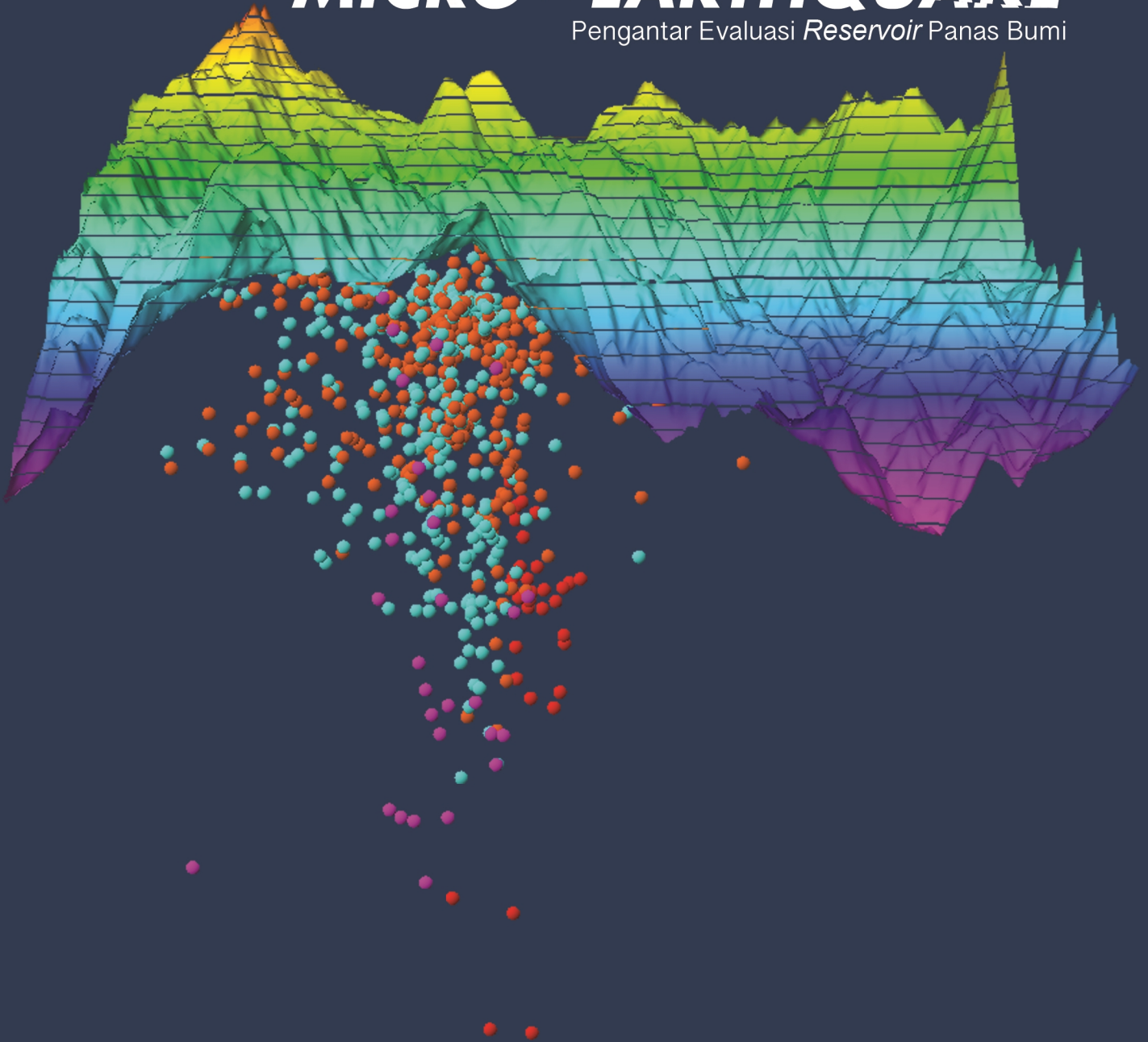


PENGOLAHAN DATA
MICRO - EARTHQUAKE

Pengantar Evaluasi *Reservoir* Panas Bumi



Widya Utama

Sherly Ardhya Garini

PENGOLAHAN DATA MICRO-EARTHQUAKE Pengantar Evaluasi Reservoir Panas Bumi

Penulis:
Widya Utama, Sherly Ardhya Garini



2020

PENGOLAHAN DATA MICRO-EARTHQUAKE

Pengantar Evaluasi Reservoir Panas Bumi

Penulis : Widya Utama, Sherly Ardhya Garini

Desain Sampul : Halimul Lathif Humam, Dihein Rekso Ikmaluhakim

Tata Letak : Andriyan Yulikasari

© 2020, ITS Press, Surabaya

Hak cipta dilindungi undang-undang

Diterbitkan pertama kali oleh

ITS PRESS, Surabaya 2020

ISBN 978-623-318-000-9



Anggota IKAPI dan APPTI

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari penerbit.

Barangsiapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan yang melanggar HAK CIPTA pada buku ini, akan dikenai sangsi sesuai undang-undang nomor 19 tahun 2002 pasal 72.

Dicetak oleh Percetakan ITS Press

Isi di luar tanggung jawab percetakan

PRAKATA

Buku pengolahan data *micro-earthquake* (MEQ) menjelaskan tentang panduan mekanisme pengolahan data *micro-earthquake*. Penentuan lokasi hiposenter awal (inisial) menggunakan metode *Geiger* dan uji lokasi lanjutan menggunakan metode *Coupled Velocity-Hypocenter* untuk evaluasi kinerja *reservoir* panas bumi.

Panduan ini dapat diterapkan pada data *micro-earthquake* (MEQ) lain dengan *background noise* yang rendah (kualitas data perekaman baik), data hasil perekaman berformat .mseed, dan untuk metode penentuan lokasi hiposenter inisial menggunakan metode *Geiger* digunakan minimal 4 fasa gelombang. Sedangkan untuk metode *Coupled Velocity-Hypocenter* menggunakan minimal 6 fasa gelombang seismik. Langkah-langkah proses pengolahan data MEQ dalam buku ini telah disusun dan dilengkapi gambar-gambar dengan harapan dapat mempermudah pembaca dalam penggunaannya.

Dengan terbitnya modul panduan ini diharapkan dapat membantu pembaca dalam pengolahan data *micro-earthquake*. Atas terbitnya panduan pengolahan data *micro-earthquake* (MEQ) ini, kami menyampaikan terima kasih dan penghargaan setinggi-tingginya kepada semua anggota tim penyusun yakni saudari Andriyan Yulikasari, Naomi Nadya Angelia Siregar dan Shabila Gadis Halida, serta pihak-pihak yang berperan atas sumbangsih yang telah diberikan mulai dari menggagas dan menyusun sampai dengan penerbitan.

Meskipun penyusunan buku ini telah diupayakan sebaik mungkin, namun dengan segala keterbatasan yang ada pada buku ini, tentu masih memerlukan berbagai penyempurnaan. Sehubungan dengan itu penyusun mengharapkan saran dan kritik dari pembaca guna perbaikan buku ini.

Disertai dengan rasa terima kasih yang tulus, semoga buku ini dapat memberi manfaat dalam mempelajari masalah pengolahan data *micro-earthquake* (MEQ).

Surabaya, November 2019

Penyusun

DAFTAR ISI

PRAKATA.....	i
DAFTAR ISI.....	1
PENDAHULUAN	3
RUANG LINGKUP ISI.....	3
SASARAN PEMBELAJARAN.....	4
PERANGKAT LUNAK (<i>SOFTWARE</i>) YANG DIGUNAKAN.....	4
ALUR KERJA	5
KAJIAN PUSTAKA.....	6
Gempa Bumi Mikro.....	6
Parameter Gempa Bumi	8
Metode Inversi.....	9
A. PENENTUAN KOMPONEN <i>EVENT</i> GEMPA MIKRO MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK GEOPSY	11
B. PENENTUAN WAKTU TIBA (<i>PICKING ARRIVAL TIME</i>) GELOMBANG PRIMER (P) DAN SEKUNDER (S) MENGGUNAKAN SEISGRAM2K70	15
C. MENGHITUNG NILAI MAGNITUDO GEMPA.....	18
D. PENENTUAN LOKASI AWAL HIPOSENTER GEMPA BUMI MIKRO MENGGUNAKAN METODE <i>GEIGER (GAD)</i>	19
E. PENINGKATAN KEAKURASIAN PENENTUAN WAKTU TIBA GELOMBANG PRIMER (P) DAN SEKUNDER (S) MENGGUNAKAN ALGORITMA S-TRANSFORM.....	23
F. UJI LOKASI HIPOSENTER GEMPA BUMI MIKRO MENGGUNAKAN METODE <i>COUPLED VELOCITY-HYPOCENTER</i> (VELEST 3.3).....	29
G. <i>PLOTTING</i> LOKASI EPISENTER GEMPA BUMI MIKRO MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK ARCGIS	35

H. <i>PLOTTING</i> LOKASI HIPOSENTER GEMPA BUMI MIKRO PADA PENAMPANG 2D MAGNETOTELLURIK MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK LEAPFROG GEO	40
I. <i>PLOTTING</i> LOKASI HIPOSENTER GEMPA BUMI MIKRO MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK PETREL 2019	47
DAFTAR PUSTAKA	51

PENDAHULUAN

Metode gempa mikro adalah salah satu metode geofisika yang digunakan untuk mengidentifikasi adanya gempa-gempa kecil dengan nilai magnitudo ≤ 3 SR (Hurukawa, 2008), yang umumnya disebabkan oleh rekahan hidraulik (*hydraulic fracturing*), kegiatan produksi maupun injeksi dan pengeboran. Sehingga metode gempa mikro khususnya pada eksplorasi panas bumi digunakan untuk mengamati hasil *hydraulic fracturing* maupun proses injeksi, identifikasi kebocoran *casing* sumur (Rutledge dan Phillips, 2001).

Metode gempa mikro dapat menunjukkan sebaran zona-zona kejadian gempa melalui letak hiposenter dan episenter gempa bumi mikro. Dalam industri panas bumi, informasi lokasi hiposenter gempa bumi mikro dapat digunakan untuk melihat kecenderungan arah aliran air injeksi dan menggambarkan sesar yang merupakan zona dengan permeabilitas relatif tinggi untuk penentuan sumur produksi baru (Anissofira, dkk. 2013).

RUANG LINGKUP ISI

Ruang lingkup isi pada modul ini adalah sebagai berikut:

1. Penentuan komponen gempa mikro
2. *Picking* gelombang primer (P) dan sekunder (S)
3. Perhitungan magnitudo gempa mikro
4. Penentuan hiposenter inisial gempa mikro menggunakan metode *Geiger*
5. Uji lokasi hiposenter gempa mikro menggunakan metode *Coupled Velocity-Hypocenter*
6. Visualisasi atau plotting *event* gempa mikro

SASARAN PEMBELAJARAN

Setelah mengikuti modul ini mahasiswa diharapkan:

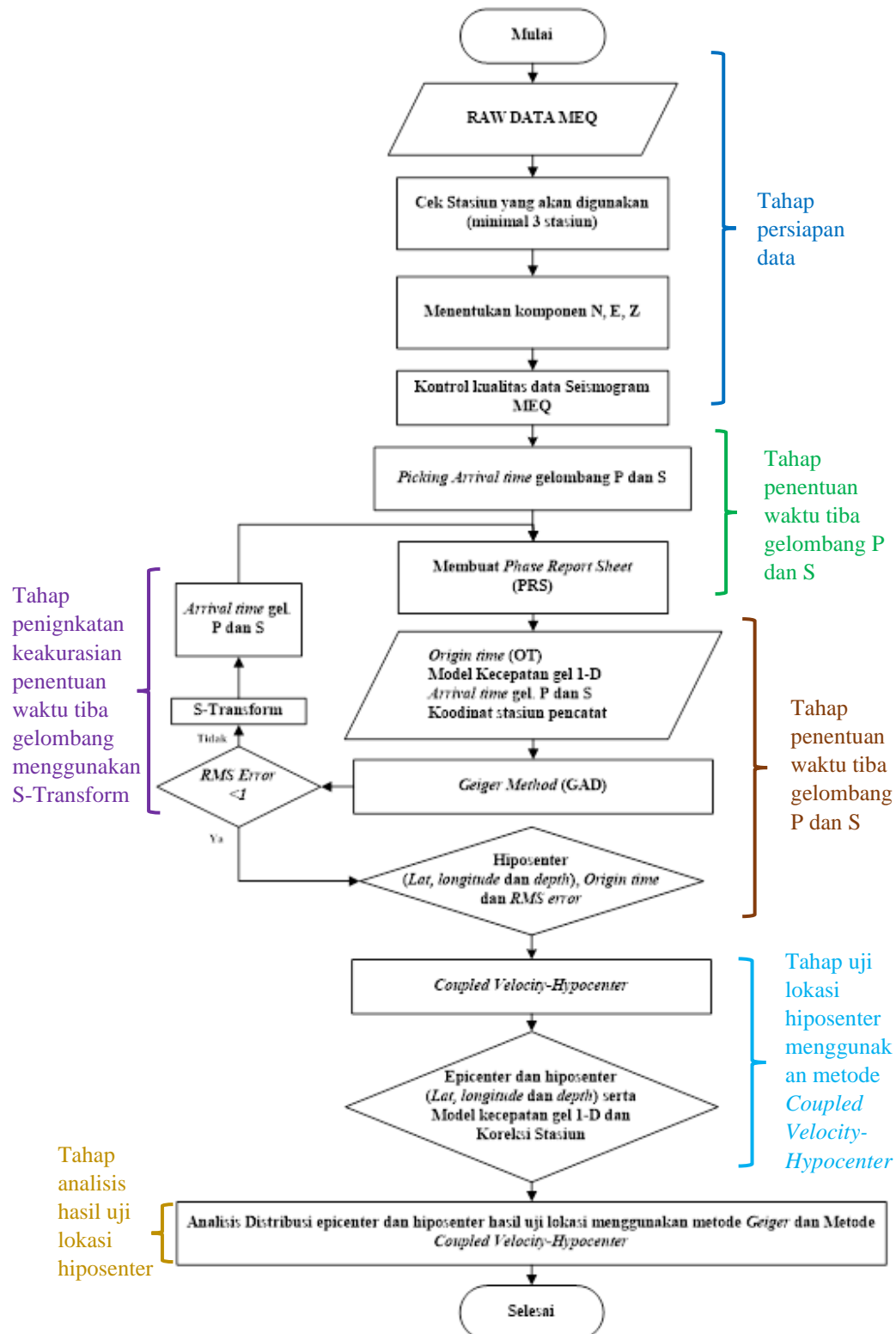
1. Menentukan waktu tiba gelombang primer (P) dan sekunder (S)
2. Menghitung nilai magnitudo gempa mikro
3. Menentukan lokasi hiposenter gempa mikro inisial dengan menggunakan metode *Geiger*
4. Menentukan lokasi hiposenter gempa mikro dengan menggunakan metode uji lokasi *Coupled Velocity-Hypocenter*
5. Menentukan model kecepatan 1-D gelombang primer (P) wilayah penelitian
6. Menentukan lokasi hiposenter gempa bumi mikro berdasarkan metode *Geiger* dan *Coupled Velocity-Hypocenter*
7. Memvisualisasikan hasil penentuan serta uji lokasi hiposenter sehingga menghasilkan peta distribusi lokasi hiposenter dan episenter gempa mikro baik 2D maupun 3D

PERANGKAT LUNAK (SOFTWARE) YANG DIGUNAKAN

Software yang digunakan dalam modul ini adalah sebagai berikut:

1. Ms. Excel
2. Seisgram2K70
3. Java
4. Geopsy
5. Velest 3.3
6. GAD
7. ArcGis
8. Matlab
9. Petrel
10. Leapfrog Geo

ALUR KERJA



KAJIAN PUSTAKA

Gempa Bumi Mikro

Metode mikroseismik atau metode gempa mikro adalah salah satu metode geofisika yang digunakan untuk mengidentifikasi adanya gempa-gempa kecil dengan nilai magnitudo ≤ 3 SR (Hurukawa, 2008), yang umumnya disebabkan oleh simulasi hidraulik (*hydraulic fracturing*), kegiatan produksi maupun injeksi dan pengeboran. Sehingga metode gempa mikro khususnya pada eksplorasi panas bumi digunakan untuk mengamati hasil *hydraulic fracturing* maupun proses injeksi, identifikasi kebocoran *casing* sumur (Rutledge dan Phillips, 2001).

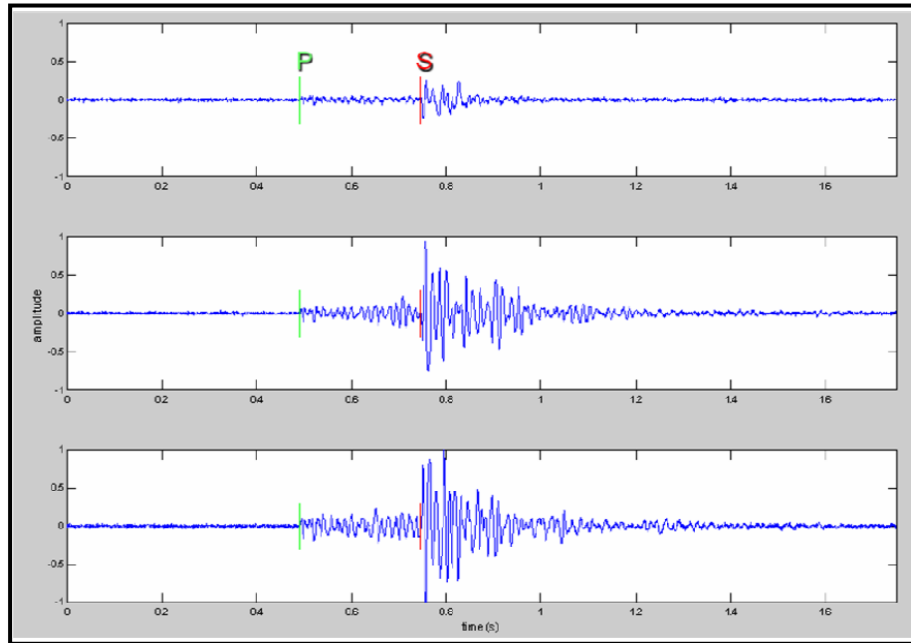
Metode gempa mikro dapat menunjukkan sebaran zona-zona kejadian gempa melalui letak hiposenter dan episenter gempa bumi mikro. Dalam industri panas bumi, informasi lokasi hiposenter gempa bumi mikro dapat digunakan untuk melihat kecenderungan arah aliran air injeksi dan menggambarkan sesar yang merupakan zona dengan permeabilitas relatif tinggi untuk penentuan sumur produksi baru (Anissofira, dkk. 2013).

Secara umum terdapat beberapa faktor yang menyebabkan terjadinya gempa bumi mikro pada lapangan panas bumi, antara lain:

1. Adanya zona lemah yang terbuka atau bergeser akibat injeksi air sehingga meningkatkan tekanan pada batuan
2. Adanya kontak air dingin dengan batuan beku bersuhu tinggi (*heat source*)
3. Berkurangnya tekanan pori yang mengakibatkan menutupnya pori batuan reservoir karena hilangnya fluida pengisi pori batuan (akibat produksi fluida).

Analisis data gempa bumi mikro diawali dengan melakukan identifikasi waktu tiba gelombang Primer (P) dan gelombang (S) berdasarkan data gelombang seismik yang terekam pada tiga komponen oleh stasiun perekam (seismometer). Gelombang P merupakan gelombang seismik yang pertama kali terekam oleh seismometer dan yang mengalami perubahan frekuensi paling awal, pada saat perubahan frekuensi awal itulah dilakukan penentuan waktu tiba gelombang P. Sedangkan untuk penentuan waktu tiba gelombang S dilakukan pada gelombang yang mengalami perubahan frekuensi yang lebih besar setelah gelombang P mengalami pelemahan

frekuensi (Pribadi, 2010). Gambar dibawah ini merupakan tahap awal pengolahan data gempa bumi mikro, berupa identifikasi fasa gelombang P dan gelombang S.



Gambar penentuan waktu tiba gelombang Primer (P) dan gelombang Sekunder (S) gempa bumi mikro (Zhang, dkk. 2009)

Berdasarkan data waktu tiba gelombang P dan gelombang S yang dapat digunakan untuk mengetahui lokasi hiposenter gempa bumi mikro. Pola distribusi hiposenter gempa bumi mikro pada area lapangan panas bumi dapat digunakan untuk mengidentifikasi rekahan-rekahan yang sangat mempengaruhi pengisian *reservoir* (Hilyah, 2010). Menurut Hijriani, dkk. (2017) daerah dengan tingkat seismisitas tinggi dapat merepresentasikan bahwa daerah tersebut memiliki rekahan dengan permeabilitas yang tinggi. Rekahan-rekahan tersebut merupakan salah satu faktor penting dalam kesetimbangan *reservoir* panas bumi (sirkulasi fluida dan aliran panas dalam *reservoir*). Sistem kesetimbangan tersebut akan secara terus menerus terisi kembali oleh air yang memasuki *reservoir*, kemudian air tersebut terpanaskan dan uap keluar dari *reservoir* menuju permukaan (Idat, dkk. 2016).

Parameter Gempa Bumi

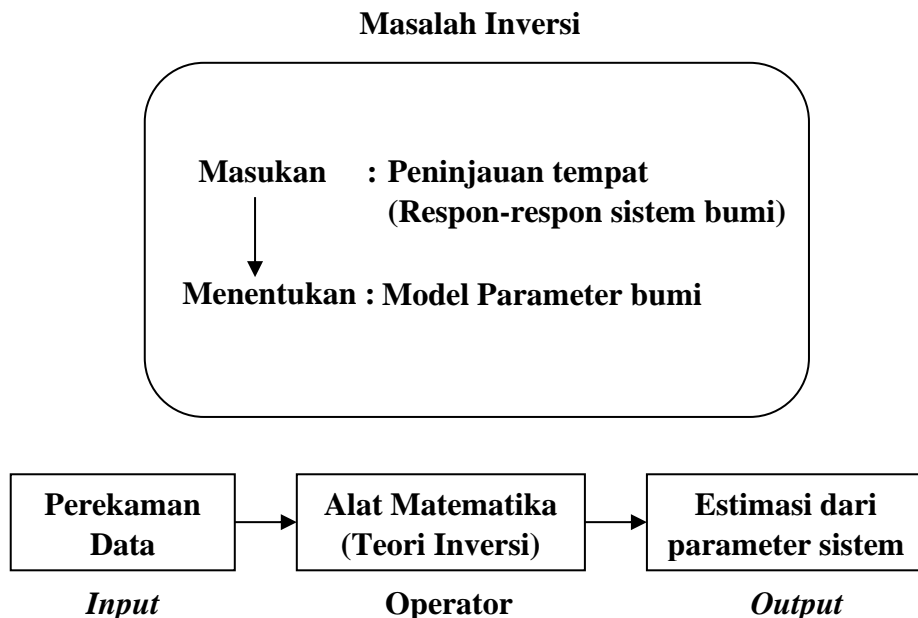
Setiap kejadian gempa bumi akan menghasilkan informasi seismik berupa rekaman sinyal berbentuk gelombang yang setelah melalui proses manual atau non-manual akan menjadi data bacaan fase. Informasi seismik selanjutnya mengalami proses pengumpulan, pengolahan dan analisis sehingga menjadi parameter gempa bumi. Parameter gempa bumi tersebut meliputi: waktu kejadian gempa bumi, lokasi episenter, kedalaman sumber gempa bumi, kekuatan gempa bumi, dan intensitas gempa bumi.

- a. Waktu kejadian gempa bumi (*Origin Time*) adalah waktu terlepasnya akumulasi tegangan yang terbentuk penjalaran gelombang gempa bumi atau waktu saat gelombang meninggalkan sumber gempa dan dinyatakan dalam hari, tanggal, bulan, tahun, jam, menit, detik dalam satuan UTS (*Universal Time Coordinated*) (Stein, S.; Wyssession, 2003).
- b. Episenter adalah titik di permukaan bumi yang merupakan refleksi tegak lurus dari hiposenter atau fokus gempa bumi. Lokasi episenter dibuat dalam system koordinat kartesian bola bumi atau system koordinat geografis dan dinyatakan dalam derajat lintang dan bujur (Stein, S.; Wyssession, 2003).
- c. Kedalaman sumber gempa bumi adalah refleksi vertikal ke atas dari fokus gempa ke episenter.
- d. Hiposenter adalah lokasi dari gempa bumi atau sebagai fokus dari gempa bumi yang diketahui dari *arrival time* dari gelombang seismik yang terekam ada seismometer pada lokasi yang berbeda (Stein, S.; Wyssession, 2003).
- e. Kekuatan gempa bumi atau magnitudo adalah ukuran kekuatan gempa bumi, menggambarkan besarnya energi yang terlepas pada saat gempa bumi terjadi dari amplitudo gelombang yang terekam dari seismogram (Stein, S.; Wyssession, 2003).
- f. Intensitas gempa bumi adalah ukuran kerusakan akibat gempa bumi berdasarkan hasil pengamatan efek gempa bumi terhadap manusia, struktur bangunan dan lingkungan pada tempat tertentu, dinyatakan dalam skala MMI (*Modified Mercalli Intensity*) (Stein, S.; Wyssession, 2003).

Metode Inversi

Metode inversi digunakan pada bidang seismologi, karena perekaman yang dilakukan tidak mungkin dilakukan secara langsung di bawah permukaan bumi. Proses inversi merupakan proses pengolahan data lapangan yang melibatkan teknik penyelesaian matematika dan statistik untuk mendapatkan informasi yang berguna mengenai distribusi sifat fisis bawah permukaan. Tujuan proses inversi adalah untuk mengestimasi parameter fisis batuan yang tidak diketahui sebelumnya. Contoh masalah inversi dalam bidang geofisika adalah penentuan struktur bawah tanah, estimasi parameter-parameter bahan tambang, estimasi parameter-parameter akumulasi sumber energi, dan penentuan lokasi gempa bumi berdasarkan waktu gelombang datang (Supriyanto, 2007).

Tujuan utama dari kegiatan eksplorasi geofisika adalah untuk membuat model bawah permukaan bumi dengan mengandalkan data lapangan yang diukur pada permukaan bumi atau di bawah permukaan bumi atau di atas permukaan bumi dari ketinggian tertentu. Untuk mencapai tujuan ini, idealnya kegiatan pengukuran harus dilakukan secara terus menerus, berkelanjutan dan terintegrasi menggunakan sejumlah ragam metode geofisika (Supriyanto, 2007).



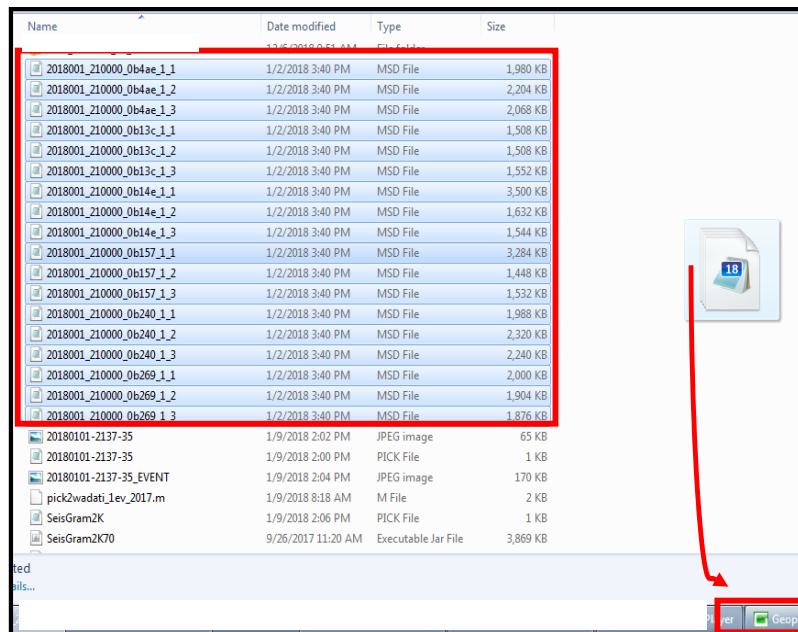
Gambar alur pemodelan inversi (Supriyanto, 2007)

Beberapa metoda inversi telah berhasil dikembangkan untuk mengekstraksi informasi parameter gempa dan struktur kecepatan gelombang gempa dari sekumpulan data waktu tiba gelombang gempa. Sejak itulah secara teoritis dan teknis struktur kecepatan gelombang gempa di bawah permukaan bumi dapat ditentukan dengan melakukan inversi pada sekumpulan data waktu tiba gelombang gempa yang terekam pada seismogram (Puspito, 1996).

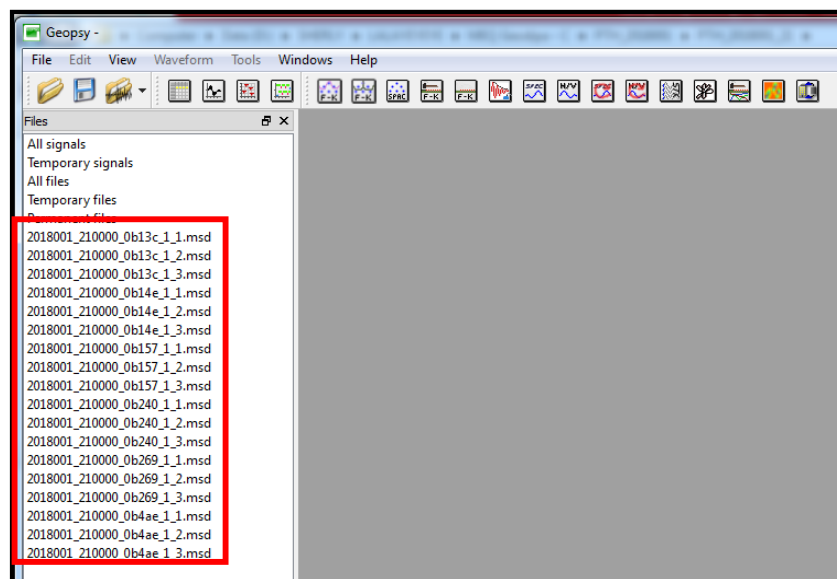
A. PENENTUAN KOMPONEN *EVENT* GEMPA MIKRO MENGUNAKAN PERANGKAT LUNAK GEOPSY

Dalam tahap ini perangkat lunak yang digunakan adalah perangkat lunak Geopsy. Berikut adalah tahap-tahap penentuan komponen *event* gempa mikro .

1. Masukkan (pilih) semua data rekaman seismograf yang akan ditentukan komponen *event* gempa mikro tersebut kedalam perangkat lunak Geopsy.

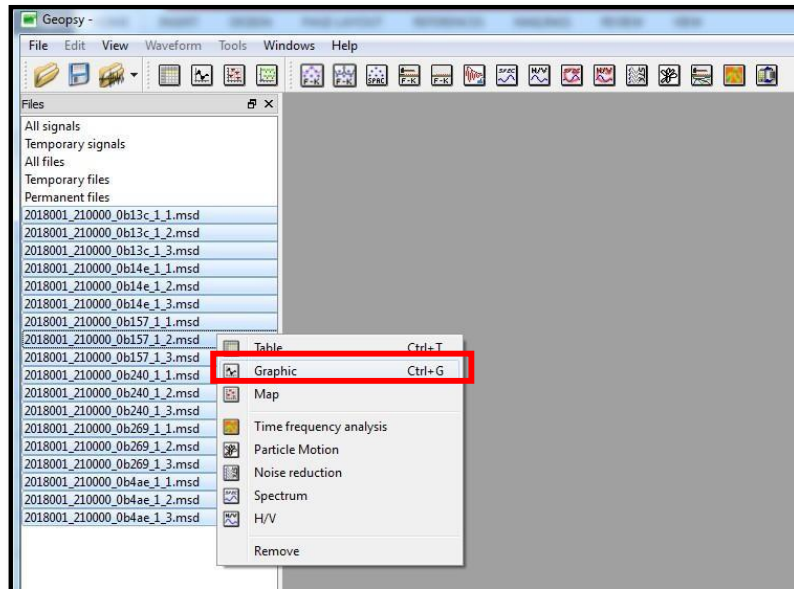


Berikut tampilan data yang telah berhasil masuk dalam perangkat lunak Geopsy.

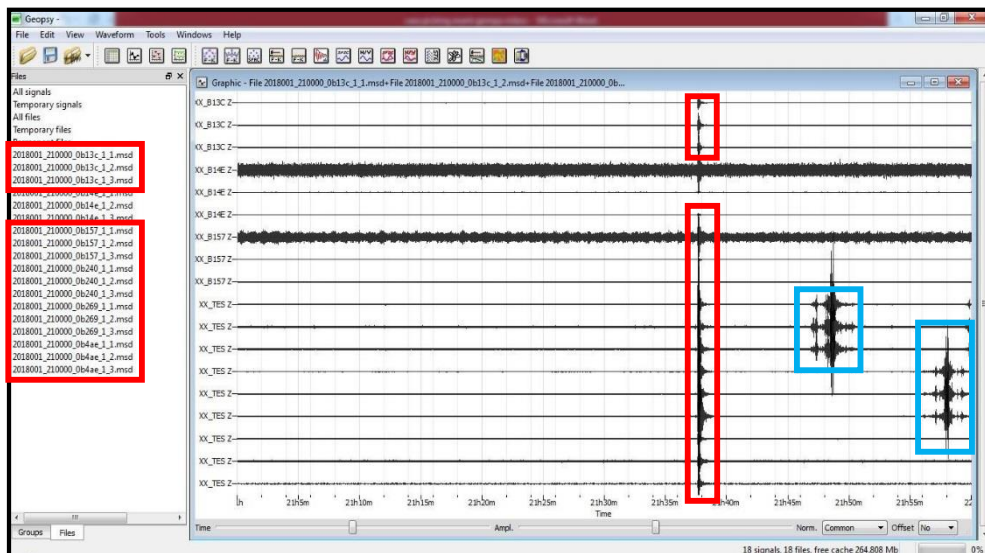


2. Lakukan analisis *event* gempa pada rekaman seismograf, apakah terdapat *event* gempa yang direkam (dicatat oleh minimal 3 stasiun pencatat), dan apakah kualitas rekaman gelombang gempa terdapat banyak *noise* atau tidak (*background noise*) pada data hasil perekaman.

Pilih semua rekaman pada setiap stasiun > klik kanan > *graphic*



Muncul grafik seperti gambar di bawah ini,



Keterangan :

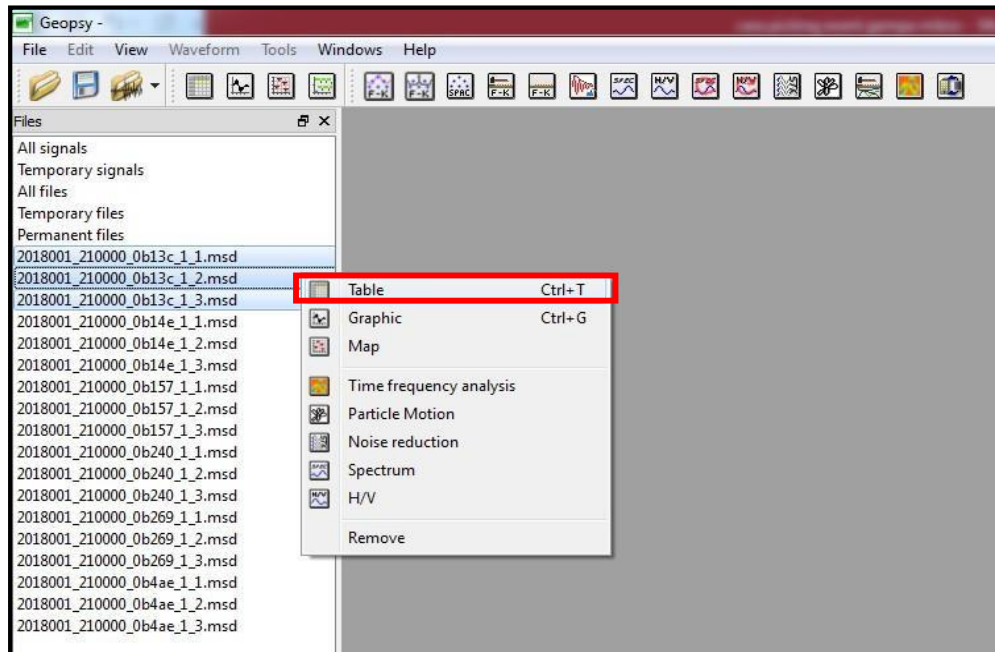
= stasiun dan *event* gempa yang digunakan.

= *event* yang tidak digunakan karena hanya direkam oleh satu stasiun.

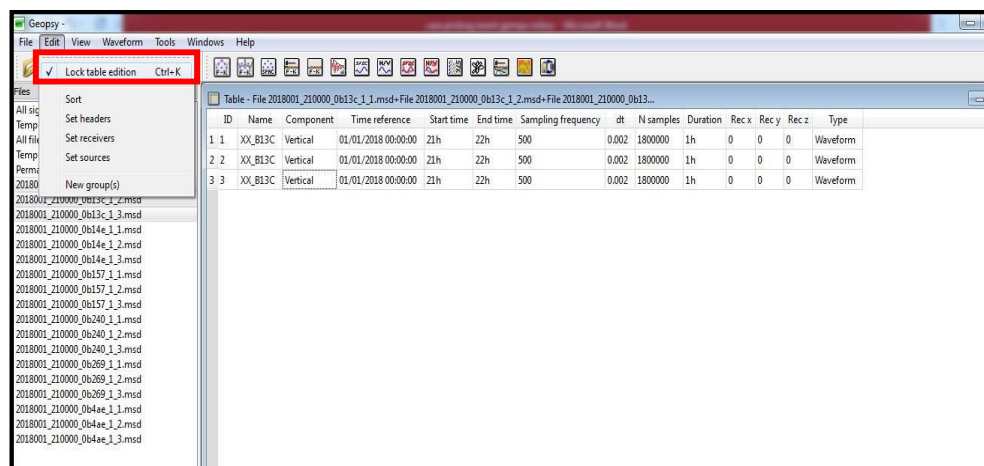
3. Pendefinisian komponen *vertical* dan *horizontal* pada masing-masing stasiun perekam gempa mikro.



Blok stasiun yang akan didefinisikan > klik kanan > *table*



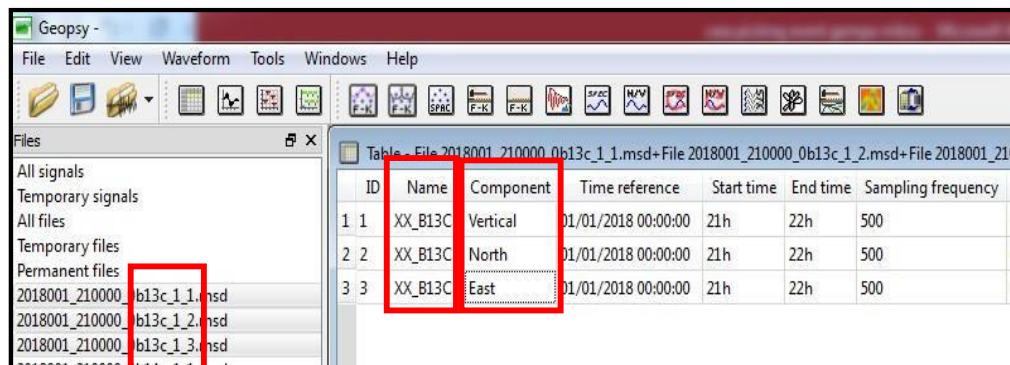
Klik *edit* > *Uncheck lock table edition*



Kemudian rubah informasi “*component*” menjadi *vertical*, *north*, *east*.

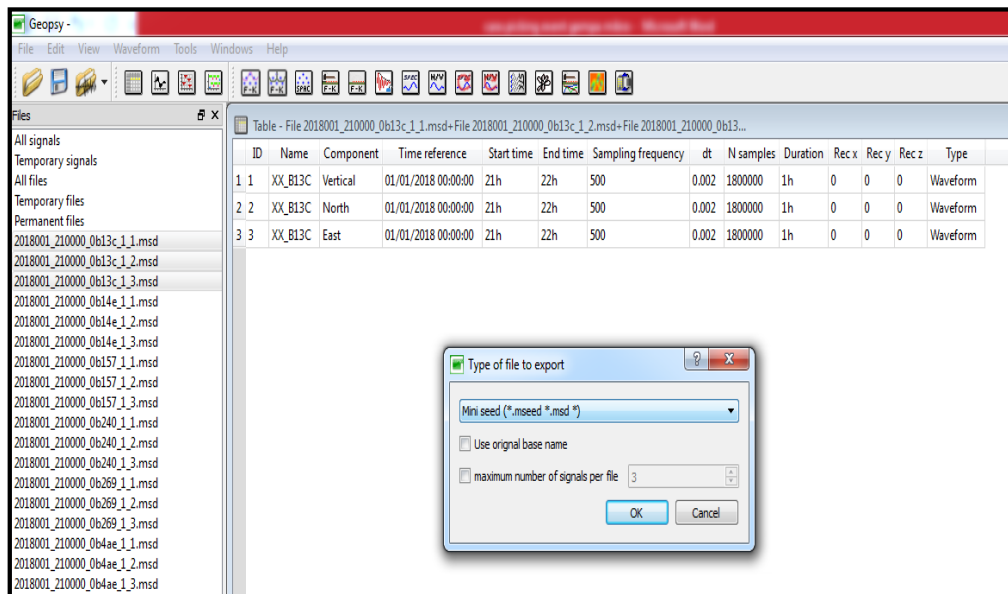
Rubah “*name*” sesuai file stasiun yang dibuka, apabila telah sesuai klik

edit > check lock table edition seperti pada gambar berikut :



4. *Export data dengan format .mseed agar dapat dibaca oleh perangkat lunak Seisgram2K70.*

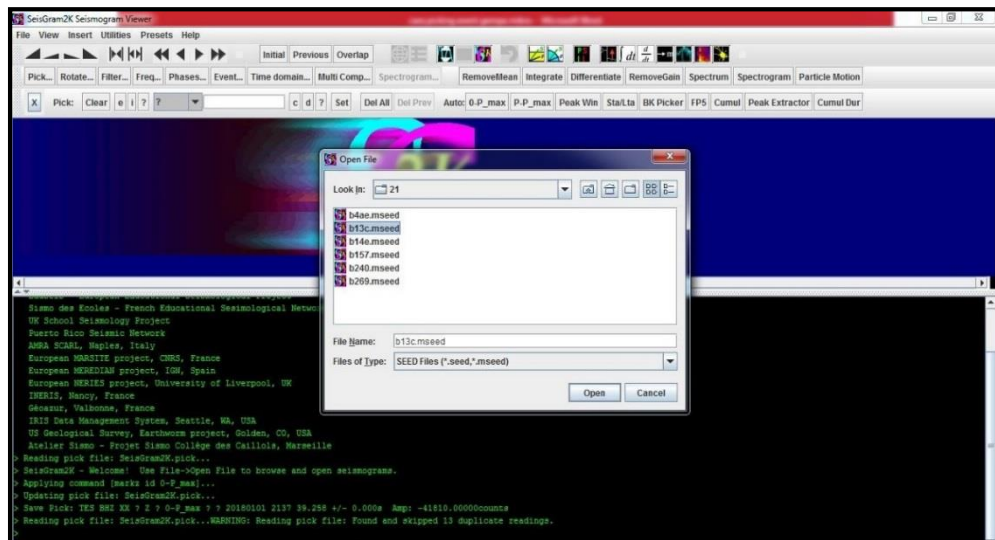
File > export > pilih .mseed > ok



B. PENENTUAN WAKTU TIBA (*PICKING ARRIVAL TIME*) GELOMBANG PRIMER (P) DAN SEKUNDER (S) MENGUNAKAN SEISGRAM2K70

Dalam tahap ini, yang perlu diperhatikan adalah kesamaan jam dan menit waktu tiba gelombang P dan S pada setiap *event* gempa mikro. Perhatikan saat menentukan waktu tiba gelombang P dan S, *event* gempa mikro tersebut terjadi dalam jam dan menit yang sama dan juga dengan detik yang berdekatan. Perhatikan langkah-langkah berikut untuk menentukan waktu tiba gelombang P dan S untuk setiap stasiun pengamat.

1. Buka *file* hasil *export* dari perangkat lunak Geopsy yang akan ditentukan waktu tiba gelombangnya menggunakan perangkat lunak Seisgram2K70



2. Penentuan waktu tiba gelombang P dilakukan pada komponen Z (*vertical*), Gelombang P adalah gelombang yang pertama kali terekam dan memiliki waktu perambatan relatif singkat. Sedangkan gelombang S memiliki ciri ada perubahan frekuensi setelah gelombang P dan ditentukan pada komponen N (*north*) atau E (*east*). Dalam proses penentuan waktu tiba gelombang P dan S, data yang digunakan adalah data *event* gempa yang memiliki nilai selisih waktu tiba gelombang S dan P ($t_s - t_p \leq 3$ detik).

Penentuan waktu tiba gelombang P dan S untuk setiap stasiun pengamat.
Perhatikan gambar berikut,



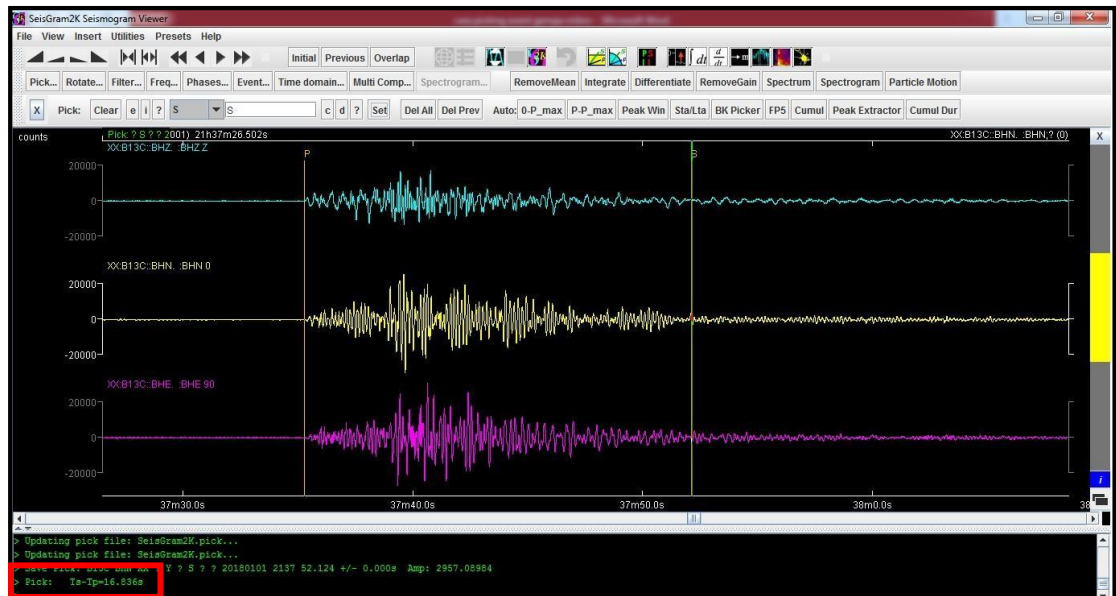
3. Mencatat data hasil penentuan waktu tiba gelombang P dan S ke dalam PRS (*Phase Report Sheet*)

FILE HOME INSERT PAGE LAYOUT FORMULAS DATA REVIEW VIEW										
Clipboard Font Alignment										
O17										
	B	C	Arrival Time Gelombang P			Arrival Time Gelombang S			ts-tp	T Durasi
	Stasiun	Hari Perekaman	Jam tp	Menit tp	Sekon tp	Jam ts	Menit ts	Sekon ts		
3	b13c	2018001_21	21	37	35.372	21	37	38.971	3.599	
4	b157		21	37		21	37			
5	b240		21	37		21	37			
6	b269		21	37		21	37			
7	b4ae		21	37		21	37			
8										

4. Mencari T durasi (Durasi /lama terjadinya gempa)

Cara menentukan lama gempa adalah mencari selisih antara waktu tiba gelombang Primer dan waktu akhir gempa dari gelombang yang berakhir pada latar belakang amplitudo yang sama dengan sebelum gelombang Primer tiba.

Klik *del prev*, sehingga tanda *picking* gelombang S hilang > klik pada gelombang terakhir tepat sebelum *amplitude* kembali seperti semula.



Kemudian masukan nilai yang ada di dalam kotak merah ke PRS kolom “T durasi”.

C. MENGHITUNG NILAI MAGNITUDO GEMPA

Magnitudo gempa adalah sebuah besaran yang menyatakan besarnya energi seismik yang dipancarkan oleh sumber gempa. Skala yang kerap digunakan untuk menyatakan magnitudo gempa ini adalah Skala Richter (*Richter Scale*).

Secara umum besar kecilnya energi suatu gempa sangat bergantung pada *amplitude* maksimum (*peak to peak*) dan durasi gempa. Semakin besar dan lama gempa itu maka makin besar energinya. Terdapat hubungan antara *magnitude* (M) dengan logaritma durasi/lama gempa (*Tdur*) secara linier, dan dirumuskan seperti di bawah ini:

$$M = C_1 + C_2 \log Tdur$$

Keterangan:

$$C_1 = -0.860$$

$$C_2 = 1,049$$

$$Tdur = \text{durasi/lama gempa (s)}$$

Besarnya tetapan di atas dicari melalui regresi linier antara logaritma lama gempa dengan magnitudo (Suandayani, 2017). Cara menentukan lama gempa adalah mencari selisih antara waktu tiba gelombang Primer dan waktu akhir gempa dari gelombang yang berakhir pada latar belakang amplitudo yang sama dengan sebelum gelombang Primer tiba.

D. PENENTUAN LOKASI AWAL HIPOSENTER GEMPA BUMI MIKRO MENGGUNAKAN METODE *GEIGER* (*GAD*)

Metode *Geiger* merupakan metode penentuan hiposenter tunggal, prinsip yang digunakan yakni dengan menghitung residual antara waktu perekaman (*observed*) dan waktu perhitungan (*calculated*) (Rohadi, dkk. 2012). Waktu perekaman (*observed*) merupakan waktu tempuh gelombang seismik pada stasiun ke-*i* dari hiposenter. Sedangkan waktu perhitungan (*calculated*) merupakan waktu tempuh yang dikalkulasi berdasarkan model kecepatan bawah permukaan.

$$\begin{aligned} r_i &= t_{obs}^i - t_{cal}^i \\ &= \left(\frac{\partial t_i^{cal}}{\partial x_i} \right) \Delta x + \left(\frac{\partial t_i^{cal}}{\partial y_i} \right) \Delta y + \left(\frac{\partial t_i^{cal}}{\partial z_i} \right) \Delta z + \Delta t_0 \end{aligned}$$

dengan :

r_i = selisih antara hasil observasi dan hasil kalkulasi pada stasiun ke-*i*

$\left(\frac{\partial t_i^{cal}}{\partial x} \right), \left(\frac{\partial t_i^{cal}}{\partial y} \right), \left(\frac{\partial t_i^{cal}}{\partial z} \right)$ = turunan parsial waktu tempuh kalkulasi terhadap

lokasi hiposenter inisial.

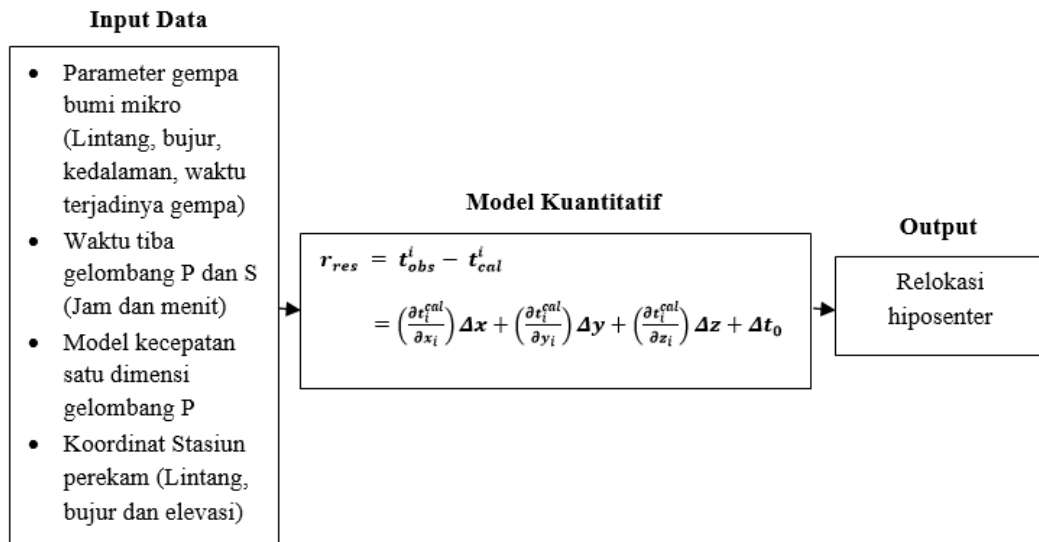
$\partial_x, \partial_y, \partial_z, \partial_t$ = perubahan lokasi hiposenter dan waktu tiba.

Metode *Geiger* hanya valid digunakan maksimum untuk 6 lapisan dan membutuhkan minimal data dari 4 fasa gelombang (Madrinovella, dkk. 2012).

Menurut hasil penelitian Madrinovella, dkk. (2012) hasil penentuan lokasi hiposenter menggunakan metode *Geiger* lebih banyak yang sesuai dengan data keadaan geologi (lebih dekat dengan sumber, yaitu sesar dan gunung api) dibandingkan dengan menggunakan metode tiga lingkaran. Namun, perhitungan dengan menggunakan metode tersebut umumnya masih mengandung kesalahan dari struktur kecepatan gelombang seismik yang tidak termodelkan (Rohadi,

dkk. 2012). Oleh karena itu, kelemahan metode tersebut membutuhkan pembaharuan model struktur kecepatan gelombang 1-D.

Parameter gempa bumi mikro yang dihasilkan oleh metode ini diantaranya adalah waktu terjadinya gempa (*origin time*), nilai *RMS error*, koordinat dan kedalaman hiposenter gempa bumi mikro seperti pada gambar berikut :



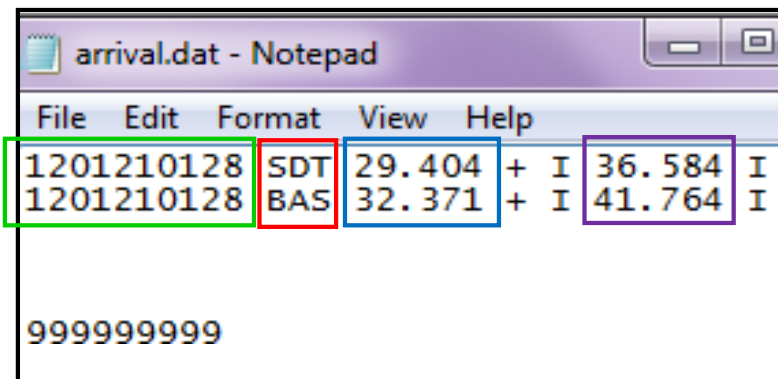
Gambar skema perancangan metode inversi menggunakan metode *Geiger*.

Terdapat 4 *file* yang dalam penentuan lokasi hiposenter inisial menggunakan metode *Geiger* (GAD) :

- *File* yang berisi informasi tentang kode stasiun dan koordinat stasiun pengamat (*station.dat*)
- *File* yang berisi informasi tentang model kecepatan gelombang 1-D (*velocity.dat*)
- *File* yang berisi informasi tentang waktu tiba (*arrival time*) gelombang P dan S untuk setiap stasiun pengamat (*arrival.dat*)
- *File* yang berisi lokasi hiposenter gempa bumi inisial hasil inversi menggunakan metode *Geiger* (*Result.dat*) (Nishi, 2005).

Berikut *file* yang harus diperhatikan dalam metode *Geiger* (GAD):

File Arrival.dat



Keterangan :

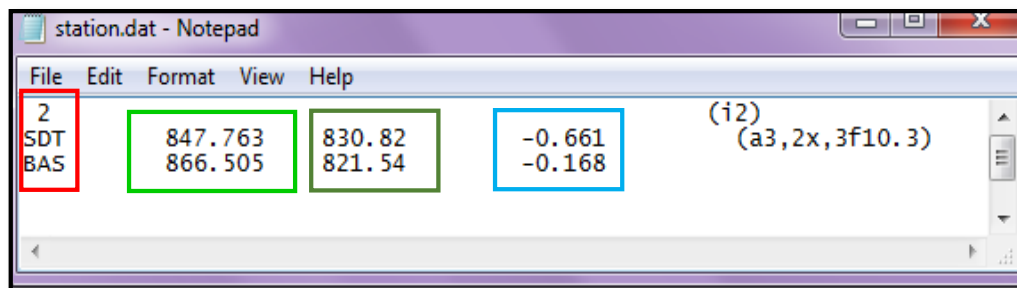
Tahun, bulan dan tanggal (*Origin Time*)
jam, dan menit (waktu tiba gel. P dan S)

Kode stasiun pengamat gempa

Detik (waktu tiba gelombang Primer)

Detik (waktu tiba gelombang Sekunder)

File Station.dat



Keterangan :

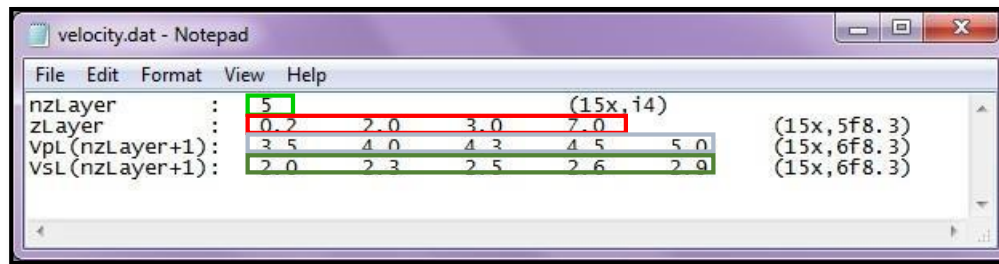
Jumlah stasiun yang digunakan dan kode stasiun

Latitude stasiun pengamat gempa (UTM)

Longitude stasiun pengamat gempa (UTM)

Elevasi stasiun pengamat gempa

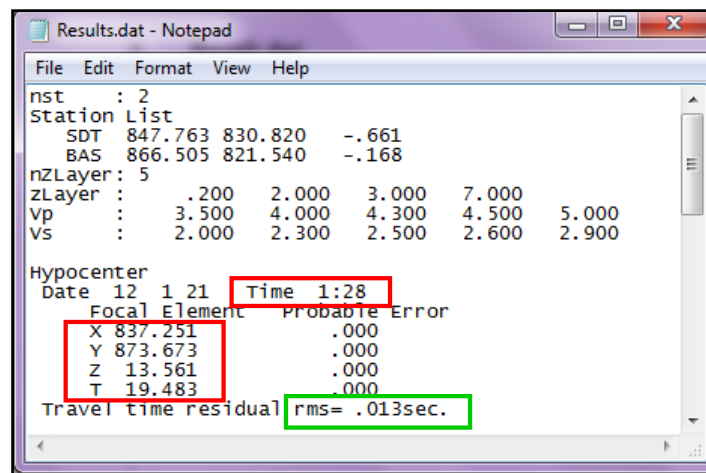
File Velocity.dat



Keterangan :

Jumlah lapisan	Nilai-nilai kecepatan gelombang P
Ketebalan lapisan	Nilai-nilai kecepatan gelombang S

File Result.dat



Keterangan :

Hasil inversi
X : Latitude
Y : Longitude
Z : kedalaman
T : detik origin time
Nilai RMS Error

E. PENINGKATAN KEAKURASIAN PENENTUAN WAKTU TIBA GELOMBANG PRIMER (P) DAN SEKUNDER (S) MENGUNAKAN ALGORITMA S-TRANSFORM

Penggunaan identifikasi *arrival times* gelombang P dan gelombang S dari *event* gempa bumi mikro dengan S-Transform dilakukan dengan proses komputasi. Menggunakan *script* yang telah dibuat dengan MATLAB.

- a. *Script* yang telah dibuat di *run* terlebih dahulu.

Berikut adalah *script* untuk pengolahan S-Transform :

```
clear all
clc, close all
%Read Data File
[filename, pathname]= uigetfile ({ '*.mseed' }, 'File Selector', 'Select
file(s)', 'MultiSelect', 'on'); pathname = repmat (pathname,length
(filename),1); filename =
[pathname char(filename)'];
a = ReadMSEEDFast (filename (1,:)) %Komponen Vertikal b =
ReadMSEEDFast (filename (2,:))%Komponen North
c = ReadMSEEDFast (filename (3,:))%Komponen East
%%
%%Plot Data Komponen Z atau Vertikal

time=0:1/a.sampleRate:(a.numberOfSamples-1)*(1/a.sampleRate);
time2=0:1/b.sampleRate:(b.numberOfSamples-1)*(1/b.sampleRate);
time_3=0:1/c.sampleRate:(c.numberOfSamples-1)*(1/c.sampleRate);
figure (1)
subplot (3,1,1)
plot (time , a.data)% (1:numel(a.data)) axis tight xlabel ('Waktu (s)')
ylabel
('Amplitudo')
```

```

title ('Data Seismogram Komponen Vertikal') subplot (3,1,2) plot
(time2 , b.data)%(1:numel(a.data)) axis tight
xlabel ('Waktu (s)') ylabel ('Amplitudo')
title ('Data Seismogram Komponen North') subplot (3,1,3) plot (time_3
, c.data)%(1:numel(a.data)) axis tight
xlabel ('Waktu (s)') ylabel ('Amplitudo')
title ('Data Seismogram Komponen East')
%Time windowing 1 pada Komponen Vertikal [x,y] = ginput (2);
for i=1:2
selisih_time = time-x(i); [~,pilih(i)] = min(abs(selisih_time));
end time1=time(pilih(1):pilih(2)); data1=a.data(pilih(1):pilih(2));
%Time windowing 1 pada Komponen Vertikal [x1,y1] = ginput (2);
for i=1:2
selisih_time1 = time2-x1(i); [~,pilih(i)] = min(abs(selisih_time1));
end time3=time2(pilih(1):pilih(2)); data3=b.data(pilih(1):pilih(2));

%Plot hasil windowing figure (2)
%Komponen Vertikal subplot(3,2,1) plot (time1, data1) axis tight
xlabel ('Waktu (s)') ylabel ('Amplitudo')
title ('Time Windowing Seismogram Komponen Vertikal') hold on
%Komponen N/E subplot(3,2,2) plot (time3, data3) axis tight
xlabel ('Waktu (s)') ylabel ('Amplitudo')
title ('Time Windowing Seismogram Komponen North/East')

%Time windowing 2 pada Komponen Vertikal [x,y] = ginput (2);
for i=1:2
selisih_time2 = time1-x(i); [~,pilih(i)] = min(abs(selisih_time2));
end time4=time1(pilih(1):pilih(2)); data4=data1(pilih(1):pilih(2));
subplot(3,2,3) plot (time4, data4) axis tight
xlabel ('Waktu (s)') ylabel ('Amplitudo')
title ('Time Windowing Seismogram Komponen Vertikal') hold on

```

```

%% Pengolahan ST Komponen Vertikal
[st,t,f] = st(data4,0,600,1/500,10); %atur frekuensi sampling dan
periodenya sesuai dengan reading
% figure, pcolor(t,f,abs(st))
%timeseries,minfreq,maxfreq,samplingrate,freqsamplingrate t =
time4; z = abs(st); subplot
(3,2,5)
pcolor(t,f,abs(st)); shading interp; hold on contour (t,f,abs(st),'r');
xlabel ('Waktu (s)') ylabel ('Frekuensi')
title ('S-transform') zoom on zoom off
zoom out zoom reset zoom xon zoom yon hold on

%% %Time windowing 2 pada Komponen N/E [x,y] = ginput (2);
for i=1:2
selisih_time3 = time3-x(i); [~,pilih(i)] = min(abs(selisih_time3));
end time5=time3(pilih(1):pilih(2)); data5=data3(pilih(1):pilih(2));
subplot(3,2,4) plot (time5, data5) axis tight
xlabel ('Waktu (s)') ylabel ('Amplitudo')
title ('Time Windowing Seismogram Komponen North/East')

%%Pengolahan ST untuk Komponen N/E
[st2,t2,f2] = st2(data5,0,600,1/500,10); %atur frekuensi sampling dan
periodenya sesuai dengan reading
% figure, pcolor(t,f,abs(st))
%timeseries,minfreq,maxfreq,samplingrate,freqsamplingrate t2 = time5;
z2 = abs(st2); subplot
(3,2,6)
pcolor(t2,f2,abs(st2)); shading interp; hold on contour (t2,f2,abs(st2),'r');
xlabel ('Waktu (s)')
ylabel ('Frekuensi') title ('S- transform') zoom on
zoom off zoom out zoom reset zoom xon zoom yon hold on

```

```

%% Picking Arrival Time pada Komponen Vertikal [x y]=ginput(1) x1 =
x(1,1)
plot ([x1 x1],[0 y],'Color',[1 1 0])

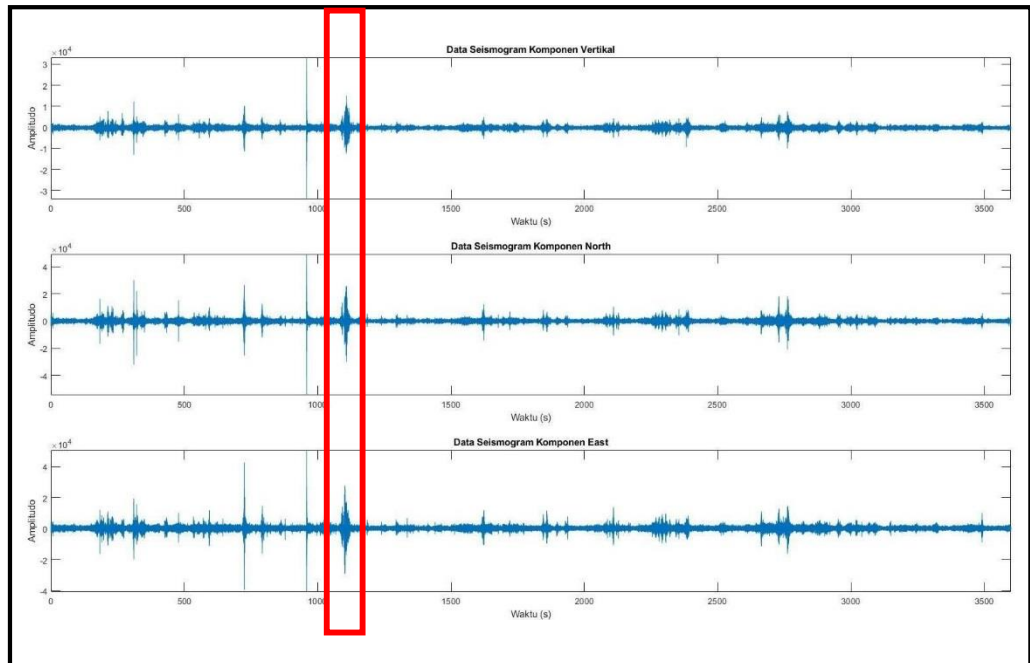
x=x/3600
x_j = floor (x) x_m=(x- x_j)*60 x_m1=floor(x_m) x_s=(x_m-x_m1)*60

[x_j x_m1 x_s]
annotation ('textbox', [0.25, 0.050, 0, 0],'String',"MM : SS =" + x_m1
+ ":" + x_s,'FitBoxToText','on','FontSize',9)
%%Picking Arrival Time pada Komponen N/E [x y]=ginput(1)
x2 = x(1,1)
plot ([x2 x2],[0 y],'Color',[1 1 0]) x2=x2/3600
x_j2 = floor
(x2) x_m2=(x2-x_j2)*60
x_m3=floor(x_m2)
x_s2=(x_m2-x_m3)*60
[x_j2 x_m3 x_s2]
annotation ('textbox', [0.70, 0.050, 0, 0],'String',"MM : SS =" + x_m3
+ ":" + x_s2,'FitBoxToText','on','FontSize',9)

```

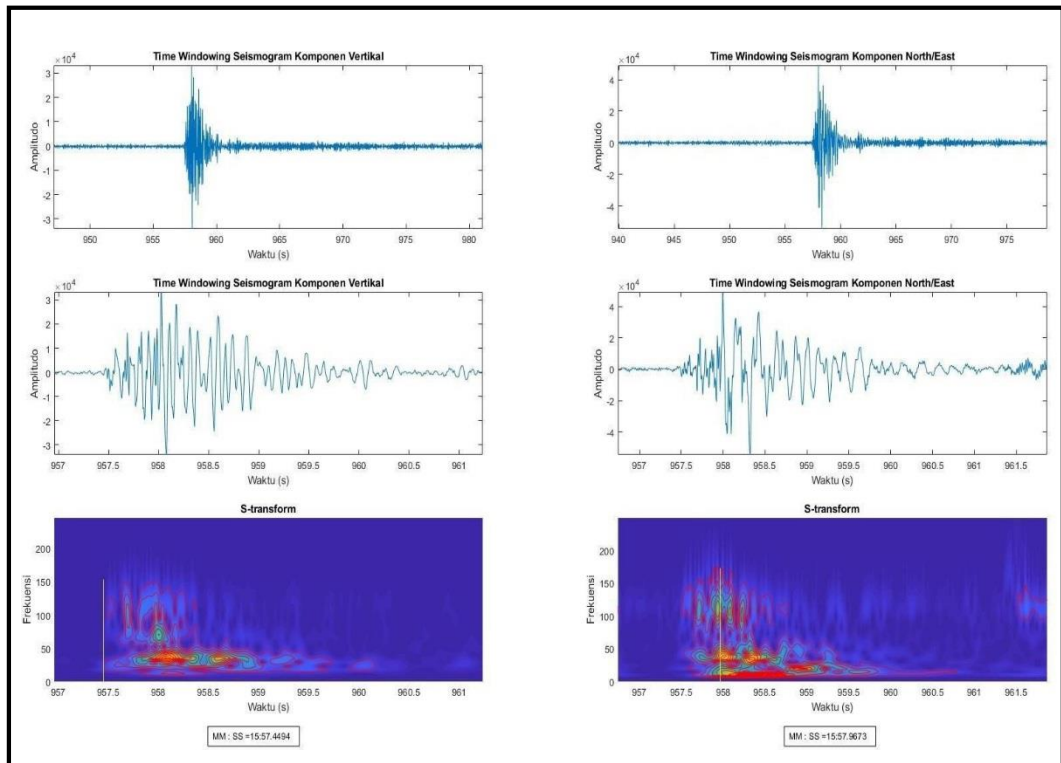
- b. Pilih 3 data yang merupakan komponen-komponen (*East*, *North*, dan *Vertical*) yang berupa format .mseed telah disiapkan. Dari hasil tampilan dengan durasi 1 jam tersebut dilakukan *time windowing* terhadap komponen vertikal dan *North/East* domain waktu yang terdapat *event* gempa bumi mikro.

- c. Data *event* gempa bumi yang akan digunakan telah diketahui karena telah dilakukan proses *picking* terlebih dulu secara kualitatif sehingga mempermudah mengetahui event gempa bumi mikro. Berikut adalah tampilan data seismogram (Kotak dengan garis lurus berwarna merah merupakan data yang dilakukan *time windowing*).



- d. Hasil dari *time windowing* pada kedua komponen tersebut ditampilkan kembali untuk dilakukan *time windowing* kembali untuk mempermudah proses komputasi dalam tahap S-Transform. *Time windowing* dengan terdapatnya *function* dari *script* untuk dapat memilih waktu yang akan di-*cut*.
- e. Terdapat baris pertama yang menunjukkan hasil *time windowing* dari gambar pada komponen Z dan N/E, baris kedua menunjukkan tampilan data seismogram yang terdapat *event* gempa bumi mikro yang telah dilakukan *time windowing* kembali pada baris pertama dan dari *time windowing* baris kedua yang akan selanjutnya dilakukan proses komputasi untuk menghasilkan S-Transform.

f. Perhatikan gambar berikut,



g. Hasil akhir berupa tampilan S-Transform yang ditampilkan pada gambar diatas, baris ketiga. Kemudian dilakukan *picking arrival time* gelombang P dari hasil komponen *vertical* dan gelombang S pada komponen *North/East*. Pada hasil S-Transform, terdapat garis berwarna merah yang menunjukkan kontur pada spektrum amplitudo untuk mempermudah mengetahui adanya peningkatan amplitudo. Hasil *picking* pada masing-masing komponen berupa waktu (dalam menit dan detik) tersebut ditampilkan kolom bagian bawah S-Transform.

F. UJI LOKASI HIPOSENTER GEMPA BUMI MIKRO MENGGUNAKAN METODE *COUPLED VELOCITY-HYPOCENTER* (VELEST 3.3)

Uji lokasi hiposenter lanjutan yang dilakukan dalam modul ini adalah uji lokasi hiposenter yang dilakukan secara simultan menggunakan metode *Coupled Velocity-Hypocenter* (Kissling, dkk. 1995). Metode ini merupakan metode relokasi gempa dengan dan koreksi stasiun secara bersamaan menggunakan prinsip metode *Geiger*, model kecepatan hasil dari metode ini diperbaharui menggunakan persamaan *Kissling* berikut,

$$\begin{aligned} r_{res} &= t_{obs}^i - t_{cal}^i \\ &= \sum_{k=1}^4 \frac{\partial f}{\partial h_k} \Delta h_k + \sum_{i=1}^n \frac{\partial f}{\partial m_i} \Delta m_i + e \end{aligned}$$

Keterangan :

r_{res} = residual waktu tempuh observasi dan waktu tempuh kalkulasi

f = fungsi terhadap s, h, m. S = lokasi stasiun, h = lokasi hiposenter dan waktu tiba, m= model kecepatan

k = jumlah hiposenter

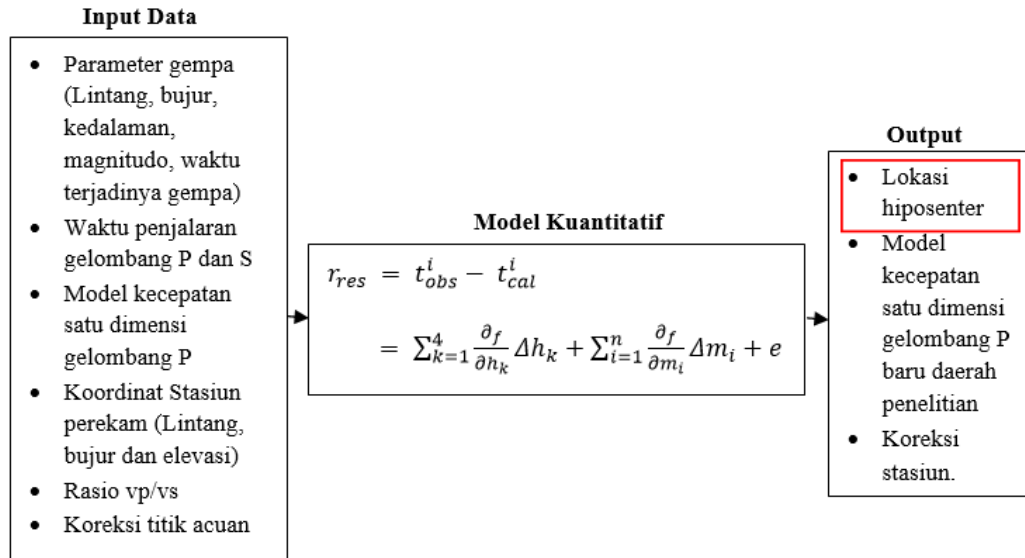
n = jumlah parameter model kecepatan dan mewakili semua kesalahan termasuk kesalahan perekaman, perhitungan dan kesalahan model kecepatan

i = jumlah stasiun

e = koreksi stasiun.

Metode *Coupled Velocity-Hypocenter* merupakan metode inversi *travel time*. Data waktu penjalaran gelombang (*travel time*) yang digunakan dalam penelitian merupakan selisih antara waktu tiba gelombang dengan waktu terjadinya gempa. Parameter *input* yang dibutuhkan dalam metode ini antara lain data koordinat serta

elevasi stasiun perekam gelombang seismik, model kecepatan satu dimensi gelombang P, data waktu penjalaran gelombang P dan S untuk setiap *event* gempa, nilai rasio V_p/V_s , dan nilai elevasi rata-rata stasiun perekam gelombang sismik, seperti yang digambarkan pada gambar berikut:



Gambar skema perancangan metode inversi menggunakan metode *Coupled Velocity-Hypocenter*

Parameter-parameter tersebut diolah sehingga menghasilkan parameter *output* dan parameter terkoreksi hasil uji lokasi menggunakan metode *Coupled Velocity-Hypocenter*. Hasil uji lokasi hiposenter gempa bumi mikro (koordinat dan kedalaman), nilai *RMS error*, nilai *GAP*, model kecepatan gelombang P 1-D hasil inversi dan nilai koreksi stasiun. Sedangkan untuk parameter terkoreksi dari metode ini terdiri dari, model kecepatan satu dimensi gelombang P daerah penelitian, lokasi hiposenter, nilai koreksi stasiun serta waktu terjadinya gempa bumi mikro.

Kedua distribusi lokasi hiposenter gempa bumi mikro baik hasil penentuan menggunakan metode *Geiger* ataupun hasil uji lokasi menggunakan metode *Coupled Velocity-Hypocenter* dipetakan/ divisualisasikan sehingga dapat dilakukan identifikasi dan analisa lokasi hiposenter gempa bumi mikro di daerah penelitian.

Metode *Coupled Velocity-Hypocenter* dapat digunakan untuk menyelesaikan permasalahan antara lain gempa lokal, eksplorasi lapangan tambang, dan seismik aktif (Rachman dan Nugraha, 2012). Metode ini telah digunakan untuk relokasi hiposenter dan pembaharuan kecepatan, diantaranya oleh (Rachman dan Nugraha 2012; Rochman, dkk. 2012; Garini, dkk. 2014; Akbar, dkk. 2015; Utama dan Garini, 2018).

Pada *processing* data MEQ menggunakan VELEST 3.3, terdapat beberapa data *input* dengan format *file* sebagai berikut:

- *File* dengan format .cmn merupakan *file* yang berisi parameter kontrol
- *File* dengan format .sta merupakan *file* yang berisi informasi stasiun pengamat
- *File* dengan format .mod merupakan *file* model kecepatan 1-D inisial
- *File* dengan format .cnv merupakan *file* data waktu tempuh (*Travel time*) gempa
- *File* dengan format .out merupakan *file* hasil inversi (hiposenter, *origin time*, koreksi stasiun, serta model kecepatan 1-D hasil inversi daerah penelitian) (Kissling, 1995)

File model kecepatan gelombang Primer (P) 1-D inisial (.mod)

CALAVERAS1D-model1 (mod1.1 EK280993)		
09	3.28	0.0
	3.46	1.0
	3.18	6.0
	2.95	10.0
	5.59	15.0
	5.10	20.0
	6.68	25.0
	6.98	30.0
	9.07	36.0

Keterangan :

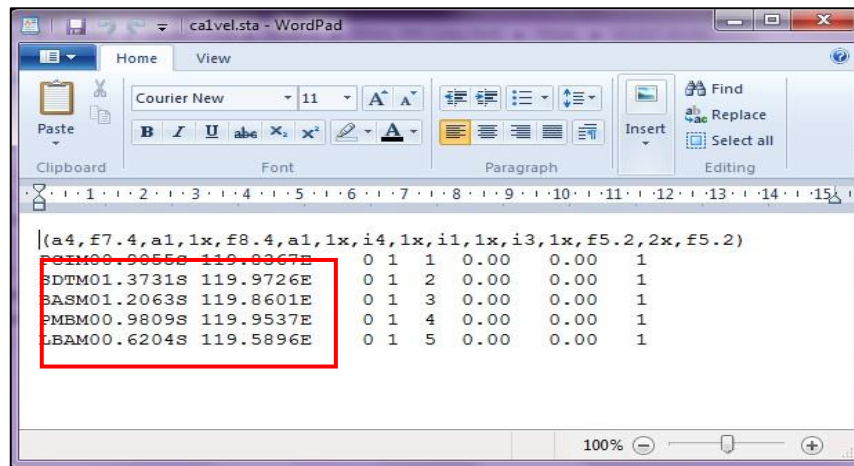
Stasiun referensi

Jumlah lapisan

Nilai-nilai kecepatan gelombang P

Kedalaman

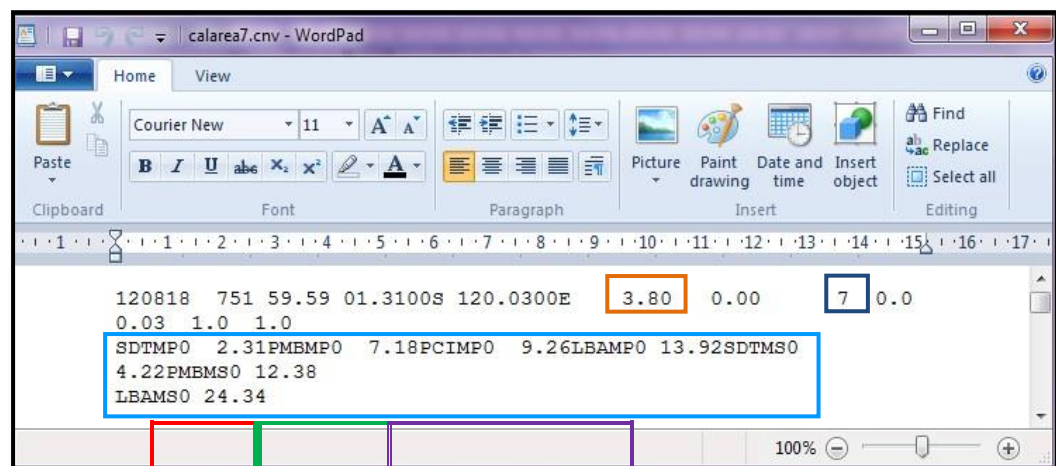
File stasiun pengamat gempa (.sta)



Keterangan :

Kode nama, *latitude* dan *longitude* stasiun pencatat gempa yang digunakan

File data waktu tempuh (*travel time*) gempa bumi (.cnv)



Keterangan :

Tahun, bulan dan tanggal terjadinya gempa

Jam, menit dan detik terjadinya gempa

Latitude dan *longitude* gempa bumi mikro

Magnitudo

Kedalaman

Stasiun pencatat, tipe gelombang (P atau S) dan *travel time* gelombang (P maupun S)

File Prameter kontrol (.cmn)

```

velest - Notepad
File Edit Format View Help
***** CONTROL-FILE FOR PROGRAM V E L E S T (28-SEPT1993) *****
***
*** ( all lines starting with * are ignored! )
*** ( where no filename is specified,
*** leave the line BLANK. Do NOT delete!)
***
*** next line contains a title (printed on output):
*** CALAVERAS area7 1.10.93 EK startmodell vers. 1.1
*** starting model 1.1 based on castillo and Ellsworth 1993, JGR
*** olar olon icoordsystem zshift itrial ztrial ised
*** -07.1917 107.4147 0 -1.970 0 0.00 0
***
*** neqs nshot rotate
*** 457 0 0.0
***
*** isingle iresolcalc
*** 0 0
***
*** dmax itopo zmin veladj zadj lowveloclay
*** 360 0 -0.20 0.20 5.00 0
***
*** nsp swtfac vpvs nmod
*** 1 0.00 1.299 1
***

```

Keterangan :

Latitude dan Longitude
stasiun referensi

Jumlah data
gempa bumi

Elevasi rata-rata
stasiun pengamat

Nilai rasio
vp/vs

File model kecepatan 1-D gelombang P hasil inversi daerah penelitian (.mod)

output model:		
	6	
2.61	-3.00	1.000
2.70	-1.00	1.000
2.81	0.00	1.000
2.87	1.00	1.000
2.89	2.00	1.000
3.50	5.00	1.000

Keterangan :

Kedalaman

Kecepatan

Jumlah lapisan

File hasil inversi/relokasi (.out)

output final hypocenters ...												
	date	origin	latitude	longitude	depth	mag	no	rms	x	y	z	
1	120818	0751	57.84	1.3097S	120.0246E	6.27	0.00	4	0.543	-7.89	-36.35	6.27
2	120818	0753	11.13	1.3056S	120.0371E	3.82	0.00	3	0.259	-9.28	-35.90	3.82
3	120818	0812	34.28	1.3191S	120.0496E	7.03	0.00	5	0.446	-10.67	-37.39	7.03
4	120319	0504	52.32	0.8011S	119.9121E	8.22	0.00	4	0.377	4.63	19.88	8.22
5	120402	0219	37.18	0.8525S	119.8755E	8.65	0.00	4	0.607	8.70	14.20	8.65
6	120412	2250	21.35	1.2810S	120.0679E	4.79	0.00	5	0.405	-12.71	-33.19	4.79
7	120514	1640	11.00	1.4754S	120.1309E	2.98	0.00	4	0.413	-19.72	-54.68	2.98
8	120802	1855	9.54	1.3079S	120.0017E	6.25	0.00	4	0.587	-5.34	-36.16	6.25
9	120818	0744	58.25	1.3182S	120.0447E	7.44	0.00	5	0.447	-10.13	-37.29	7.44
10	120818	0752	24.82	1.3212S	120.0635E	6.96	0.00	4	0.498	-12.22	-37.63	6.96
11	120818	0941	48.78	1.3074S	120.0396E	7.93	0.00	4	0.429	-9.56	-36.10	7.93
12	120818	0958	3.82	1.3259S	119.9435E	3.34	0.00	4	0.416	1.14	-38.14	3.34
13	120818	1020	11.26	1.3277S	120.0281E	7.02	0.00	4	0.509	-8.28	-38.35	7.02
14	120818	1347	47.73	1.3101S	119.9547E	5.60	0.00	4	0.490	-0.11	-36.41	5.60
15	120818	1519	3.83	1.3015S	120.0633E	6.52	0.00	4	0.380	-12.20	-35.45	6.52
16	120818	1548	10.22	1.3062S	120.1083E	5.20	0.00	3	0.351	-17.21	-35.97	5.20
17	120818	1620	22.75	1.3264S	120.1058E	7.23	0.00	3	0.418	-16.92	-38.21	7.23
18	120818	1706	39.33	1.3193S	120.0885E	6.61	0.00	3	0.424	-15.00	-37.42	6.61
19	120818	1736	22.49	1.3103S	120.1016E	7.33	0.00	3	0.464	-16.46	-36.42	7.33
20	120818	1813	30.58	1.3259S	120.0798E	6.02	0.00	3	0.406	-14.04	-38.15	6.02
21	120818	1818	4.87	1.3201S	119.9975E	4.62	0.00	3	0.459	-4.87	-37.51	4.62
22	120818	1823	1.64	1.3376S	120.1027E	6.86	0.00	3	0.422	-16.58	-39.44	6.86
23	120818	2042	55.94	1.3697S	120.0774E	6.66	0.00	3	0.321	-13.76	-42.99	6.66
24	120818	2051	52.03	1.3139S	119.9824E	0.59	0.00	3	0.289	-3.19	-36.82	0.59
25	120818	2117	41.91	1.3289S	119.9777E	4.32	0.00	3	0.450	-2.68	-38.48	4.32
26	120819	0517	48.70	1.3161S	120.0948E	6.99	0.00	3	0.456	-15.71	-37.06	6.99
27	120819	0759	26.11	1.3108S	120.1140E	7.16	0.00	3	0.426	-17.84	-36.48	7.16
28	120820	0525	28.00	1.3327S	119.9061E	4.31	0.00	3	0.589	5.30	-38.90	4.31
29	120820	1920	15.33	1.3435S	120.0303E	6.95	0.00	3	0.295	-8.52	-40.09	6.95
30	120821	0543	55.37	1.3236S	120.0341E	5.73	0.00	4	0.408	-8.95	-37.90	5.73
31	120824	0735	15.76	1.3068S	120.0281E	6.62	0.00	3	0.540	-8.28	-36.04	6.62
32	120824	0742	29.81	1.3310S	120.0626E	6.51	0.00	4	0.333	-12.12	-38.72	6.51
33	120904	1114	49.21	0.5295S	119.8133E	6.03	0.00	4	0.257	15.63	49.91	6.03
34	120905	1901	20.15	1.0125S	119.8339E	4.19	0.00	4	0.483	13.34	-3.50	4.19
35	120911	1025	6.83	1.0184S	119.8224E	4.17	0.00	4	0.421	14.62	-4.15	4.17
36	120919	1914	5.48	0.5577S	119.7949E	4.42	0.00	3	0.339	17.67	46.79	4.42
37	120919	1920	33.01	0.5512S	119.8007E	6.59	0.00	4	0.248	17.03	47.51	6.59
38	120924	2203	45.05	1.4044S	119.7559E	0.17	0.00	4	0.672	22.02	-46.83	0.17
39	121219	1238	57.79	1.4232S	120.0708E	5.17	0.00	4	0.285	-13.03	-48.90	5.17
40	121220	1059	44.14	1.2958S	120.0003E	6.90	0.00	4	0.533	-5.19	-34.82	6.90
41	120126	0647	17.04	1.3640S	120.0781E	7.60	0.00	4	0.529	-13.85	-42.37	7.60
42	120818	1813	49.30	1.3012S	120.1121E	7.27	0.00	2	0.564	-17.63	-35.42	7.27

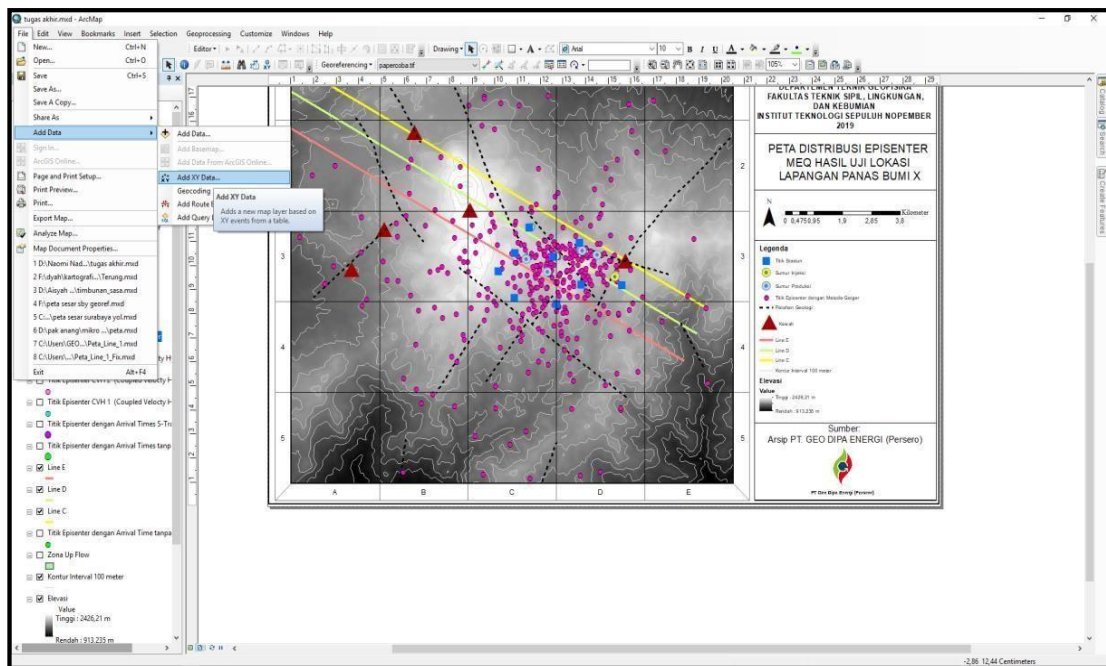
GAP of final epicenters:

Event#	-> GAP	Event#	-> GAP	Event#	-> GAP	Event#	-> GAP	Event#	-> GAP
1	-> 232	2	-> 238	3	-> 251	4	-> 226	5	-> 199
6	-> 247	7	-> 334	8	-> 213	9	-> 248	10	-> 258
11	-> 240	12	-> 324	13	-> 318	14	-> 318	15	-> 313
16	-> 317	17	-> 319	18	-> 318	19	-> 318	20	-> 319
21	-> 317	22	-> 321	23	-> 324	24	-> 316	25	-> 319
26	-> 317	27	-> 319	28	-> 329	29	-> 341	30	-> 317
31	-> 313	32	-> 319	33	-> 273	34	-> 156	35	-> 162
36	-> 265	37	-> 268	38	-> 267	39	-> 330	40	-> 311
41	-> 284	42	-> 349						

GAPS were between 156 and 349
(average GAP was 287)

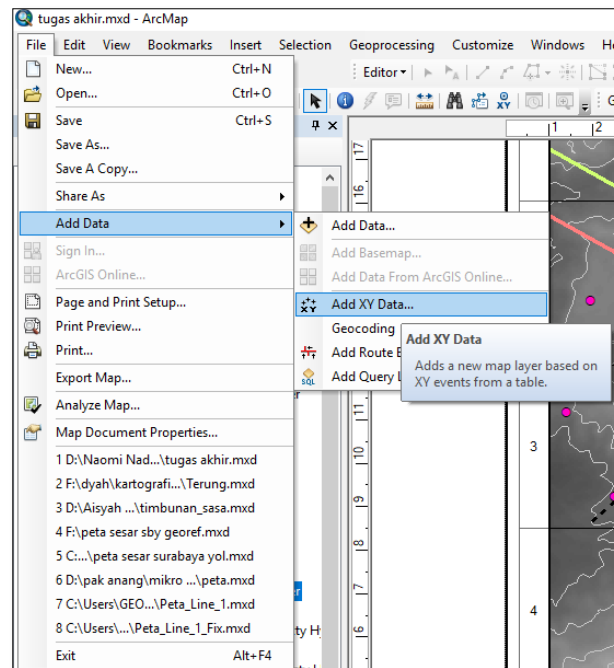
G. PLOTTING LOKASI EPISENTER GEMPA BUMI MIKRO MENGUNAKAN PERANGKAT LUNAK ARCGIS

Pada tahap ini digunakan perangkat lunak ArcGis. Pada *file* ini sudah terdapat data mendukung untuk penampilan peta ini yang dapat dilihat pada gambar berikut (selain titik episenter).



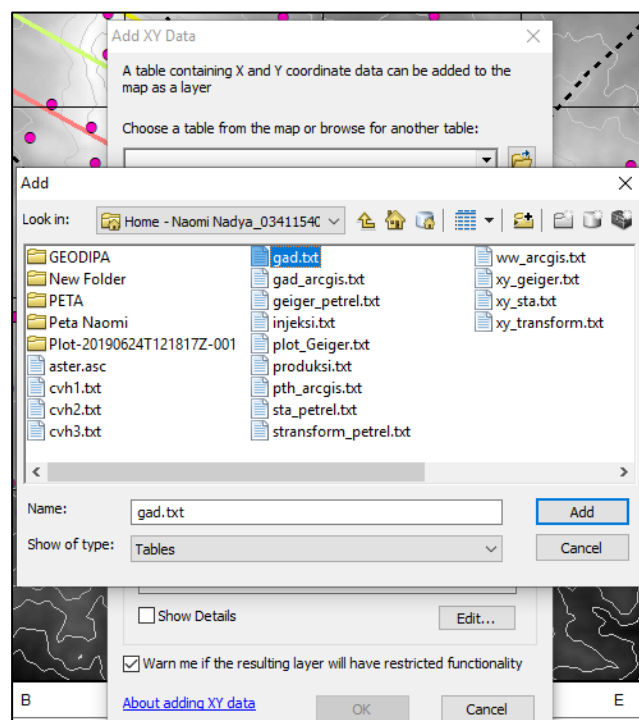
Untuk memasukkan data yang dalam hal ini berupa data episenter gempa bumi mikro, maka data tersebut dibuat terlebih dahulu dalam bentuk *file* dengan format .txt. Setelah data berupa titik episenter (X,Y) maka dimasukkan kedalam perangkat lunak dengan langkah sebagai berikut:

Klik pada *toolbar* 'File' lalu klik 'Add Data' > 'Add XY Data'

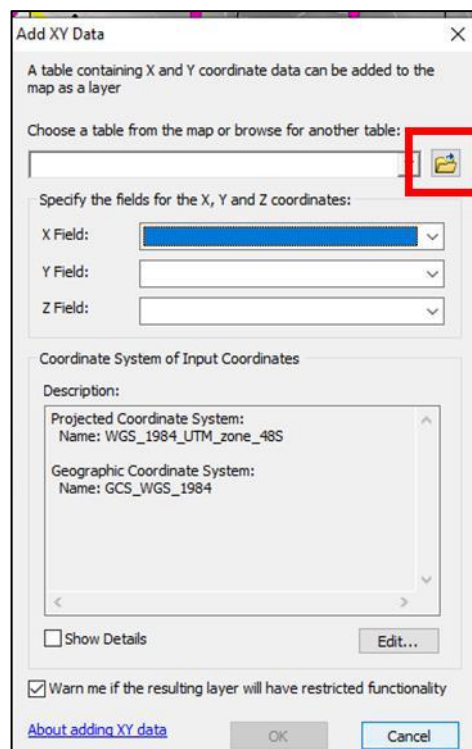
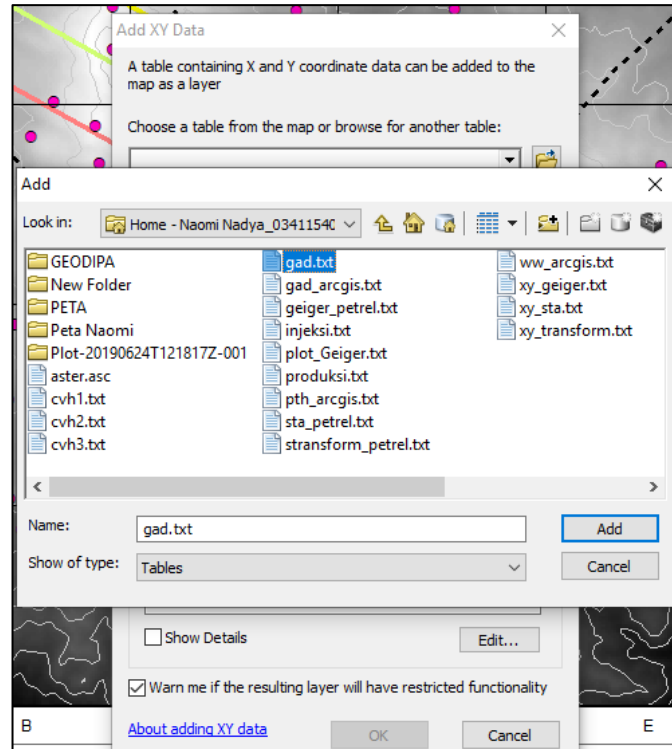


Setelah itu tampil dialog box 'Add XY Data'. Setelah itu pilih file dengan klik yang terdapat kotak berwarna merah tersebut.

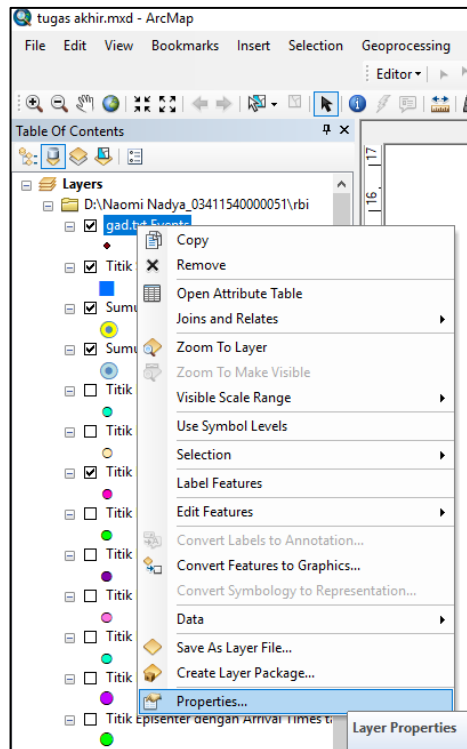
Klik file yang akan digunakan dalam bentuk format .txt.



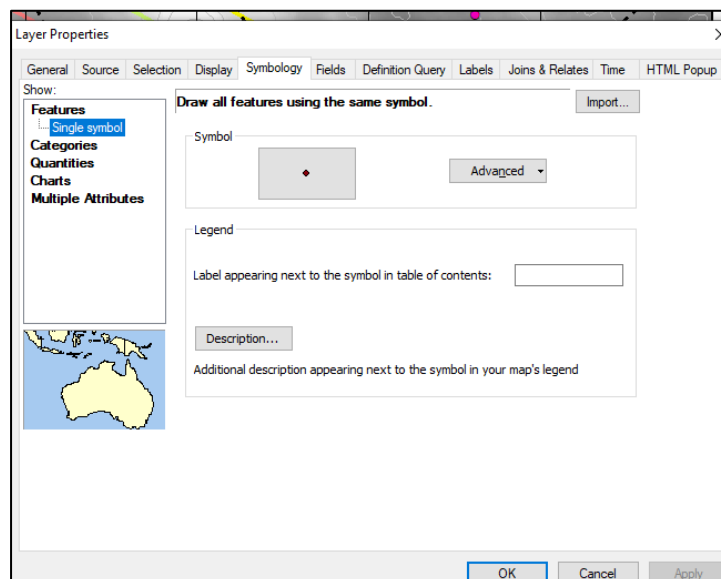
Setelah itu atau keterangan kolom dari data .txt. yang berupa X dan Y. Klik ‘OK’.

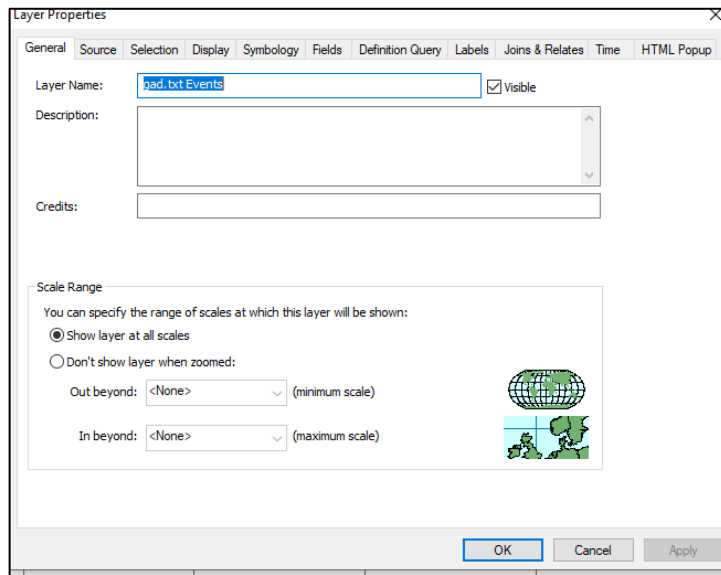


Untuk mengatur beberapa hal terkait dengan warna, bentuk, dan nama dapat dilakukan dengan klik kanan pada data *input* akan diatur pada ‘*Table of Contents*’. Setelah itu, pilih pada bagian ‘*Properties*’.

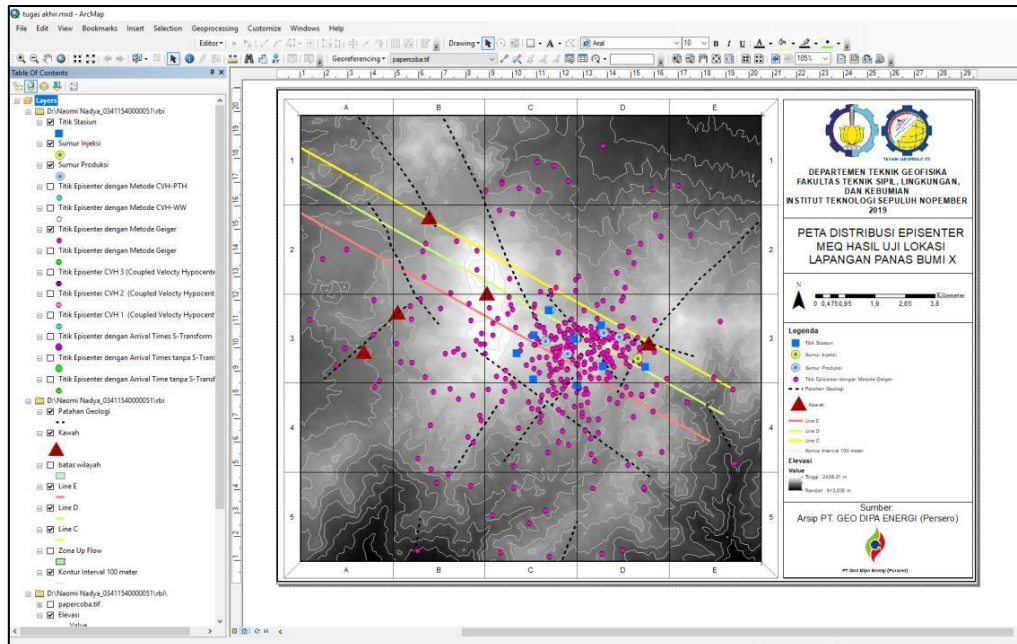


Maka akan muncul *dialog box* ‘*Layer Properties*’ yang dapat diatur nama, warna, bentuk dari simbol dan sebagainya.





Centang pada bagian 'Table of Contents' yang akan ditampilkan pada peta (sesuai dengan kebutuhan)



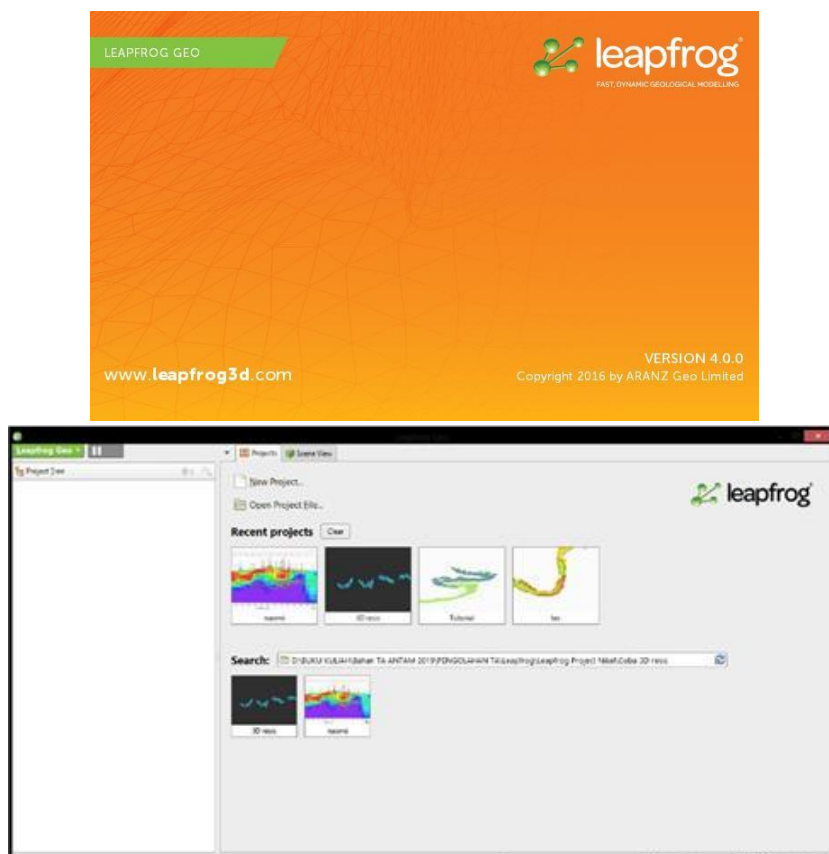
Jika peta sudah siap, maka dapat peta data di-export menjadi gambar (.jpeg)

H. PLOTTING LOKASI HIPOSENTER GEMPA BUMI MIKRO PADA PENAMPANG 2D MAGNETOTELLURIK MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK LEAPFROG GEO

Disiapkan data berupa penampang 2D yang pada hal ini merupakan hasil penampang pengolahan 2D Magnetotelurik dan titik koordinat dari masing-masing awal dan akhir lintasan penampang.

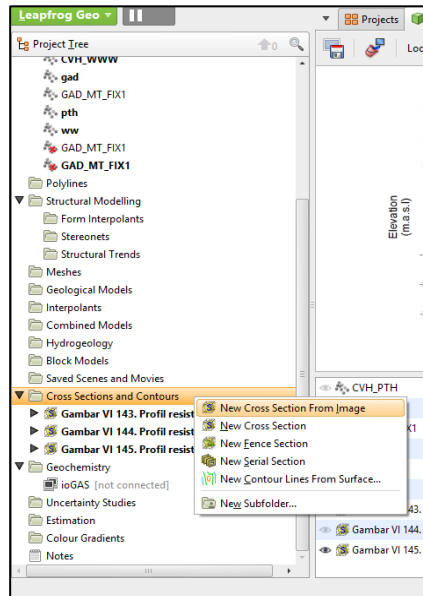
Setelah data siap, maka dapat dilakukan pengolahan dengan menggunakan perangkat lunak yaitu, Leapfrog Geo. Lalu membuat '*New Project*' atau membuka *project* yang sudah ada.

Tampak awal saat membuka perangkat lunak Leapfrog Geo adalah seperti gambar di bawah ini,

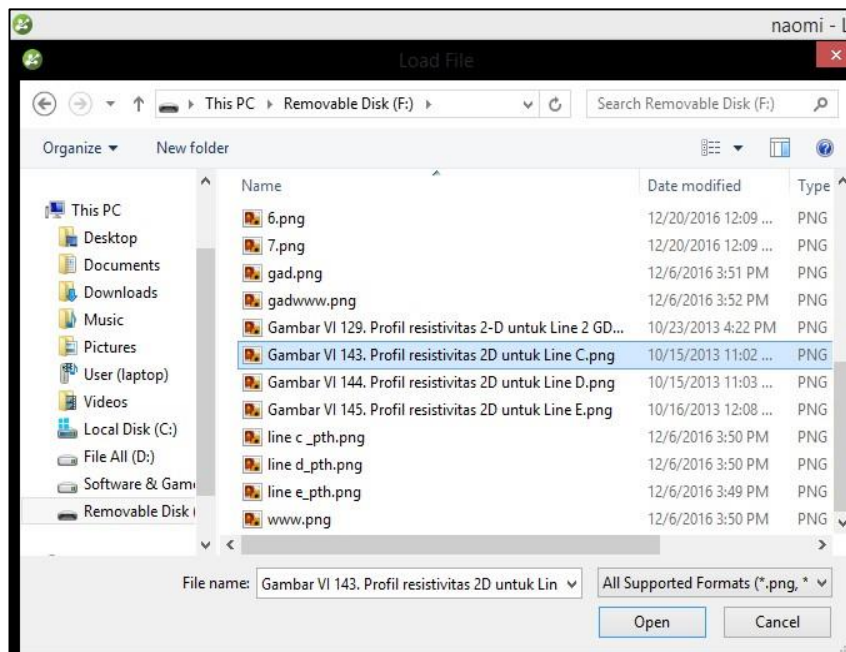


Hal pertama yang dilakukan yaitu memasukkan *cross section* dari penampang 2D Magnetotelurik (MT). Langkah-langkah untuk hal tersebut, sebagai berikut:

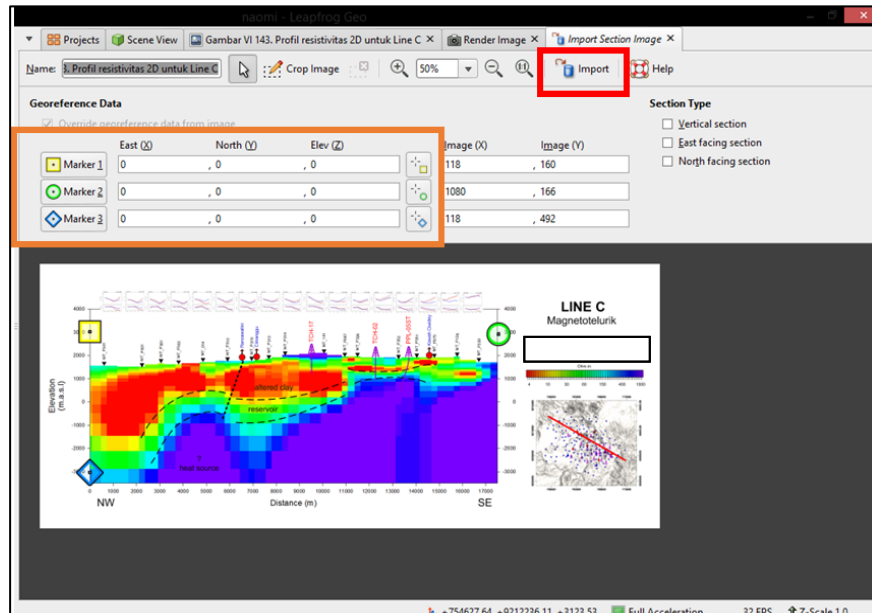
1. Pada bagian '*Project Tree*', klik kanan pada pilihan '*Cross Section and Contours*' dan pilih '*New Cross Section From Image*' dikarenakan data penampang berupa gambar.




2. Pilih gambar penampang yang akan digunakan.

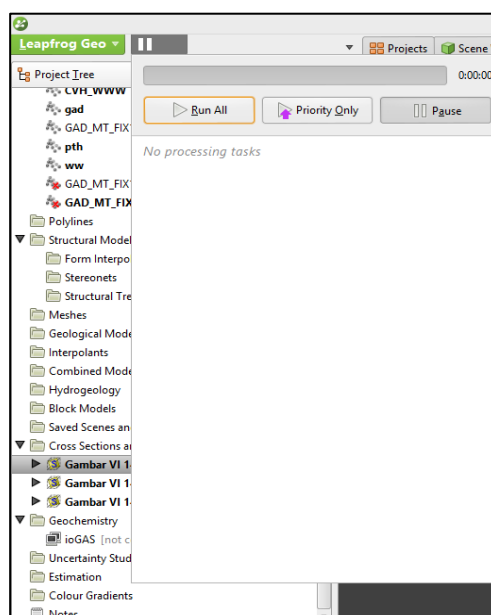


3. Gambar penampang/*cross section* akan muncul, lalu masukkan keterangan koordinat (X,Y) serta kedalaman (Z) sesuai dengan posisi dari masing-masing *marker*. Titik koordinat untuk pengolahan ini harus konsisten dari awal. Setelah selesai memasukkan keterangan koordinat, maka klik '*Import*' yang berada pada *toolbar* bagian atas dan ditandai oleh kotak



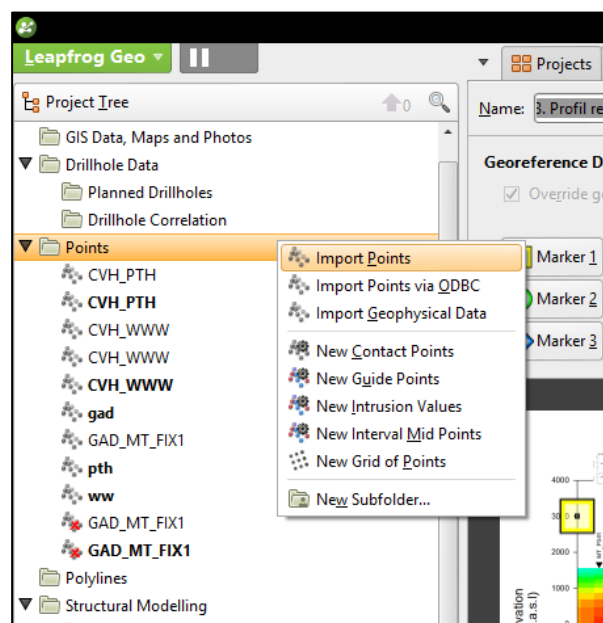
berwarna merah.

4. Klik  lalu klik '*Run All*' yang akan menampilkan data pada '*Scene View*'

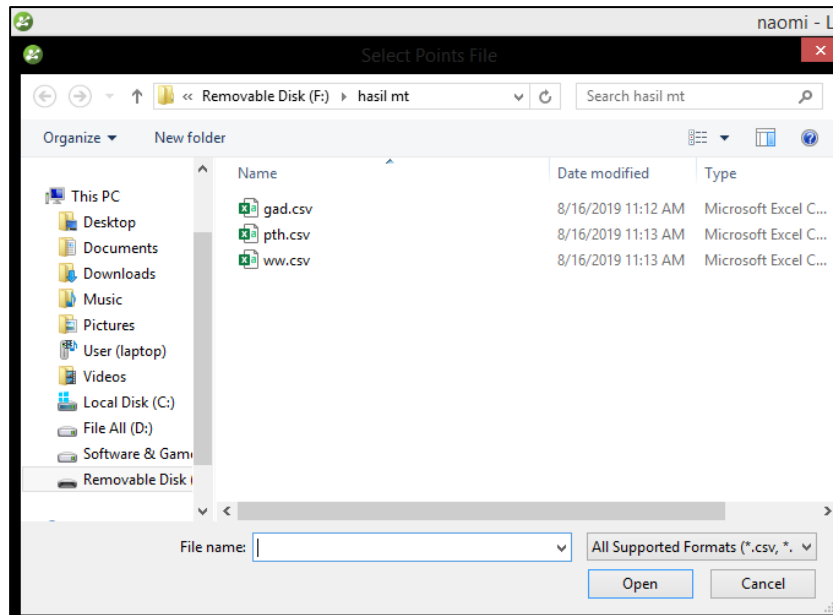


5. Ulang tahap-tahap tersebut jika terdapat penampang 2D lainnya.

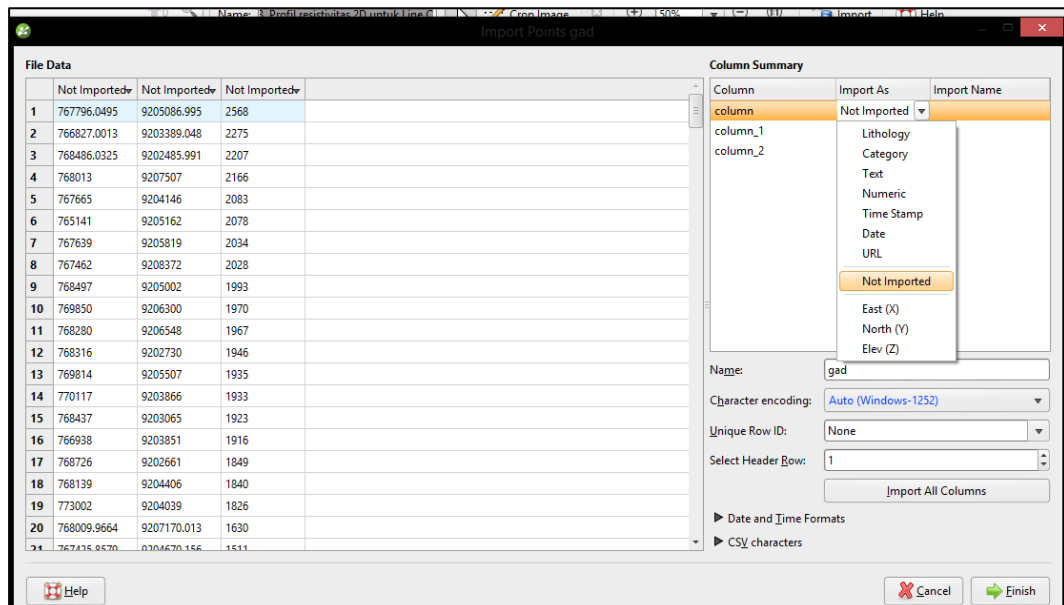
Setelah semua penampang sudah dimasukkan pada 'Scene View'. Selanjutnya memasukkan titik atau *points* yang pada hal ini berupa titik gempa bumi mikro. Data tersebut disiapkan terlebih dahulu pada *Microsoft Excel* yang terdiri dari 3 kolom yaitu koordinat berupa X dan Y serta data kedalaman Z. Perlu diingat kembali, sistem koordinat dan dimensi kedalaman yang digunakan **harus sesuai** dengan titik koordinat yang telah digunakan saat memasukkan data penampang 2D. Setelah data pada *Microsoft Excel* sudah disiapkan, maka *file* tersebut disimpan dalam format **.csv**. Jika sudah siap, maka dapat diolah pada perangkat lunak Leapfrog, sebagai berikut:




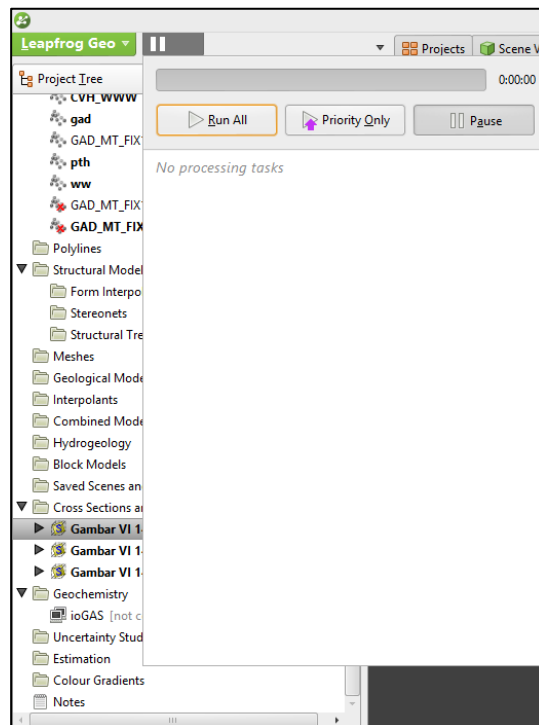
6. Klik kanan pada bagian *project tree* 'Points', kemudian klik 'Import Point'.
7. Kemudian pilih data yang akan digunakan dalam format .csv.



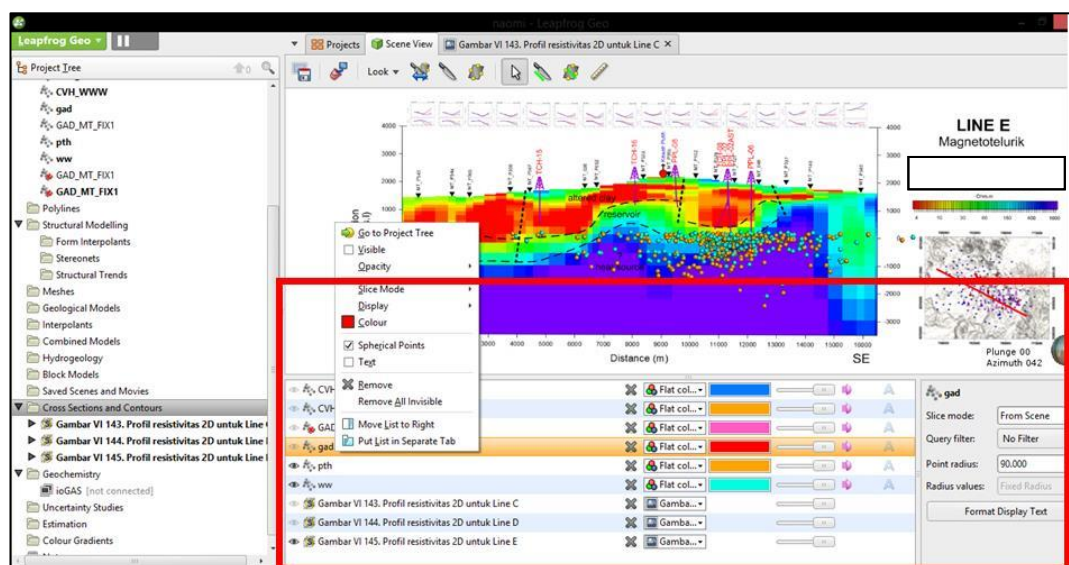
8. Setelah itu, data dalam *file* tersebut akan dimunculkan kembali. Lalu, aturlah pada bagian '*Column Summary*' terkait dengan keterangan kolom pada *file* tersebut yang sesuai. Dalam *file* ini merupakan susunan X, Y, dan Z. Lalu klik '*Finish*' yang terdapat pada pojok bawah kanan.



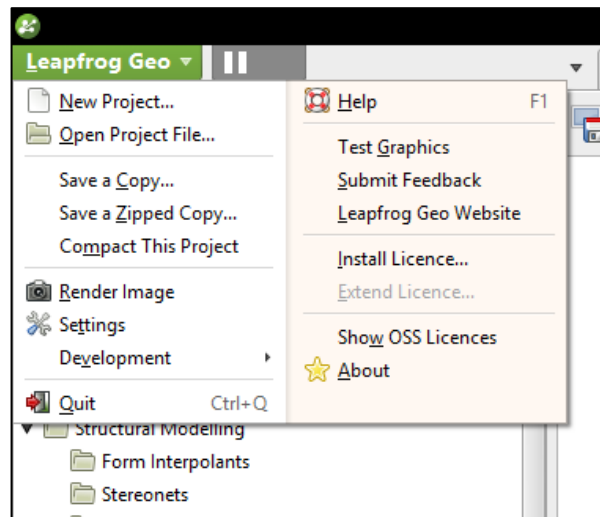
9. Klik  dan lalu klik ‘Run All’ yang akan menampilkan data pada ‘Scene View’.



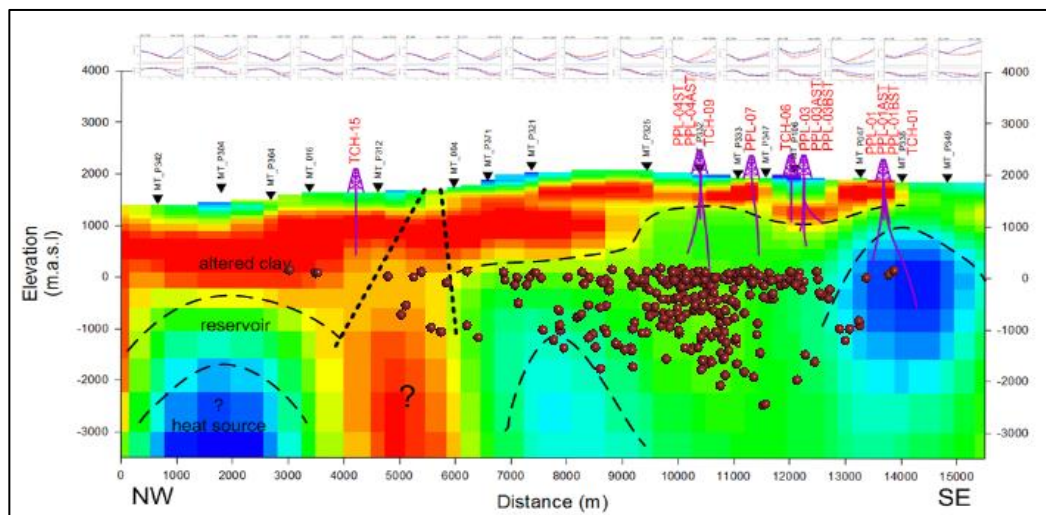
10. Setelah itu, atur data menjadi ‘Spherical Points’ dengan klik kanan pada bagian data yang digunakan lalu ukuran dari *point* dan warna itu sendiri yang terdapat pada bagian bawah kanan ‘Scene View’ yang diatur sesuai dengan kebutuhan.



Setelah itu, pada 'Scene View' dapat mengatur penampilan data yang diinginkan secara 3 dimensi. Atur penampilan sesuai keinginan dan hasil penampilan dapat dijadikan gambar dengan klik pada bagian 'Leapfrog Geo' pada pojok atas kiri dan klik pada 'Render Image'. Setelah itu simpan gambar dengan klik pada bagian 'Save' sesuai dengan *folder*.



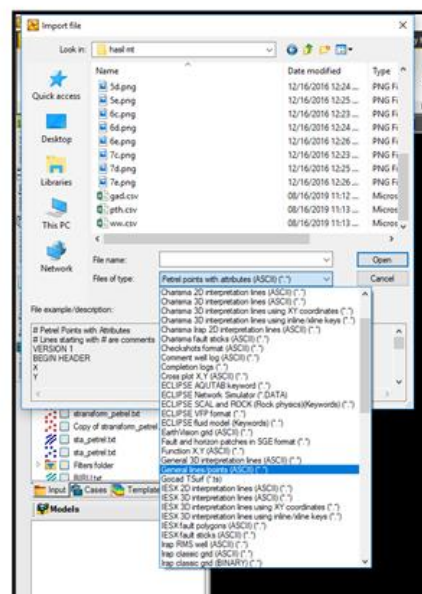
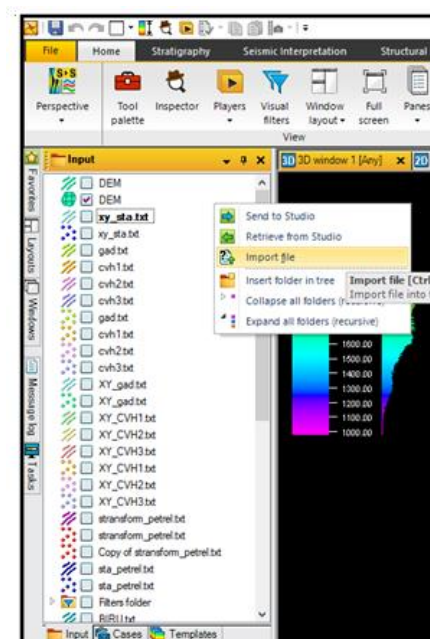
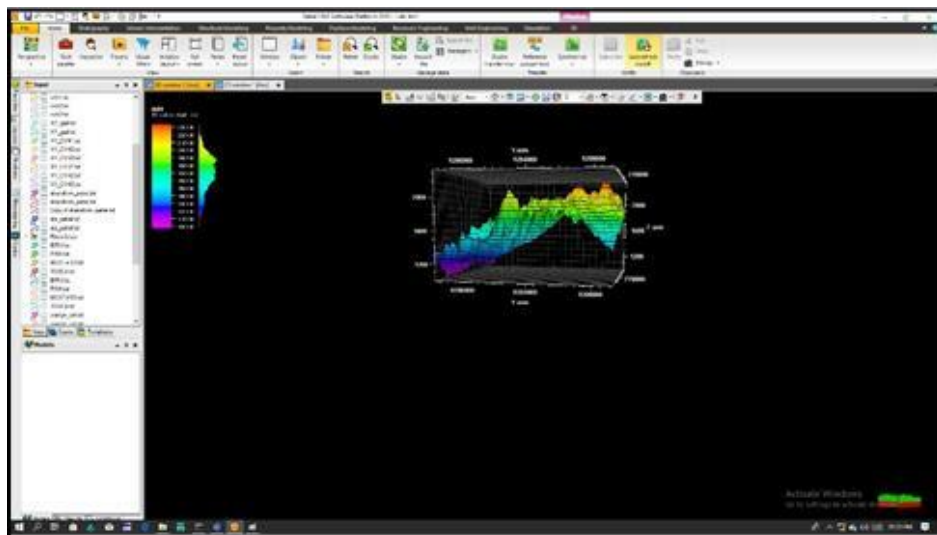
Berikut adalah contoh hasil *plotting* distribusi lokasi hiposenter gempa bumi mikro menggunakan perangkat lunak Leapfrog Geo.



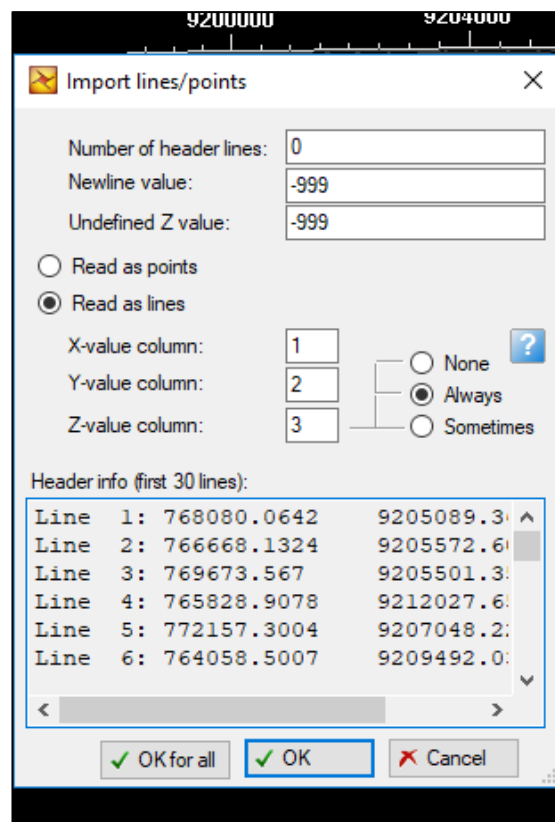
I. PLOTTING LOKASI HIPOSENTER GEMPA BUMI MIKRO MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK PETREL 2019

Untuk menampilkan data berupa titik titik gempa bumi mikro (X,Y,Z) pada perangkat lunak Petrel 2019 dapat dilakukan melalui tahap sebagai berikut:

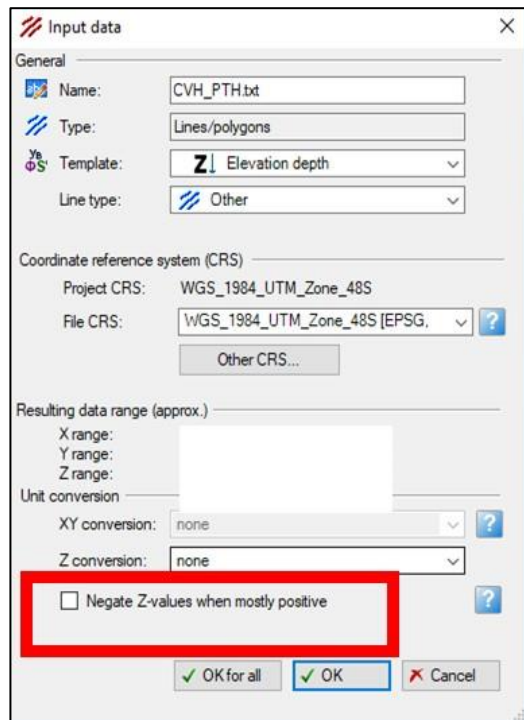
- Data titik gempa bumi mikro (X, Y, Z) sudah dapat format .txt.
- *File project* sudah terdapat *surface* berupa data dari DEM (*Digital Elevation Model*)



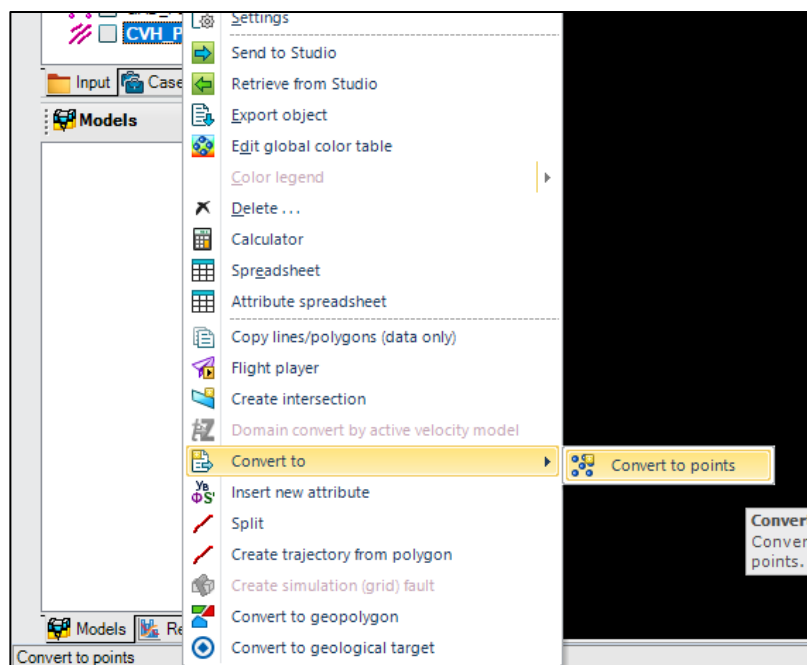
- Pada bagian 'Input', klik kanan dan pilih 'Import File'. Setelah itu, pilih 'File of type' yaitu 'General lines/points (ASCII)(".")' dan pilih data format .txt yang akan digunakan.
- Setelah data dipilih, maka akan muncul 'Import lines/points' dan akan ditampilkan data yang dipilih dan atur keterangan kolom sesuai dengan data yang merupakan nilai X, Y, dan Z. Jika sudah, dapat klik 'OK'.



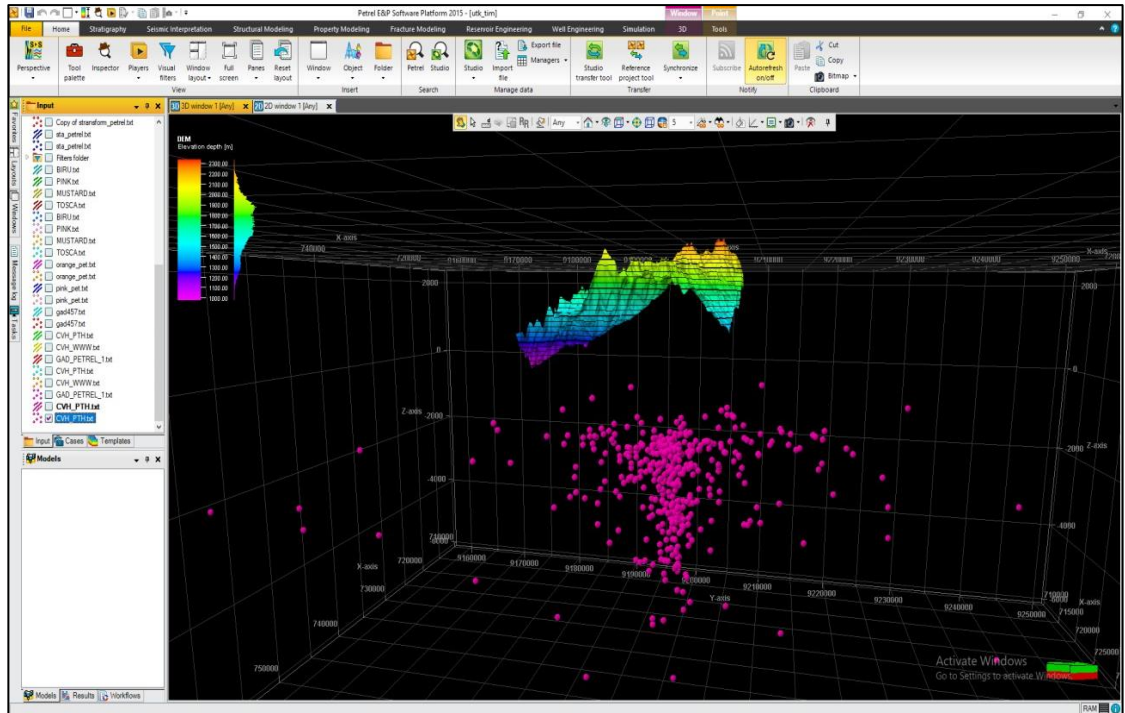
- Pada 'Input Data' dapat diatur beberapa keterangan berupa seperti nama dan sebagai. Pada bagian 'Negative Z-values when mostly positive' (kotak berwarna merah) dalam hal ini tidak dicentang. Lalu klik 'OK'.
- Pada 'Input Data' dapat diatur beberapa keterangan seperti nama dan sebagainya. Pada bagian 'Negative Z-values when mostly positive' (kotak berwarna merah) dalam hal ini tidak dicentang. Lalu klik 'OK'.



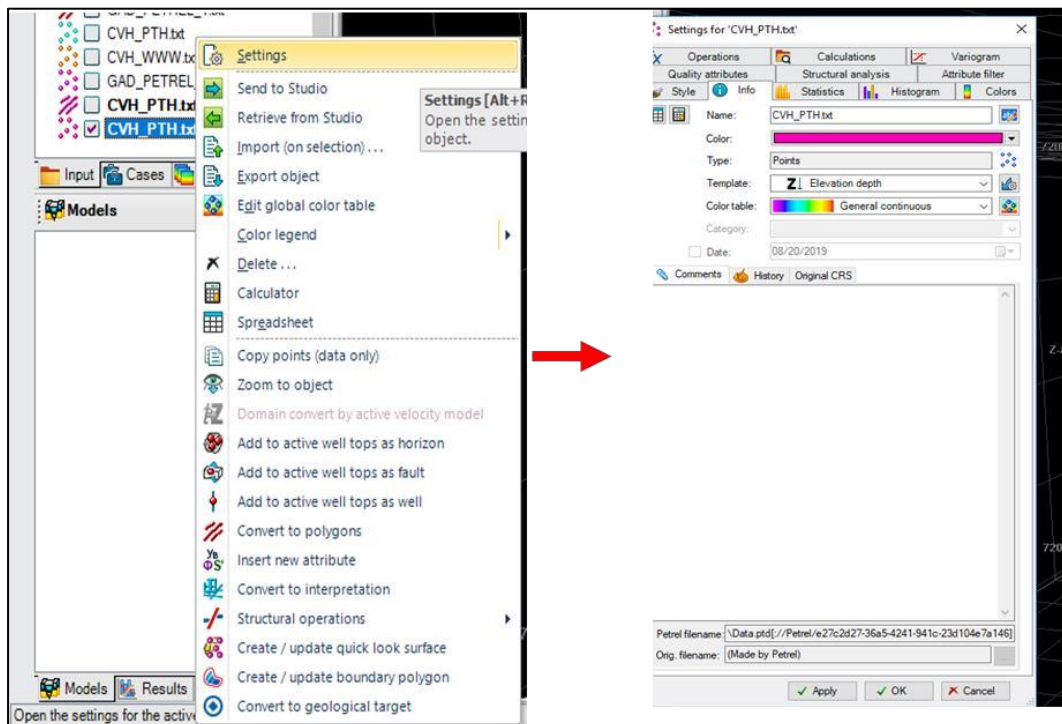
- Setelah itu, klik kanan pada data yang telah dimasukkan dan pilih ‘Convert to’ > ‘Convert to points’.



- Lalu centang pada bagian data yang telah diubah menjadi *point* dan akan tampil bersamaan dengan data awal yang berupa DEM.



- Titik tersebut dapat diubah mengenai warna, bentuk, dan ukuran dengan klik kanan lalu klik 'Settings' dan ubahlah sesuai dengan kebutuhan.



DAFTAR PUSTAKA

- Akbar, A. F., Ryannugroho, R., Jousset, P., Gassner, A., Jaya, M. S., Sule, R., Diningrat, W., Hendryana, A., Kusnadi, Y., Nugraha, A. D., Umar, M., Indrinanto, Y., & Erbas, K. (2015). "Study on Seismicity and Seismic Tomography on a Hydrothermal System in West Java", In World Geothermal Congress, Australia, hal. 1–5.
- Anissofira, A. (2013), *Penentuan Struktur Patahan Di Lapangan Panas Bumi 'X' Dengan Menggunakan Metode Relokasi Relatif Kasus Gempa Mikro*. Universitas Pendidikan Indonesia, Bandung.
- Garini, S.A., Madlazim., Rahmawati, E. (2014). "Relokasi Hiposenter Gempa Bumi Di Sulawesi Tengah Dengan Menggunakan Metode Geiger Dan Coupled Velocity-Hypocenter". *Jurnal Fisika*, Vol. 03, No. 02, hal. 107–112.
- Hijriani, A., Sahara, D. P., Nugraha, A. D., Ramadhan, I., & Sidik, R. P. (2017). "Peningkatan Akurasi Lokasi Gempa Mikro dengan Menggunakan Metoda Double-Difference dan Korelasi". *Jurnal Geofisika*, Vol. 15, No. 04, hal. 21–25.
- Hilyah, A. (2010). "Studi Gempa Mikro Untuk Mendeteksi Rekahan di Area Panas Bumi Kamojang Kabupaten Garut". *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, Vol. 6, No. 2, hal. 1–5.
- Hurukawa, N. (2008). *Practical Analyses of Local Earthquakes*, International Institute of Seismology and Earthquake Engineering (IISEE), Building Research Institute, Tsukuba, Japan.
- Idat, C. F., & Harmoko, U. (2016). "Relokasi Hiposenter Gempa Mikro dengan Metode SED dan JHD Sebagai Analisis Reservoir Area Panas Bumi-X". *Youngster Physics Journal*, Vol. 5, No. 3, hal. 97–104.

- Kissling, E. (1995). Program Velest User's Guide-Short Introduction, Institute of Geophysics, ETH Zuerich.
- Madrinovella, I., Widiyantoro, S., Nugraha, A. D., & Triastuty, H. (2012). "Studi Penentuan Dan Relokasi Hiposenter Gempa Mikro Sekitar Cekungan Bandung". *J. Geofisika*, Vol. 13, No. 2, hal. 80–88.
- Nishi, K. (2005). *Hypocenter Calculation Software GAD (Geiger's Method with Adaptive Damping)*, Silver Expert JICA Indonesia.
- Pribadi, E. (2010). *Delineasi Zona Rekahan Pada Reservoir Geothermal Melalui Pengamatan Mikroseismik*. Universitas Indonesia, Depok.
- Puspito, N.T. (1996). "Struktur Kecepatan Gelombang Gempa Dan Koreksi Stasiun Seismologi Di Indonesia". *JMS*, Vol. 1, No. 2, hal. 20–39.
- Rachman, T. D., & Nugraha, A. D. (2012). "Penentuan Model 1-D Kecepatan Gelombang P Dan Relokasi Hiposenter Secara Simultan Untuk Data Gempabumi Yang Berasosiasi Dengan Sesar Sumatra Di Wilayah Aceh Dan Sekitarnya". *JTM*, Vol. 19, No. 1, hal. 27–33.
- Rochman, J. P. G. N., Santosa, B. J., & Firdaus, F. R. (2012). "Model Struktur 1-D Kecepatan Gelombang P di Daerah Minahasa". *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, Vol. 8, No. 2, hal. 1–4.
- Rohadi, S., Widiyantoro, S., Nugraha, A. D., & Masturyono. (2012). "Relokasi Hiposenter Gempa Di Jawa Tengah Menggunakan Inversi Tomografi Double-Difference". *JTM*, Vol. 18, No. 2, hal. 95–105.
- Rutledge, J. T., & Philips, W. S. (2001). "Hydraulic Stimulation Of Natural Fractures As Revealed By Induced Microearthquakes, Carthage Cotton Valley Gas Field, East Texas". *Los Alamos National Laboratory Mail Stop D443 Geophysics Group Seismic Research Center*, hal. 1–3
- Stein, S., Wyssession, W. (2003), "*An Introduction to Seismology, Earthquakes, and Earth Structure*" by Seth Stein and Michael Wyssession.

<http://doi.org/10.1785/gssrl.74.6.824>.

- Suandayani, N. K. T. (2017), *Penentuan Nilai Magnitudo Gempa Vulkanik Gunung Guntur Jawa Barat Berdasarkan Data Seismik*, Universitas Udayana, Denpasar.
- Supriyanto. (2007), *Analisis Data Geofisika : Memahami Teori Inversi*, edisi 1, Departemen Fisika-FMIPA Universitas Indonesia., Depok.
- Utama, W., & Garini, S. A. (2018). “*The Relocation of Earthquake Hypocenter by Using Coupled Velocity-Hypocenter Method*”. Submitted on International Journal on Advanced Science Engineering Information Technology.
- Zhang, H. (2009). “*Passive Seismic Tomography Using Induced Seismicity at Petroleum Field in Oman*”, Earth Resources Laboratory Department of Earth, Atmospheric and Planetary Sciences Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts, hal. 1-50.