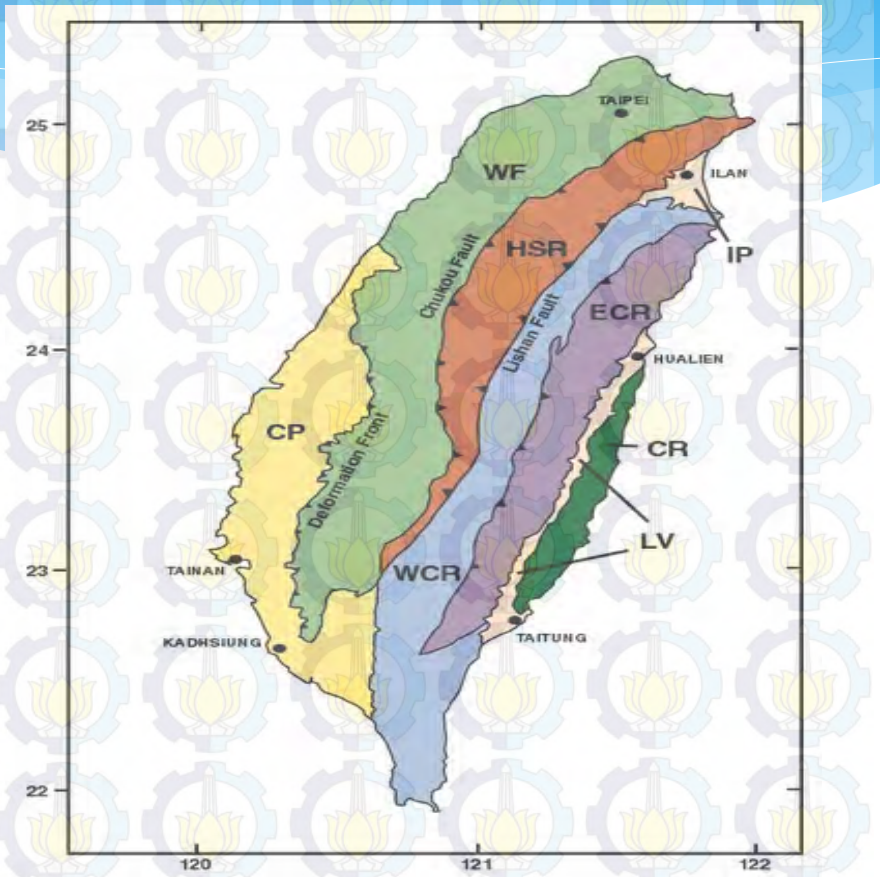
Batasan Masalah

* Data yang digunakan dalam penelitian adalah data katalog IRIS di Taiwan dengan periode 2009 – 2010.
* Pengolahan data awal untuk menentukan waktu tiba gelombang P dan S dilakukan dengan menggunakan *software* SiesGram2K60.
* Proses inversi tomografi menggunakan *Local Tomography Software* (LOTOS-12).

TINJAUAN PUSTAKA

* **Struktur Geologi Taiwan**





Pembagian daerah geologi di Taiwan serta patahan yang memisahkannya. CP = Coastal Plain; WF = Western Foothills; HSR = Hsuehshan Range; WCR = Western Central Range; ECR = Eastern Central Range; LV = Longitudinal Valley; CR = Coastal Range; IP = Ilan Plane (http://www.geo.arizona.edu/~anderson/taiwan/intro.html).

TINJAUAN PUSTAKA

* Gelombang Seismik

Gelombang Seismik

Gelombang Badan

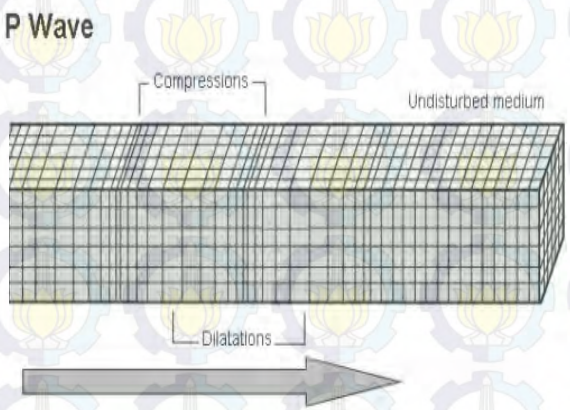
- Gelombang P
- Gelombang S

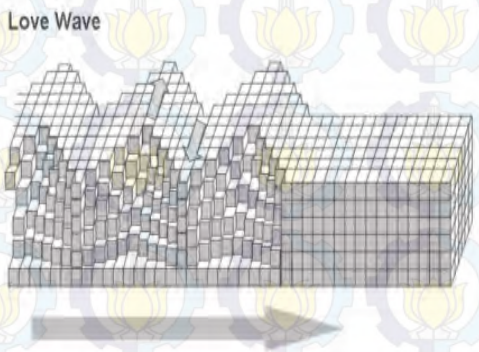
$$V_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}} \quad (2.1)$$

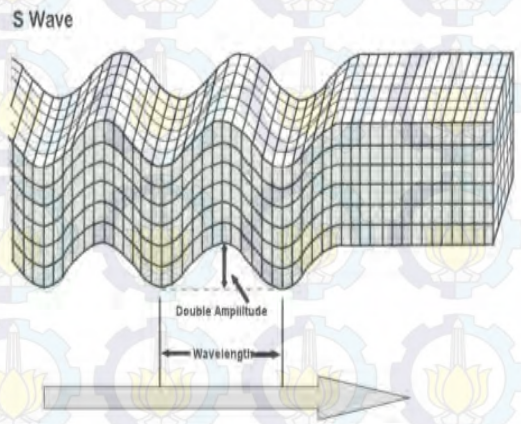
$$V_s = \sqrt{\frac{\lambda}{\rho}} \quad (2.2)$$

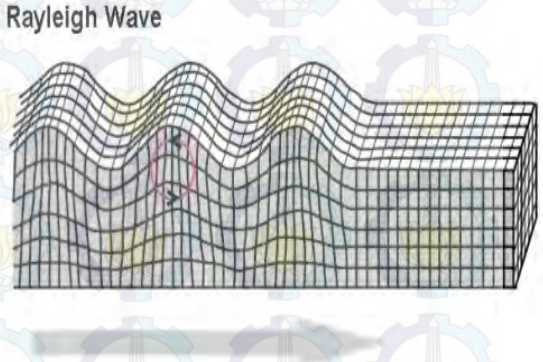
Gelombang Permukaan

- Gelombang *Rayleigh*
- Gelombang *Love*









TINJAUAN PUSTAKA

* **Hubungan Sifat Batuan dengan Kecepatan Gelombang P dan S**

- **Sifat Fisis**

1. Densitas (ρ)
2. Porositas
3. Saturasi

Semakin tinggi porositas batuan, maka kecepatan gelombang P (Vp) dan S (Vs) akan berkurang. Menurut Manzella (1990), batuan yang terisi oleh fluida akan menyebabkan penurunan nilai kecepatan gelombang P dan penurunan secara signifikan nilai kecepatan gelombang S.

- **Sifat Mekanik**

1. Modulus geser (μ)
2. Modulus Young (E)
3. Modulus Bulk (K)

Kecepatan gelombang P (Vp) dan S (Vs) bergantung pada modulus geser (μ). Kecepatan gelombang P (Vp) juga bergantung pada modulus Bulk, sedangkan kecepatan gelombang S (Vs) tidak bergantung pada modulus Bulk.

TINJAUAN PUSTAKA

* **Relokasi Hiposenter**
* Hiposenter adalah lokasi sumber gempabumi yang dinyatakan dengan posisi *longitude*, *latitude*, dan kedalaman. Pada penelitian ini metode yang akan digunakan adalah *Single Event Determination* (SED).

$$J\Delta m = \Delta d$$
$$[J]^T[J]\Delta m = [J]^T\Delta d$$
$$\Delta m = [J^T J]^{-1}[J]^T\Delta d$$

Dengan J adalah matriks Jacobian, berisi derivatif parsial residual waktu tempuh tiap stasiun terhadap parameter hiposenter dengan ukuran n x 4, dimana n adalah jumlah stasiun dan 4 merupakan representasi jumlah parameter hiposenter yang dicari. Matriks Δm merupakan model yang dicari yang berisi posisi hiposenter dan waktu terjadinya gempa dengan ukuran 4 x 1. Sedangkan matriks Δd merupakan waktu tempuh gelombang berdasarkan data pengamatan dengan ukuran n x 1.

TINJAUAN PUSTAKA

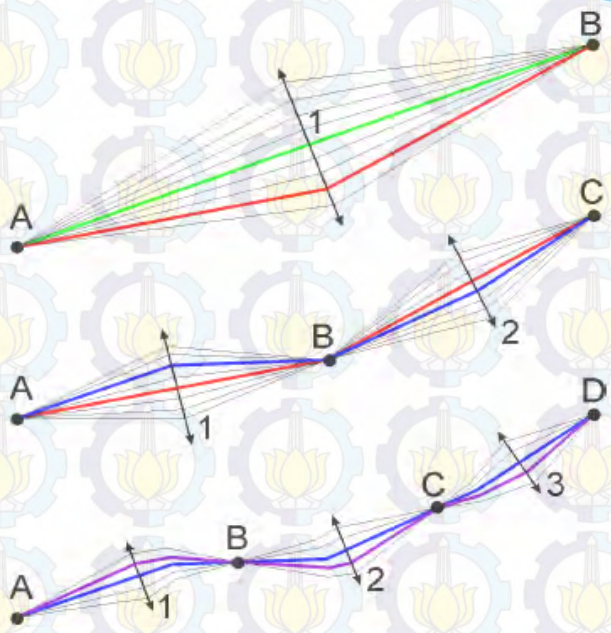
Local Tomography Software

Beberapa kelebihan LOTOS-12 dengan LOTOS versi sebelumnya adalah sebagai berikut:

- Selain inversi untuk Vp dan Vs, LOTOS-12 juga mampu untuk melakukan inversi Vp-Vp/Vs.
- Gambar hasil inversi dapat disajikan dalam format PNG *bitmap* tanpa menggunakan bantuan perangkat grafis lainnya.
- Struktur *file* dan program menjadi lebih sederhana.
- Terdapat beberapa contoh berbeda yang dapat digunakan untuk mengkonstruksi model baru.
- Terdapat beberapa panduan yang sangat membantu dalam proses pengkodean menggunakan *software* ini.
- Terdapat perangkat untuk simulasi data buatan yang dapat digunakan untuk merencanakan *network deploying* (Kaulakov, 2009).

TINJAUAN PUSTAKA

Local Tomography Software



ray tracing (Kaulakov, 2009)

Salah satu keistimewaan dari LOTOS-12 adalah algoritma *ray tracing* yang didasarkan pada prinsip Fermat

Ray tracing merupakan perunutan lintasan sinar (*ray path*) antara sumber gempa dengan stasiun penerima.

Keunggulan dari metoda *ray tracing* adalah waktu komputasi untuk perhitungan waktu tempuh dan lintasan sinar gelombang relatif cepat.

$$t = \int_A^B \frac{1}{V} dl = \int_{sumber}^{penerima} \frac{1}{V} dl$$

$$t = \sum S_f dl_f$$

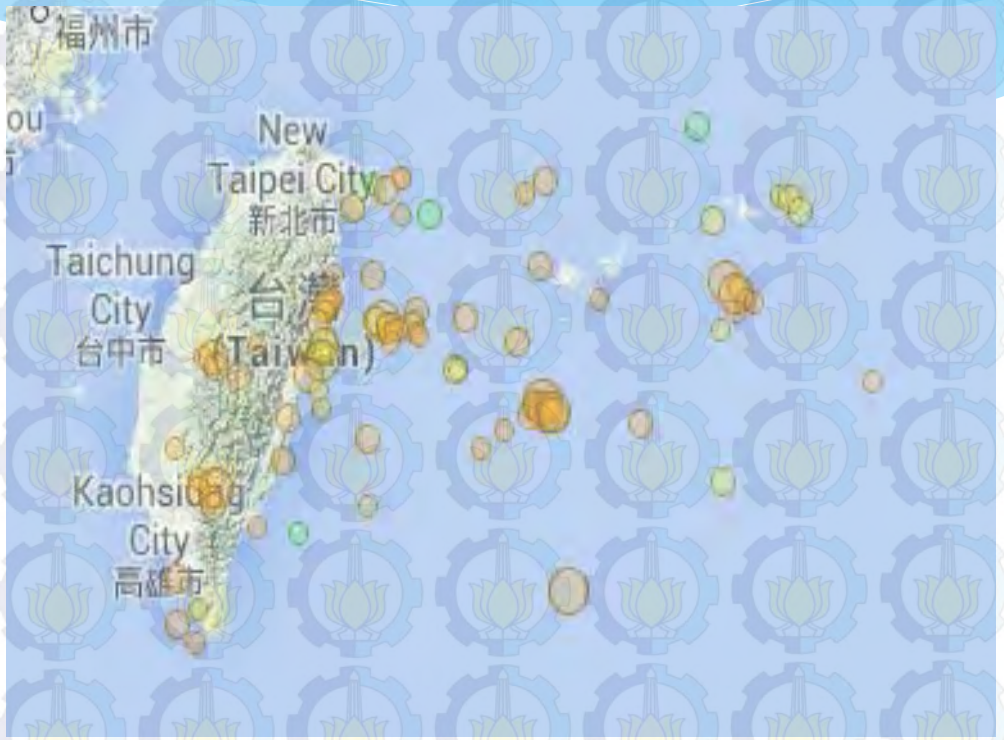
METODOLOGI PENELITIAN

* **Alat**

1. TauP-2.1.1
2. SeisGram2K60
3. Hypo71
4. LOTOS-12

* **Data**

Sebaran Stasiun Pencatat Gempa

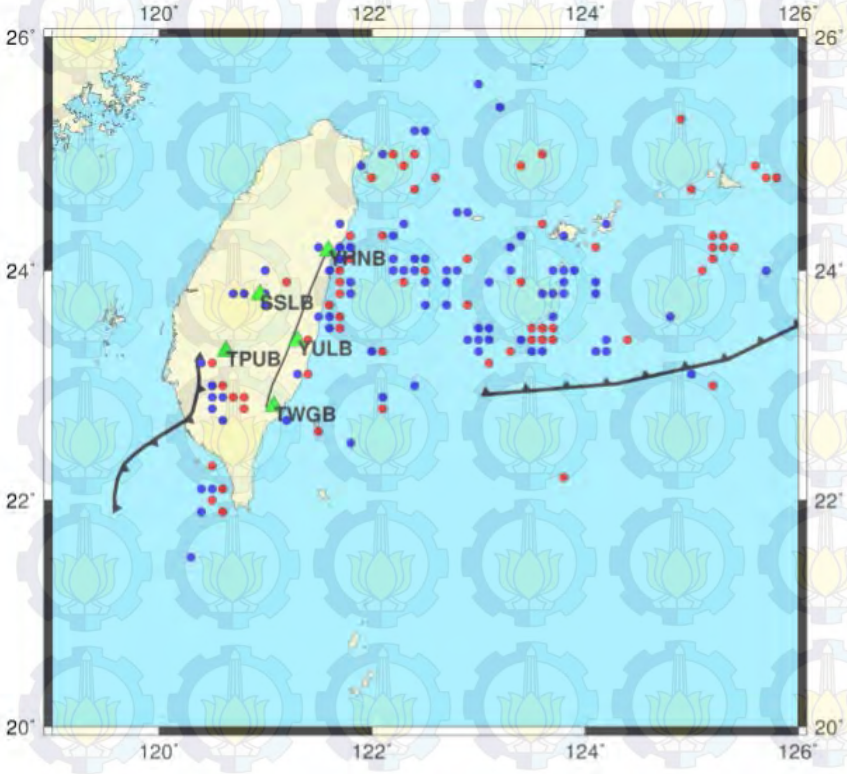


Sebaran Kejadian Gempa

PROSEDUR PENELITIAN

HASIL DAN PEMBAHASAN

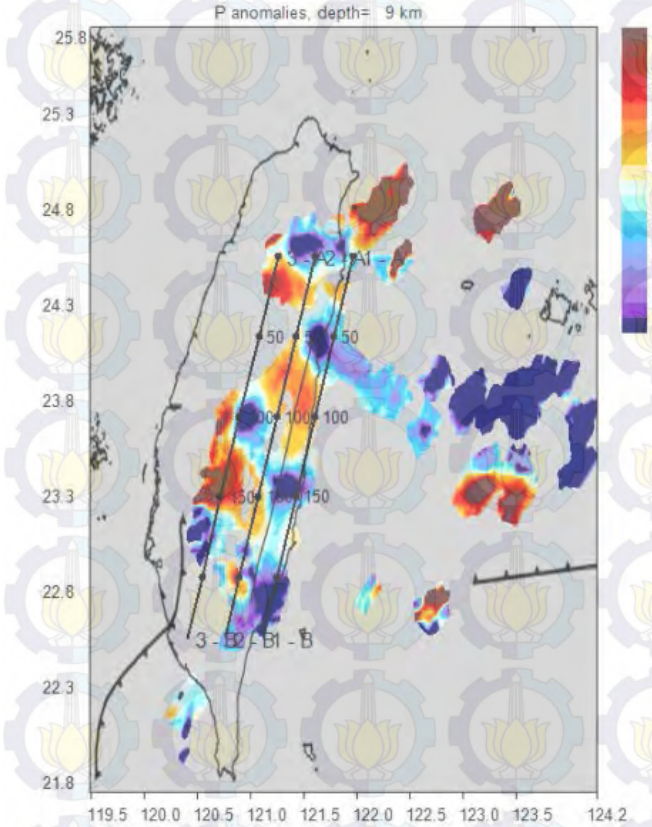
Relokasi Hiposenter

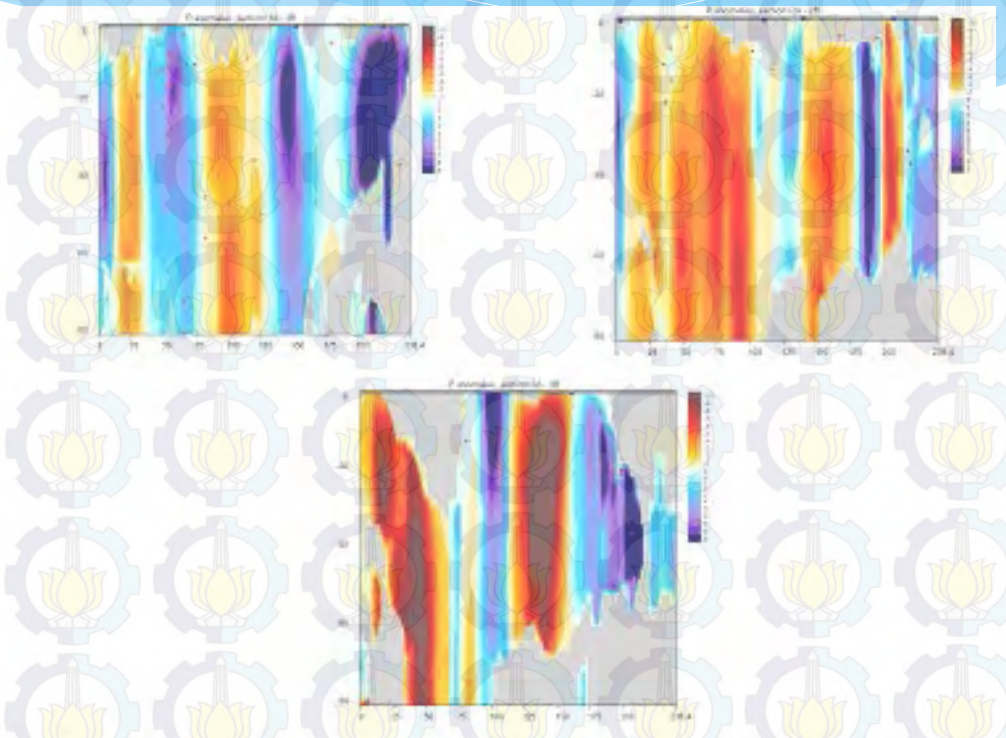


Sebagian gempa hasil relokasi berada di sepanjang Palung Ryuku dan Palung Manila, serta di daerah patahan aktif yang berada di pulau utama Taiwan. Gempa di wilayah timur Taiwan di sepanjang Palung Ryuku disebabkan Lempeng Laut Filipina menumbuk kearah utara di bawah Lempeng Eurasia. Sedangkan di wilayah barat daya, tingkat seismisitas dipengaruhi oleh Lempeng Eurasia yang menumbuk sepanjang Palung Manila di bawah Lempeng Laut Filipina. Sedangkan gempa yang terjadi di pulau utama Taiwan disebabkan adanya dua patahan aktif yaitu Patahan Lishan dan Lichi Melange yang terdapat di Longitudinal Valley. Patahan Lishan terletak diantara Hsuehshan Range dan Central Range yang termasuk dalam jenis patahan normal. Lichi Melange merupakan bagian dari subduksi komplek di sisi barat bekas busur gunung api dari subduksi Laut Cina Selatan.

Hasil ini sesuai dengan penelitian Zhuang et al yang menyatakan bahwa zona yang memiliki tingkat seismisitas tinggi merupakan zona dengan akumulasi *stress* tinggi pada batas tektonik, seperti zona patahan pada bagian timur Longitudinal Valley dan wilayah utara Palung Ryuku, yang membentang di batas Lempeng Eurasia dan menumbuk Lempeng Laut Filipina.

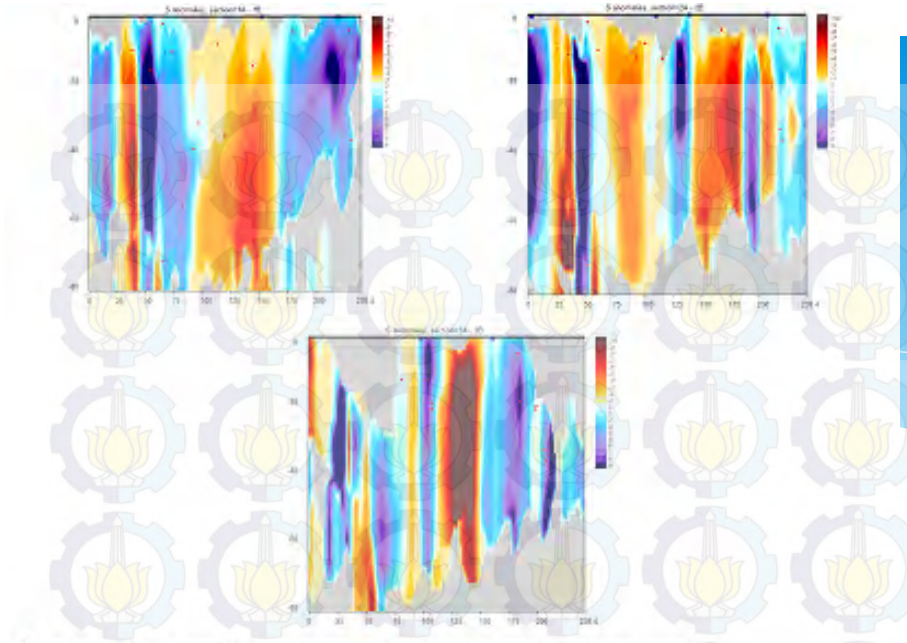
HASIL DAN PEMBAHASAN



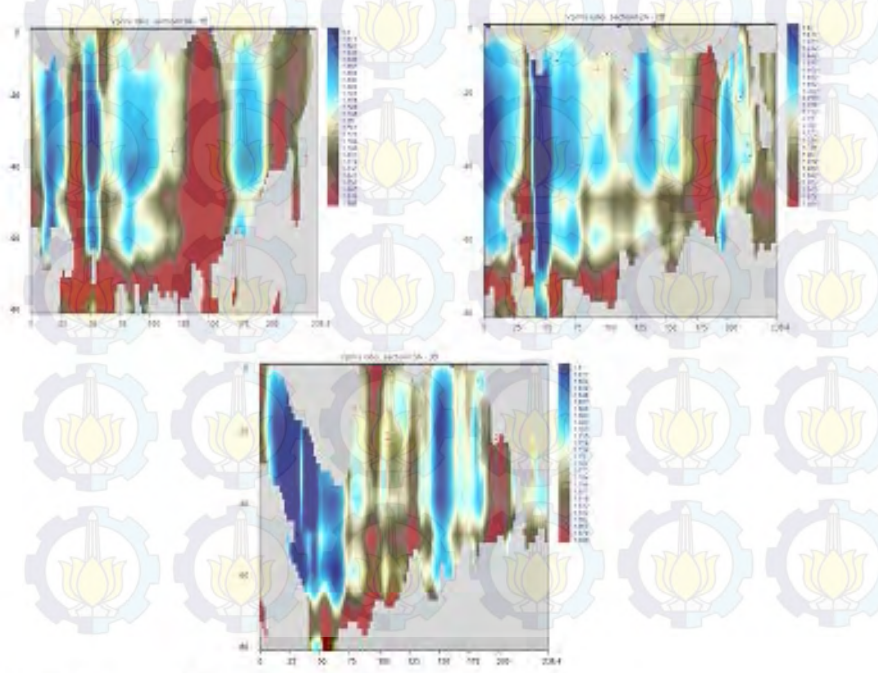


Gambar 4.6 Anomali kecepatan gelombang P pada sayatan vertikal

Profil sayatan 1A – 1B melewati Coastal Range dan Taiwan bagian timur. Pada Gambar 4.6 dan 4.7 terlihat adanya anomali negatif pada sayatan Vp dan Vs serta pada Gambar 4.8 terlihat adanya nilai Vp/Vs tinggi. Nilai Vp dan Vs rendah serta Vp/Vs tinggi ini berhubungan dengan batuan afinitas busur Luzon, yaitu batuan vulkanik dan banyaknya jumlah batuan sedimen muda di Coastal Range. Struktur Vp/Vs tinggi juga mengindikasikan adanya zona patahan dan merefleksikan keberadaan fluida (Wu et al, 2007). Anomali negatif lebih mencerminkan daerah lemah yang biasanya diduga berkaitan langsung dengan peningkatan fluida dan pelelehan slab subduksi yang disebabkan fase transisi (Suantika, 2009). Dari Gambar 4.6 dan 4.7 terlihat bahwa di Taiwan bagian timur didominasi oleh anomali Vp dan Vs positif. Anomali positif ini menunjukkan batas barat dari Lempeng Laut Filipina, dengan Longitudinal Valley sebagai daerah penghubung. Sisi timur dari Longitudinal Valley merupakan zona yang memiliki anomali Vp positif dan Vp/Vs tinggi dengan seismisitas yang tinggi (Wu et al, 2007). Kontras nilai kecepatan absolut gelombang P yang ditunjukkan oleh Gambar 4.9 menguatkan dugaan bahwa lapisan Moho di Coastal Range berada di kedalaman antara 34-43 km, dengan kecepatan Moho sebesar 8,52 km/s (Ma dan Song, 1997). Karena gelombang S memiliki resolusi yang kurang bagus, maka citra distribusi anomali kecepatan absolut gelombang P dan gelombang S cukup sulit untuk dibandingkan.

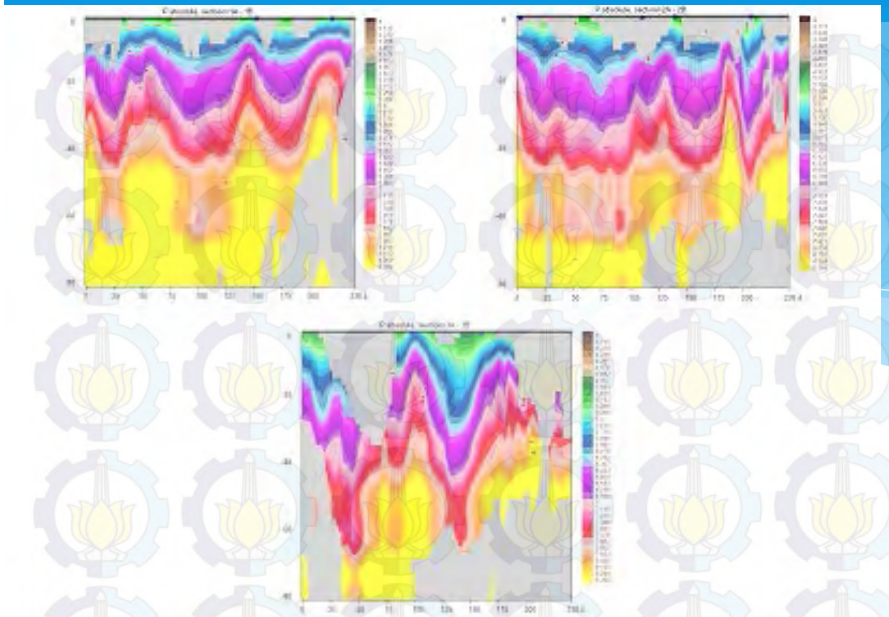


Gambar 4.7 Anomali kecepatan gelombang S pada sayatan vertikal

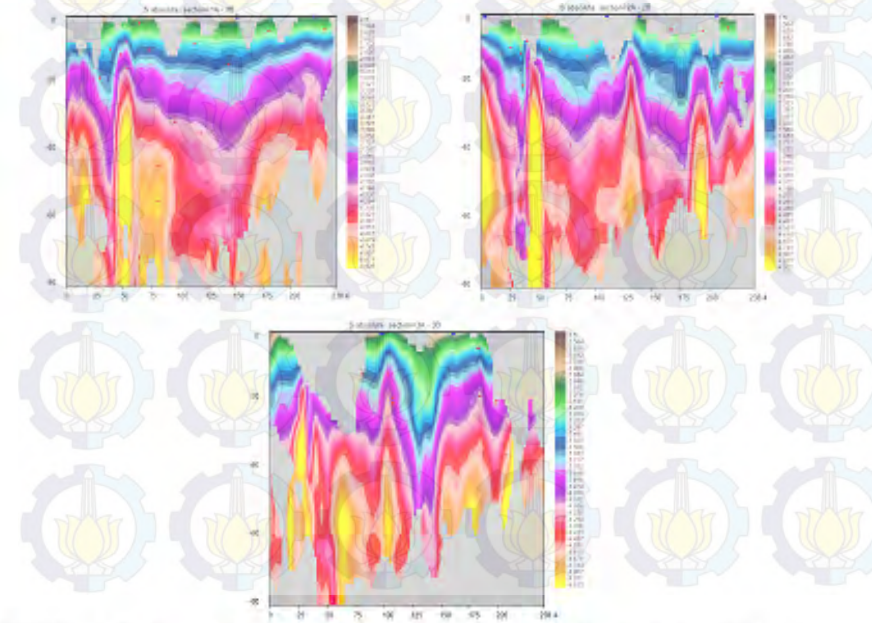


Gambar 4.8 Anomali rasio Vp/Vs pada sayatan vertikal

Profil sayatan 2A – 2B melewati Central Range. Gambar 4.9 menampilkan kontras kecepatan gelombang P yang jelas terlihat di bawah kedalaman 20 km, hal ini menguatkan dugaan bahwa di Central Range lapisan Moho berada pada kedalaman 20 km dan terus turun hingga kedalaman 60 km (Yeh et al, 1998; Kim et al, 2005; Wu et al, 2007). Hal ini menunjukkan adanya penebalan kerak di Central Range (Rau et al, 1995; Wu et al, 2007). Pada Gambar 4.6 dan 4.7 terlihat adanya anomali negatif serta tingkat seismisitas yang cukup tinggi, hal ini berhubungan dengan zona patahan aktif yang berada di batas barat Central Range, yaitu Patahan Lishan yang termasuk dalam jenis patahan normal. Anomali negatif ini juga mungkin dihasilkan dari intrusi panas dari mantel samudera atas dari Lempeng Laut Filipina (Ma et al, 1996). Struktur Vp/Vs rendah seperti yang tampak pada Gambar 4.8 mengindiksikan bahwa dasar dari Central Range tersusun atas batuan granit (Wu et al, 2007).

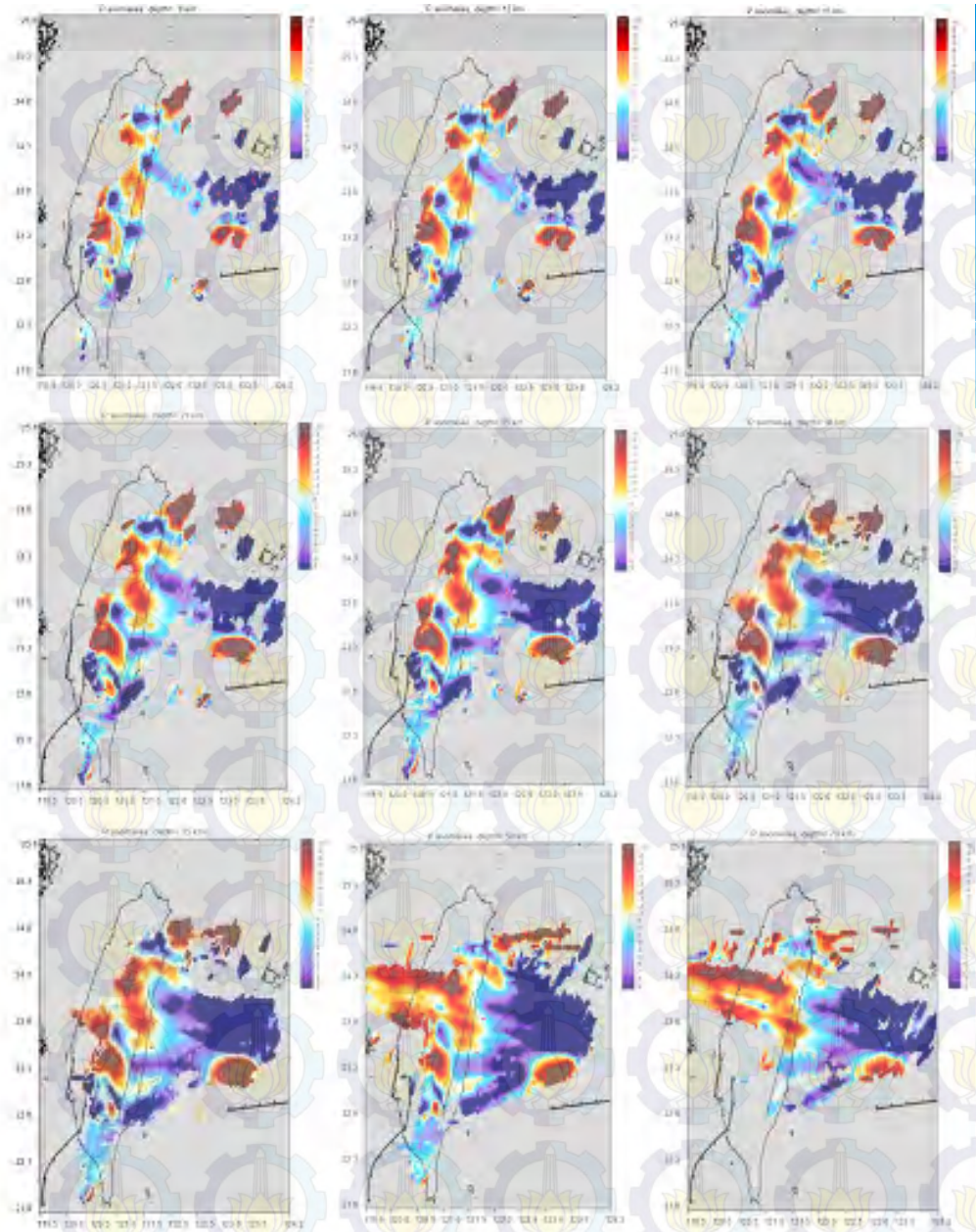


Gambar 4.9 Anomali kecepatan absolut gelombang P pada sayatan vertikal



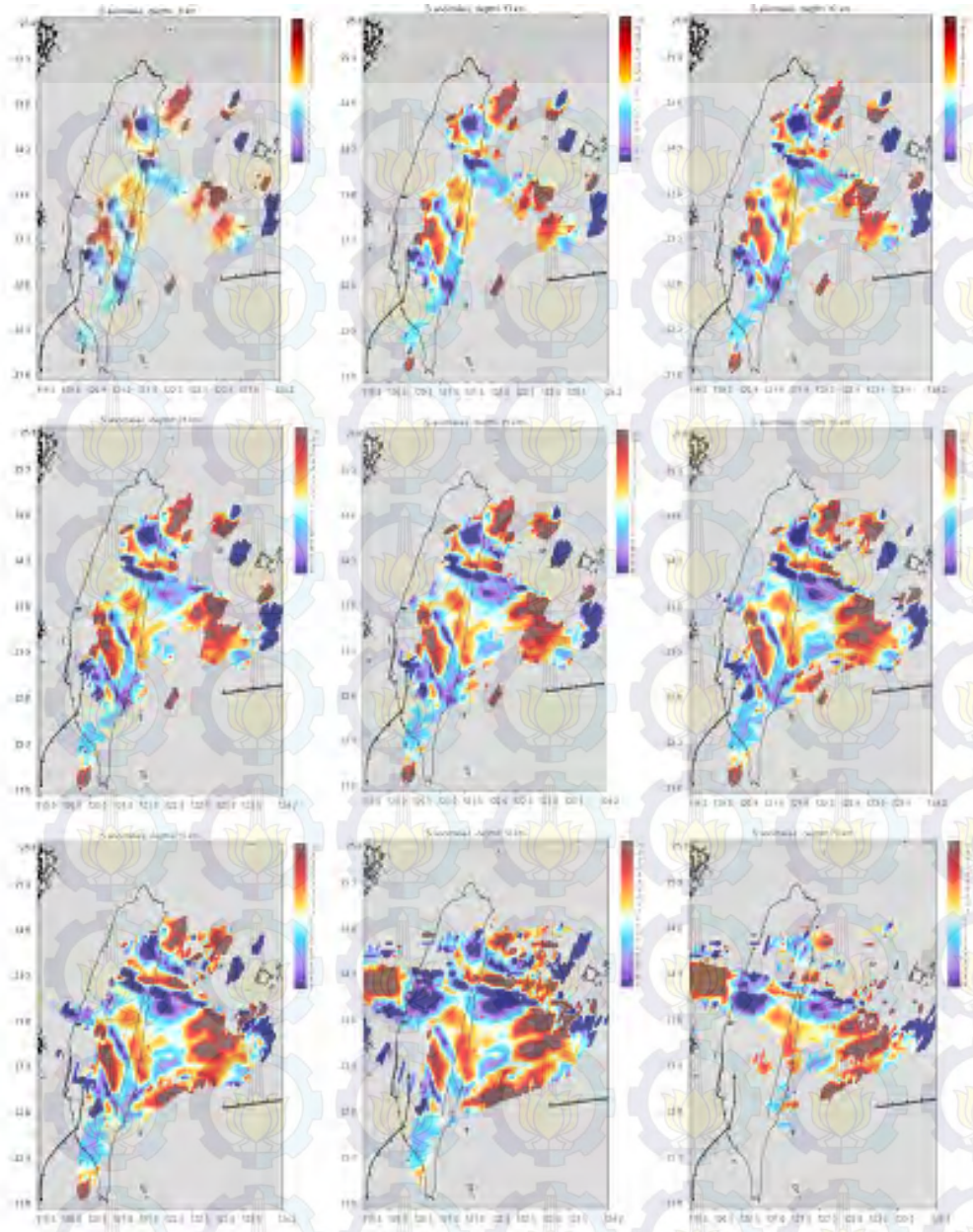
Gambar 4.10 Anomali kecepatan absolut gelombang S pada sayatan vertikal

Profil sayatan 3A – 3B melewati Western Foothills. Pada Gambar 4.8 terlihat adanya anomali negatif Vp dan Vs serta nilai Vp/Vs yang rendah, hal ini menunjukkan bahwa daerah western Foothills tersusun atas batuan sedimen Neogen. Tingkat seismisitas pada sayatan 3A – 3B relatif lebih rendah jika dibandingkan dengan tingkat seismisitas pada sayatan 1A – 1B dan 2A -2B. Rau et al menyatakan bahwa jumlah gempabumi yang terjadi di Taiwan bagian barat relatif lebih sedikit. Kontras nilai kecepatan absolut gelombang P yang ditunjukkan oleh Gambar 4.9 menguatkan dugaan bahwa lapisan Moho di Western Foothills berada dikedalaman antara 25-35 km (Ma dan Song, 1997).



Gambar 4.11 Distribusi anomali kecepatan gelombang P pada sayatan horizontal. Dari kiri atas ke kanan berturut-turut pada kedalaman 9 km, 13 km, 17 km, 21 km, 25 km, 30 km, 35 km, 50 km, dan 70 km

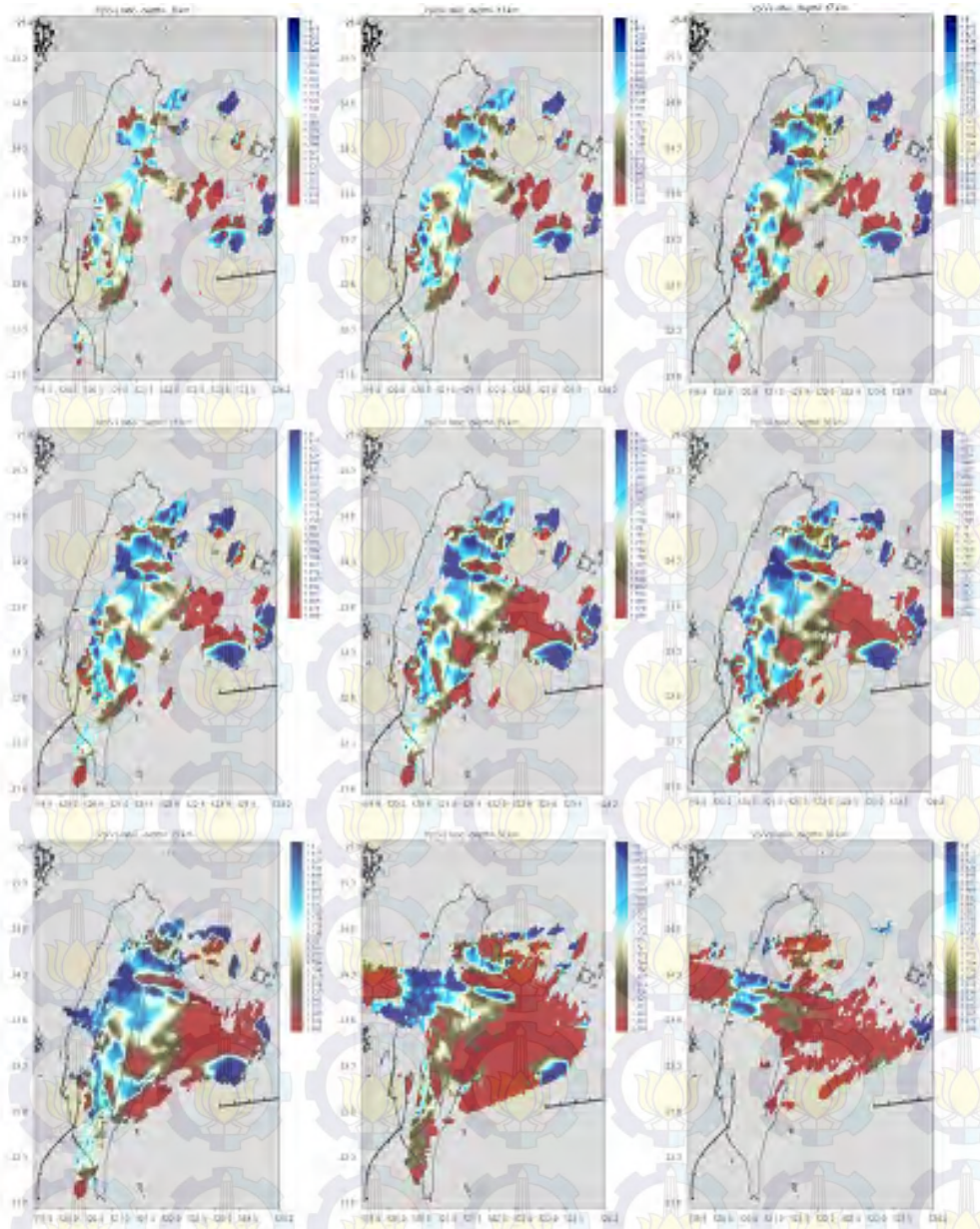
Di lapisan dangkal atau kedalaman <10 km ditemukan anomali Vp dan Vs negatif serta struktur Vp/Vs rendah di Western Foothills yang mengindikasikan bahwa Western Foothills tersusun dari batuan sedimen Neogen (Ma et al, 1996; Wu et al, 2007). Anomali Vp dan Vs negatif juga ditemukan di utara Taiwan mulai dari kedalaman 9 km dan masih terlihat jelas hingga kedalaman 35 km. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian Ma et al (1996) yang menyebutkan bahwa anomali Vp dan Vs negatif berhubungan dengan kelompok vulkanik Tatun dan Chilungsan. Anomali negatif Vp dan Vs negatif juga disebabkan oleh sisa efek aktivitas vulkanik di masa lalu. Menurut Hasegawa et al (1993), daerah vulkanik aktif umumnya ditandai dengan zona kecepatan rendah. Selain itu, anomali negatif juga berhubungan dengan efek geotermal yang mereduksi kecepatan gelombang P.



Gambar 4.12 Distribusi anomali kecepatan gelombang S pada sayatan horizontal. Dari kiri atas ke kanan berturut-turut pada kedalaman 9 km, 13 km, 17 km, 21 km, 25 km, 30 km, 35 km, 50 km, dan 70 km

Struktur Vp/Vs tinggi ditemukan di Coastal Range, Taiwan bagian timur pada kedalaman 13-30 km yang mengindikasikan adanya fluida di lapisan kerak bumi disepanjang zona patahan utama di daerah penghubung, dalam hal ini adalah Longitudinal Valley.

Longitudinal Valley merupakan daerah penghubung antara Central Range dibagian barat dan Coastal Range dibagian timur. Terlihat batas antara anomali negatif dan anomali positif di Longitudinal Valley. Anomali positif dibagian timur berkorelasi dengan kerak samudera dari Lempeng Laut Filipina. Sedangkan anomali negatif di Central Range muncul karena adanya perbedaan batuan penyusun dasar dari Central Range dengan Lempeng Laut Filipina. Perbedaan anomali yang cukup signifikan menguatkan dugaan bahwa Longitudinal Valley merupakan daerah penghubung. Struktur Vp/Vs rendah di Central Range mengindikasikan bahwa batuan pembentuk dasar dari Central Range merupakan batuan granit (Wu et al, 2007).



Gambar 4.13 Distribusi anomali Vp/Vs pada sayatan horizontal. Dari kiri atas ke kanan berturut-turut pada kedalaman 9 km, 13 km, 17 km, 21 km, 25 km, 30 km, 35 km, 50 km, dan 70 km

Seismisitas disekitar Palung Ryuku cukup tinggi karena merupakan zona subduksi antara Lempeng Laut Filipina dan Lempeng Eurasia. Dari Gambar 4.11 tampak bahwa di daerah tersebut terdapat anomali positif Vp. Sebaliknya, Gambar 4.12 menampilkan anomali negatif Vs pada daerah tersebut. Perbedaan pola distribusi anomali Vp dan Vs ini disebabkan resolusi gelombang P dan gelombang S yang kurang baik. Pada umumnya penentuan waktu tiba gelombang S relatif lebih sulit jika dibandingkan dengan penentuan waktu tiba gelombang P. Zona subduksi disepanjang Palung Ryuku juga ditandai dengan struktur Vp/Vs tinggi. Struktur Vp/Vs tinggi menunjukkan tingkat seismisitas yang tinggi pula, hal ini terbukti dari banyaknya kejadian gempa yang terjadi di wilayah ini.

KESIMPULAN

Setelah melalui proses inversi dengan dua kali iterasi, jumlah *event* menjadi 93 dengan jumlah gelombang P dan gelombang S masing-masing 633 dan 625 gelombang.

Taiwan bagian timur didominasi oleh anomali Vp dan Vs positif. Anomali positif ini menunjukkan batas barat dari Lempeng Laut Filipina, dengan Longitudinal Valley sebagai daerah penghubung. Anomali negatif serta tingkat seismisitas yang cukup tinggi di Central Range berhubungan dengan zona patahan aktif, yaitu Patahan Lishan. Anomali negatif ini juga mungkin dihasilkan dari intrusi panas dari mantel samudera atas dari Lempeng Laut Filipina. Anomali negatif Vp dan Vs menunjukkan bahwa daerah Western Foothills tersusun atas batuan sedimen Neogen.

Struktur Vp/Vs tinggi di Coastal Range menunjukkan banyaknya jumlah batuan vulkanik dan batuan sedimen muda serta mengindikasikan adanya zona patahan dan merefleksikan keberadaan fluida di daerah tersebut. Struktur Vp/Vs rendah di Central Range mengindiksikan bahwa dasar dari Central Range tersusun atas batuan granit. Struktur Vp/Vs rendah di Western Foothills yang mengindikasikan bahwa Western Foothills tersusun dari batuan sedimen Neogen.

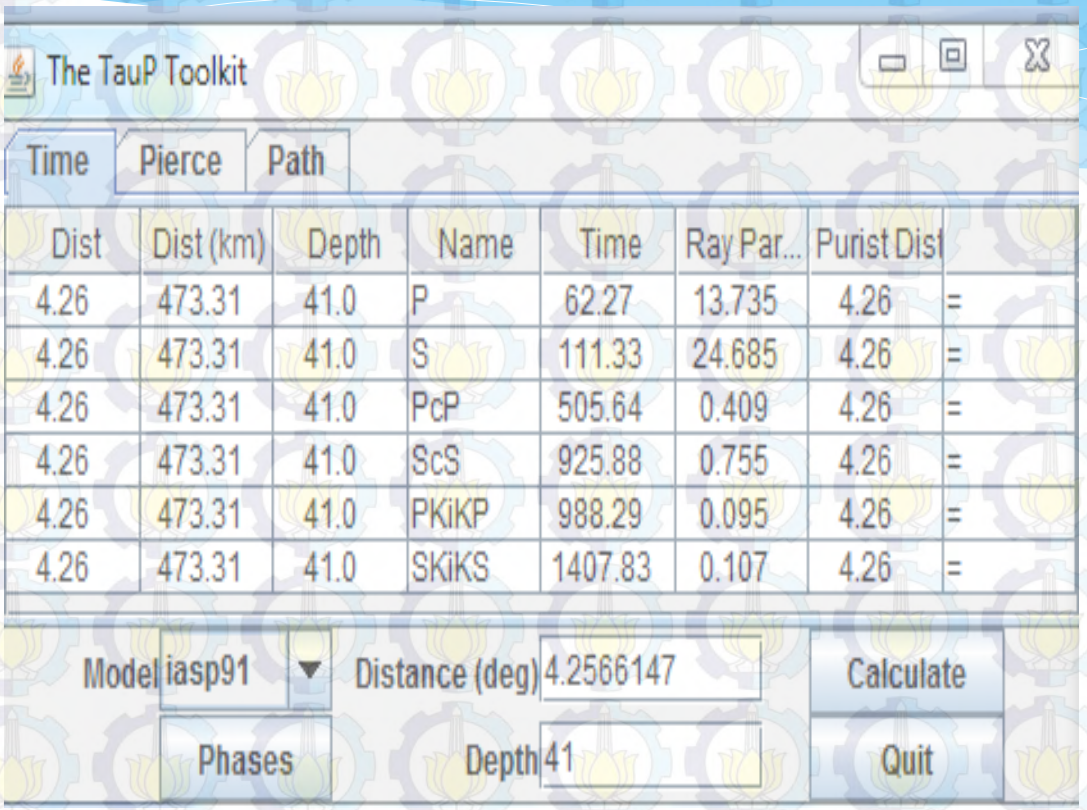
SARAN

Adapun saran dari penulis yaitu perlu adanya penambahan jumlah data gempa yang mempunyai distribusi sinar yang merata dan jumlah stasiun pencatat gempa untuk mendapatkan resolusi citra tomografi yang lebih baik dan dilakukan pengujian dengan data sintesis.

TERIMAKASIH

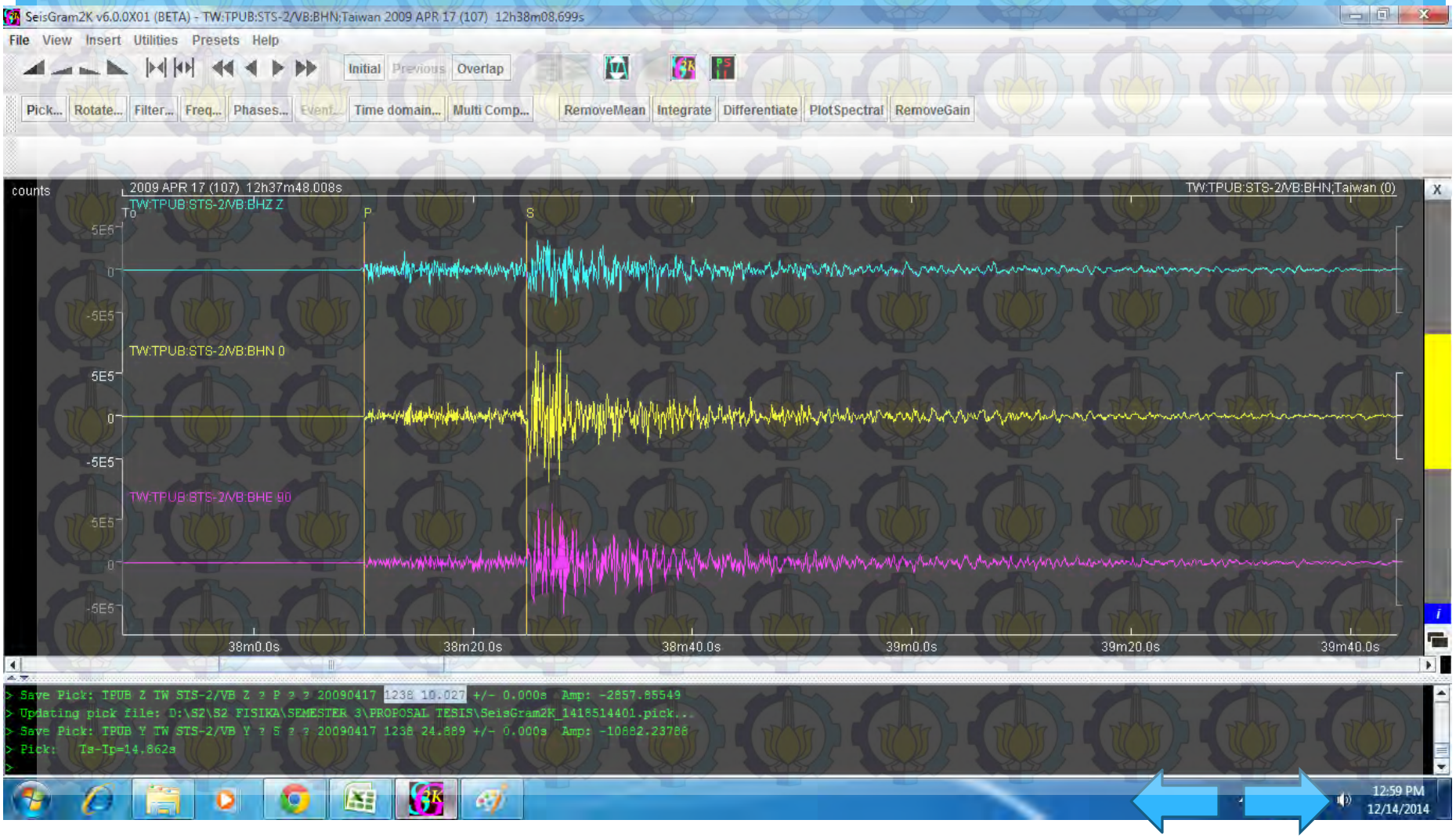
PROSEDUR PENELITIAN

PERHITUNGAN TRAVEL TIME



PROSEDUR PENELITIAN

PICKING DATA



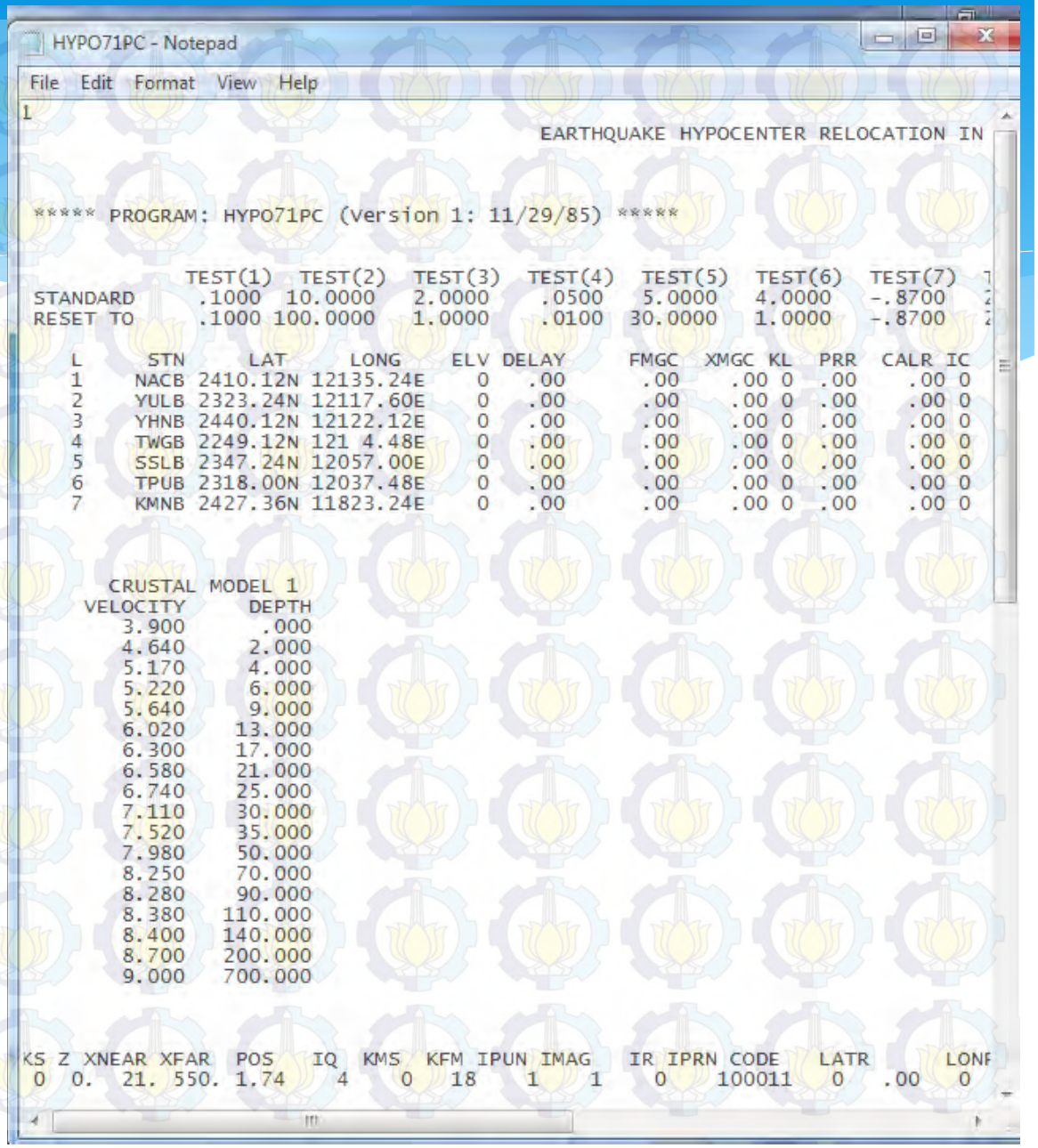
HYPO71PC.INP

HYPO71PC - Notepad

File Edit Format View Help

```
HEAD                                EARTHQUAKE HYPOCENTER RELOCATION IN TAIWAN
RESET TEST(02)=100.
RESET TEST(03)=1.
RESET TEST(04)=0.01
RESET TEST(05)=30.
RESET TEST(06)=1.
RESET TEST(10)=200.

  NACB2410.12 12135.24E
  YULB2323.24 12117.60E
  YHNB2440.12 12122.12E
  TWGB2249.12 12104.48E
  SSLB2347.24 12057.00E
  TPUB2318.00 12037.48E
  KMNB2427.36 11823.24E

3.90   0.0
4.64   2.0
5.17   4.0
5.22   6.0
5.64   9.0
6.02  13.0
6.30  17.0
6.58  21.0
6.74  25.0
7.11  30.0
7.52  35.0
7.98  50.0
8.25  70.0
8.28  90.0
8.38 110.0
8.40 140.0
8.70 200.0
9.00 700.0

0.02820.66550.2 1.74    4        18    1    1         1   11

NACBIPD1 101126151348.88       50.59ISD1
YULBIPD1 101126151402.54       15.56ISU1
YHNBIPD1 101126151356.84       65.44ISU1
TWGBIPD1 101126151410.88       31.40ISU1
SSLBIPU1 101126151401.66       13.52ISU1
TPUBIPU1 101126151410.93       27.97ISD1
KMNBIPD1 101126151433.48       71.35ISU1
```

HYPO71PC.PRT

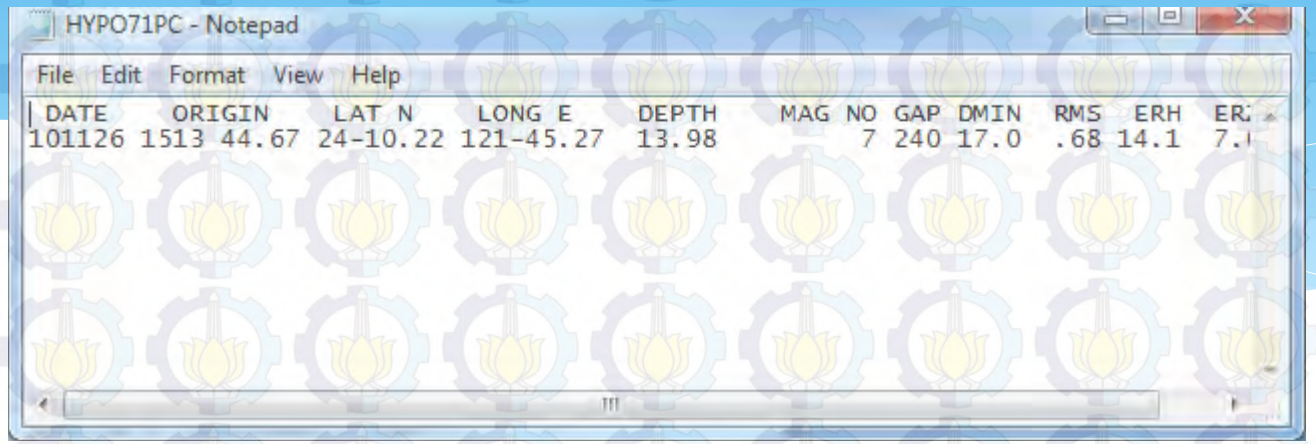


HYPO71PC - Notepad

File Edit Format View Help

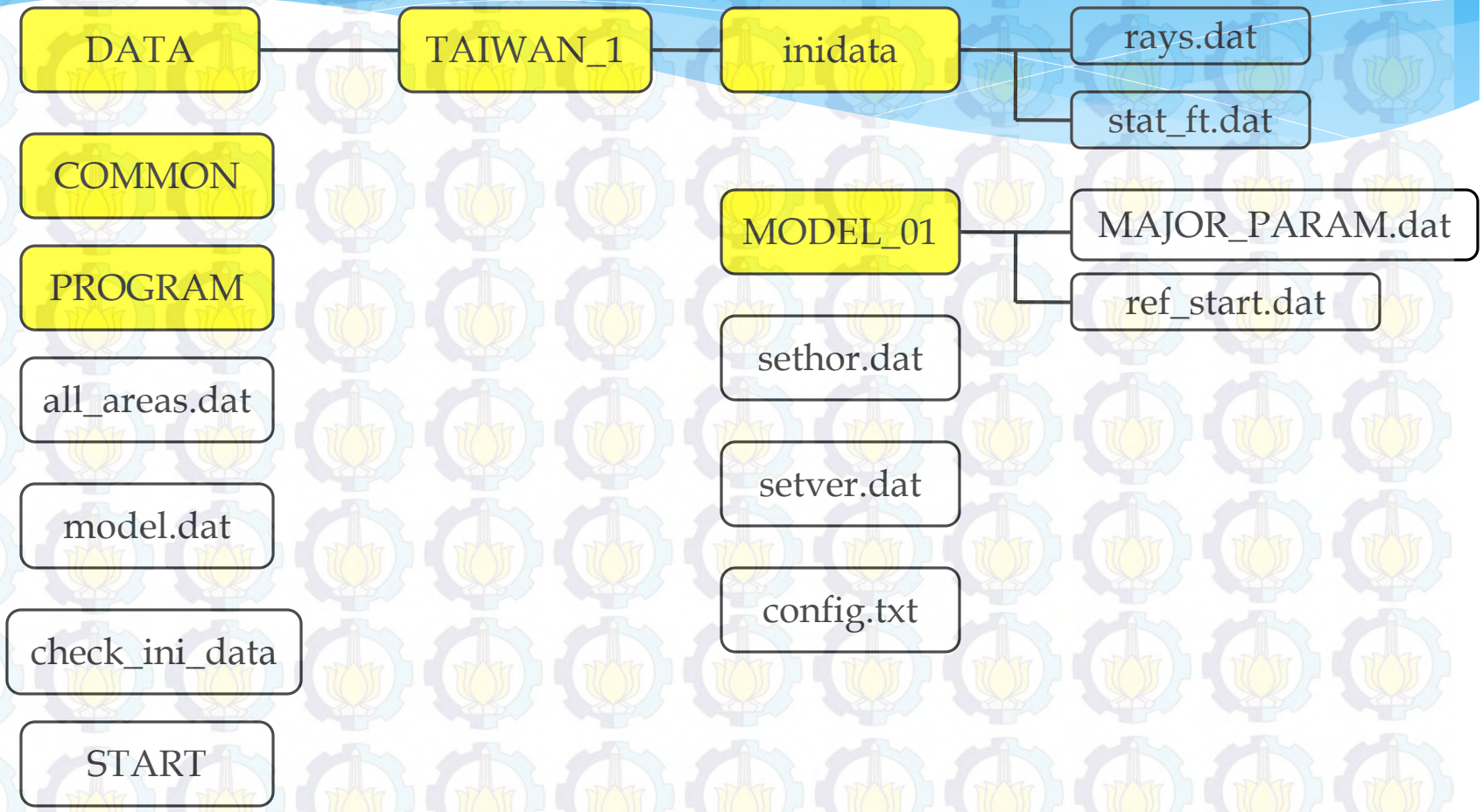
```
1                                                    EARTHQUAKE HYPOCENTER RELOCATION IN


 ***** PROGRAM: HYPO71PC (Version 1: 11/29/85) *****


                TEST(1)  TEST(2)  TEST(3)  TEST(4)  TEST(5)  TEST(6)  TEST(7)
 STANDARD        .1000  10.0000   2.0000    .0500   5.0000   4.0000   -.8700
 RESET TO        .1000 100.0000   1.0000    .0100  30.0000   1.0000   -.8700

    L      STN      LAT      LONG     ELV  DELAY      FMGC   XMGC KL  PRR   CALR IC
    1     NACB 2410.12N 12135.24E      0    .00       .00    .00 0  .00    .00 0
    2     YULB 2323.24N 12117.60E      0    .00       .00    .00 0  .00    .00 0
    3     YHNB 2440.12N 12122.12E      0    .00       .00    .00 0  .00    .00 0
    4     TWGB 2249.12N 121 4.48E      0    .00       .00    .00 0  .00    .00 0
    5     SSLB 2347.24N 12057.00E      0    .00       .00    .00 0  .00    .00 0
    6     TPUB 2318.00N 12037.48E      0    .00       .00    .00 0  .00    .00 0
    7     KMNB 2427.36N 11823.24E      0    .00       .00    .00 0  .00    .00 0


      CRUSTAL MODEL 1
    VELOCITY     DEPTH
       3.900      .000
       4.640     2.000
       5.170     4.000
       5.220     6.000
       5.640     9.000
       6.020    13.000
       6.300    17.000
       6.580    21.000
       6.740    25.000
       7.110    30.000
       7.520    35.000
       7.980    50.000
       8.250    70.000
       8.280    90.000
       8.380   110.000
       8.400   140.000
       8.700   200.000
       9.000   700.000


KS Z XNEAR XFAR  POS   IQ  KMS  KFM IPUN IMAG   IR IPRN CODE    LATR      LONF
 0  0.  21. 550. 1.74    4    0   18    1    1    0    100011    0   .00    0
```

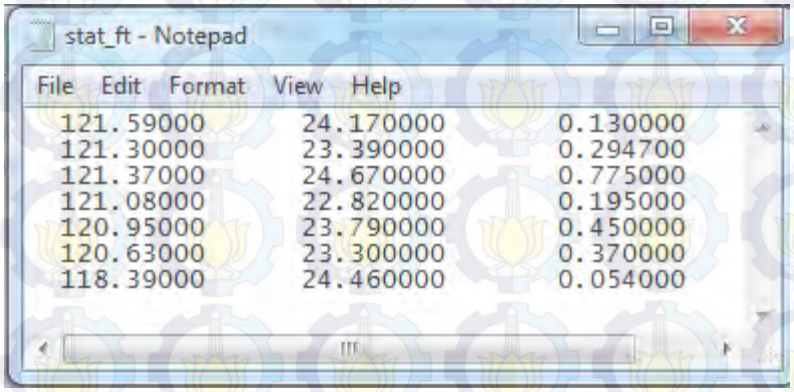
HYPO71PC.PUN



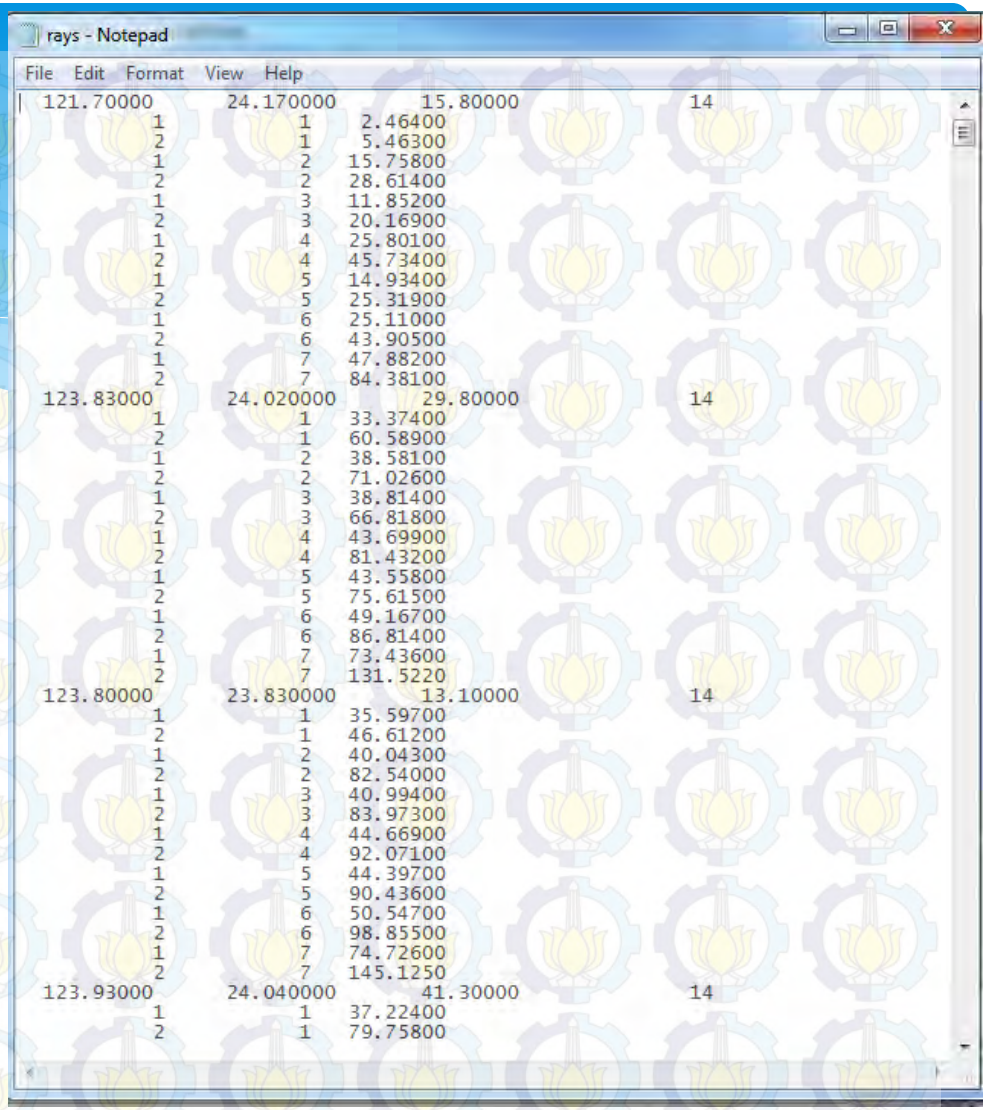
PROSEDUR PENELITIAN

Struktur *folder* (kotak kuning) dan *file* (kotak putih) dalam *software* LOTOS-12 (Kaulakov, 2009)





stat_ft.dat



rays.dat

MAJOR_PARAM.dat

MAJOR_PARAM - Notepad

File Edit Format View Help

```
************************************************************
GENERAL INFORMATION :
1       KEY 1: REAL; KEY 2: SYNTHETIC
1       KEY 1: Vp and Vs; KEY 2: Vp and Vp/Vs
0       KEY 0: all data, KEY 1: odd events, KEY 2: even events
1       Ref. model optimization (0-no; 1-yes)

************************************************************
AREA_CENTER :
121 23.8      Center of conversion to XY
```

ref_start.dat

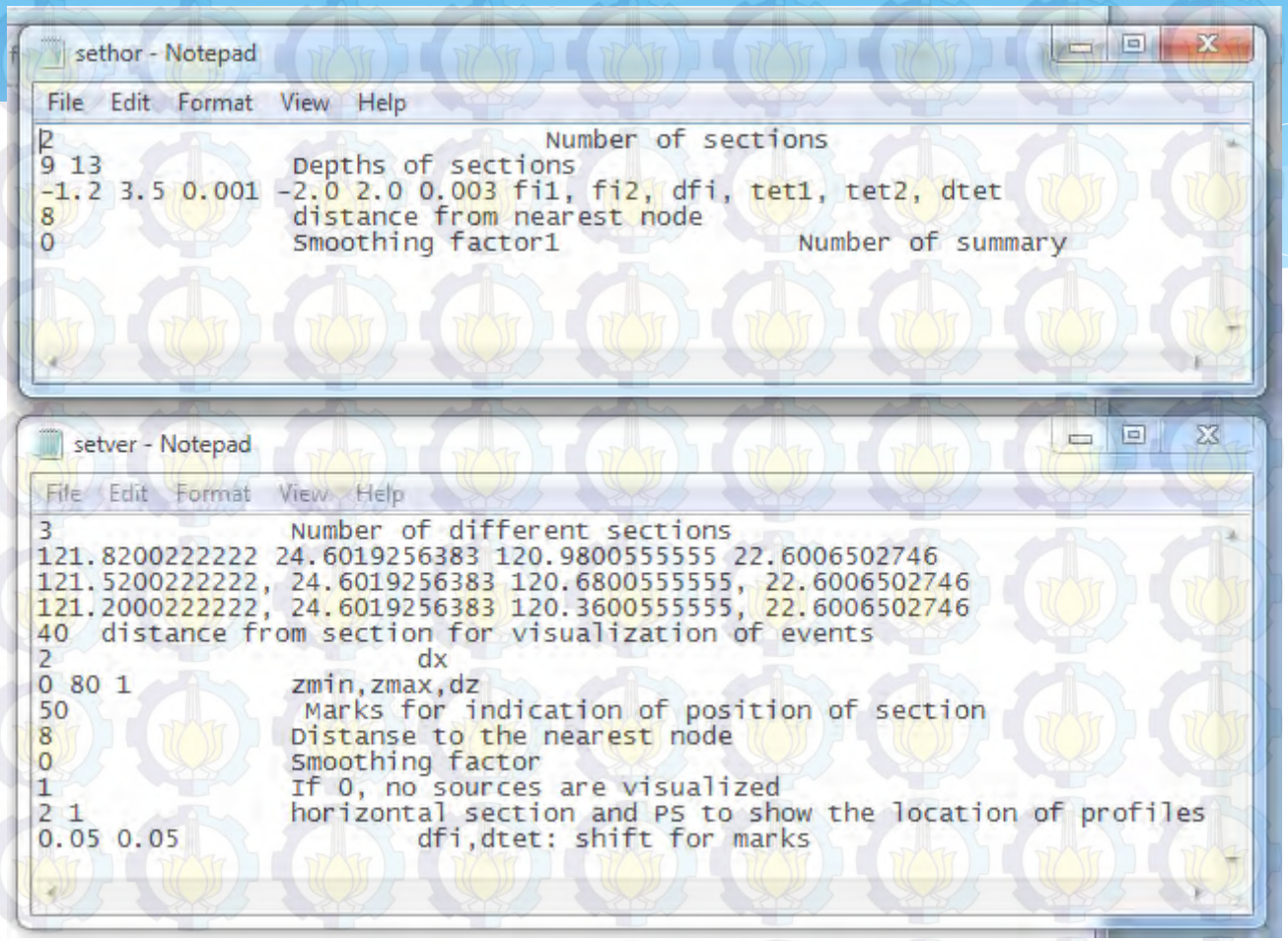
ref_start - Notepad

File Edit Format View Help

```
    0.000     3.9       2.09
    2.000     4.64      2.64
    4.000     5.17      3.01
    6.000     5.22      3.05
    9.000     5.64      3.30
   13.000     6.02      3.48
   17.000     6.3       3.62
   21.000     6.58      3.78
   25.000     6.74      3.87
   30.000     7.11      4.09
   35.000     7.52      4.32
   50.000     7.98      4.61
   70.000     8.25      4.71
```

sethor.dat

setver.dat



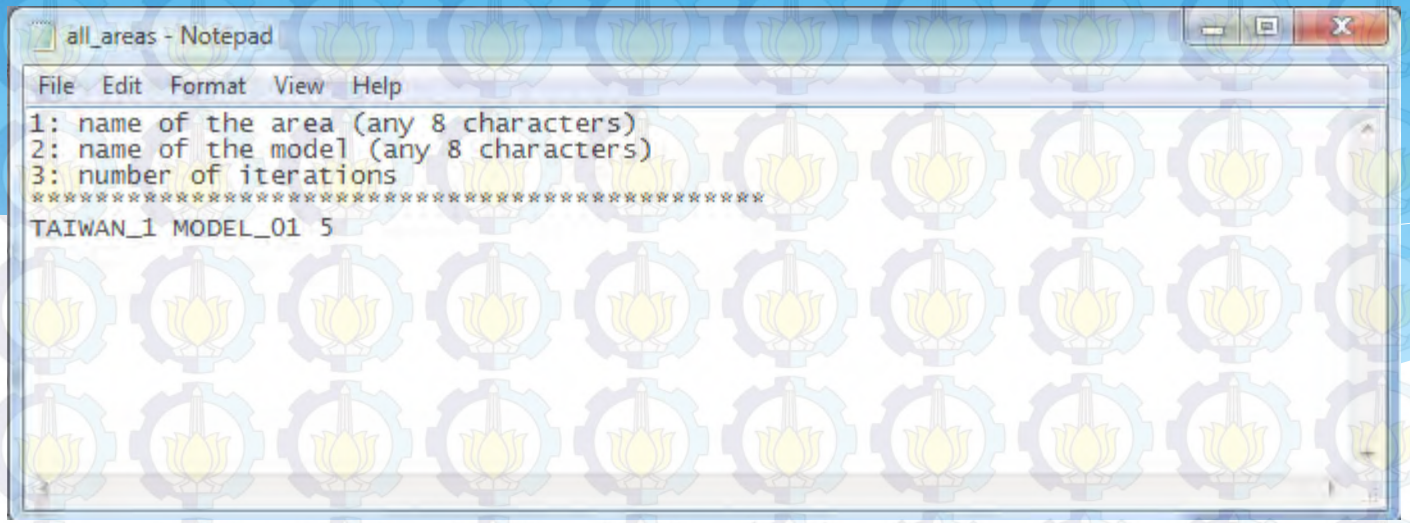
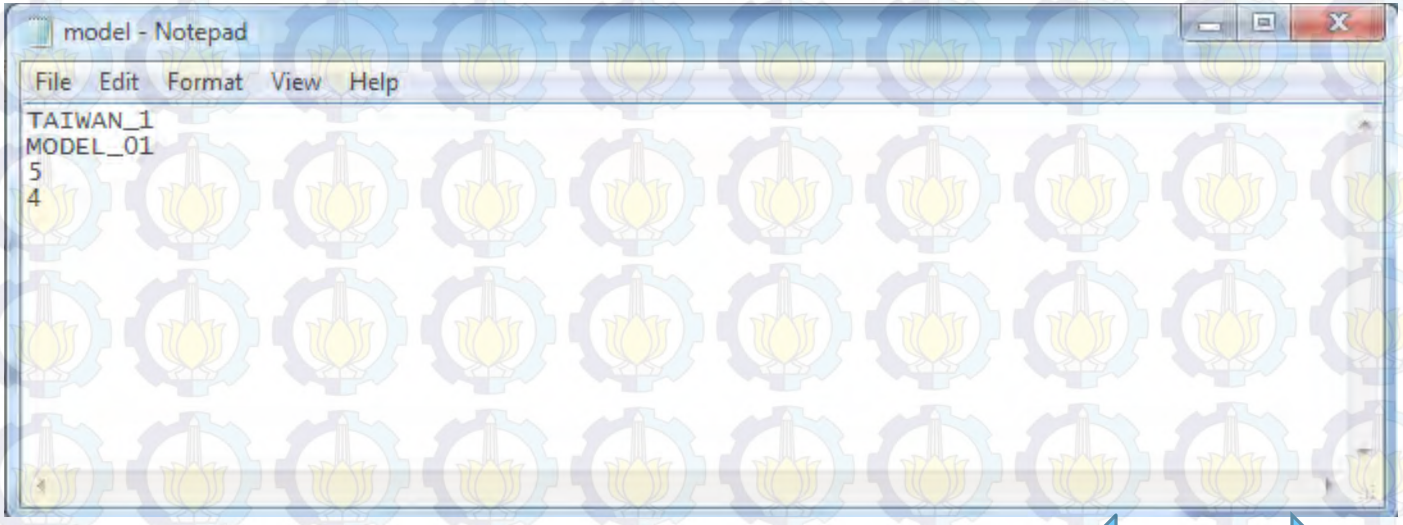
Config.txt

config - Notepad

File Edit Format View Help

```
******* MAP VIEW *********
400 600                 size in pixels for horizontal section
0.5 0.5                 ticks on axes for horizontal sections
******* VERTICAL SECTION *********
500 500                 size in pixels for vertical section
25 20                   ticks on axes for vertical sections
******* PLOTS WITH 1D VELOCITIES *********
500 500                 size in pixels for the 1D models
2 9                             Limits of P and S velocity distribution
-80 0                   Depth limit
0.5 10                  ticks on axes for 1D velocity plot
******* SCALES *********
blue_red.scl    scale for velocity anomalies
-10 10                  diapason for velocity anomalies, %
blue_brown.scl  scale for Vp/Vs
1.6 1.9                 diapason for Vp/Vs
rainbow_small.scl       scale for absolute Vp
4.0 8.5                 diapason for absolute Vp
rainbow_small.scl       scale for absolute Vp
2.5 5                   diapason for absolute Vp
```

all_areas.dat



model.dat