

**ANALISIS SEBARAN HIPOSENTER GEMPA MIKRO  
DAN *POISSON'S RATIO* DI LAPANGAN PANASBUMI  
DESERT PEAK SEBELUM DAN SESUDAH STIMULASI  
*ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEM (EGS)***

(Skripsi)

Oleh

**FARKHAN RAFLESIA**



**KEMENTRIAN RISET TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
FAKULTAS TEKNIK  
JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA  
2017**

## **ABSTRACT**

### **ANALYSIS OF MICRO EARTHQUAKE HYPOCENTER AND *POISSON'S RATIO* AT DESERT PEAK GEOTHERMAL FIELD BEFORE AND AFTER *ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEM (EGS) STIMULATION***

**By**

**FARKHAN RAFLESIA**

A research has been conducted on analysis of hypocenter distribution and poisson's ratio in the Desert Peak Geothermal Field, the State of Nevada, USA. The purpose of this research is to make a hypocenter determination program using Graphical User Interfaces (GUI) in MATLAB, analyze hypocenter and poisson's ratio distribution. Methods of micro earthquake using natural seismic wave measurement sources that have a low frequency. Micro earthquake recording earthquakes (  $\geq 3$  SR). The data used in this research are the micro earthquake data catalog of Desert Peak Geothermal Field before EGS (September 2008 to August 2010) and after EGS (March 2013 to February 2015). The data source is from Northern California Earthquake Data Center (NCEDC) and is secondary data covering the arrival time of P and S waves, station position and 1-dimensional speed model. Hypocenter determination using the SED method with preliminary data of the arrival time of P and S waves, 1-dimensional speed model and station location (UTM X, UTM Y and elevation). While the determination of poisson's ratio using wadati diagram with initial data in the form of the difference between the arrival time of wave P and S with origin time. Determination of the hypocenter of micro earthquake successfully done using the GUI program in MATLAB developed by writer. The resulting hypocenter distribution follows the rhyolite ridge fault groove which is the main location of Desert Peak Geothermal Field. After the EGS stimulation the micro earthquake distribution increased twice, with the highest increase being in the 500m elevation (EGS stimulation zone). An increase in the value of poisson's ratio after EGS stimulation, especially in the 500m elevation (EGS stimulation zone). This suggests an increase in water saturation in the EGS area after EGS stimulation.

Keywords: MATLAB, Hypocenter, *Poisson's ratio*

## ABSTRAK

### **ANALISIS SEBARAN HIPOSENTER GEMPA MIKRO DAN *POISSON'S RATIO* DI LAPANGAN PANASBUMI DESERT PEAK SEBELUM DAN SESUDAH STIMULASI *ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEM (EGS)***

Oleh

**FARKHAN RAFLESIA**

Telah dilakukan penelitian tentang analisis sebaran hiposenter dan *poisson's ratio* di Lapangan Panasbumi Desert Peak, Negara Bagian Nevada, Amerika Serikat. Tujuan penelitian ini adalah membuat program penentuan hiposenter menggunakan *Graphical User Interfaces (GUI)* di MATLAB, menganalisis sebaran hiposenter dan *poisson's ratio*. Metode gempa mikro menggunakan sumber pengukuran gelombang seismik natural yang memiliki frekuensi rendah. Gempa mikro merekam gempa-gempa (  $> 3$  SR). Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data katalog gempa mikro Lapangan Panasbumi Desert Peak sebelum EGS (September 2008 hingga Agustus 2010) dan sesudah EGS (Maret 2013 hingga Februari 2015). Sumber data dari *Northern California Earthquake Data Center (NCEDC)* dan merupakan data sekunder yang meliputi waktu tiba gelombang P dan S, posisi stasiun serta model kecepatan 1 dimensi. Penentuan hiposenter menggunakan metode SED dengan data awal berupa waktu tiba gelombang P dan S, model kecepatan 1 dimensi dan lokasi stasiun (UTM X, UTM Y dan elevasi). Sedangkan penentuan *poisson's ratio* menggunakan diagram wadati dengan data awal berupa selisih antara waktu tiba gelombang P dan S dengan *origin time*. Penentuan hiposenter gempa mikro berhasil dilakukan menggunakan program GUI di MATLAB yang dikembangkan penulis. Sebaran hiposenter yang dihasilkan mengikuti alur sesar *ridge rhyolite* yang merupakan lokasi utama Lapangan Panasbumi Desert Peak. Sesudah dilakukannya stimulasi EGS sebaran gempa mikro meningkat dua kali, dengan peningkatan paling tinggi berada di elevasi 500m (zona stimulasi EGS). Terjadi peningkatan nilai *poisson's ratio* sesudah dilakukan stimulasi EGS terutama di elevasi 500m (zona stimulasi EGS). Hal ini menunjukkan adanya peningkatan saturasi air di area EGS sesudah stimulasi EGS.

Kata Kunci: MATLAB, Hiposenter, *Poisson's ratio*,

**ANALISIS SEBARAN HIPOSENTER GEMPA MIKRO  
DAN *POISSON'S RATIO* DI LAPANGAN PANASBUMI  
DESERT PEAK SEBELUM DAN SESUDAH STIMULASI  
*ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEM (EGS)***

Oleh

**FARKHAN RAFLESIA**

Skripsi

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar  
**SARJANA TEKNIK**

Pada

**Jurusan Teknik Geofisika  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**KEMENTRIAN RISET TEKNOLOGI DAN PENDIDIKAN TINGGI  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
FAKULTAS TEKNIK  
JURUSAN TEKNIK GEOFISIKA  
2017**

Judul Skripsi : **ANALISIS SEBARAN HIPOSENTER  
GEMPA MIKRO DAN *POISSON'S RATIO*  
DI LAPANGAN PANASBUMI DESERT  
PEAK SEBELUM DAN SESUDAH  
STIMULASI *ENHANCED GEOTHERMAL  
SYSTEM (EGS)***

Nama Mahasiswa : **Farkhan Raflesia**

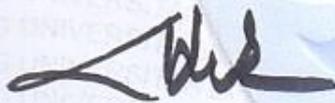
Nomor Pokok Mahasiswa : 1315051020

Jurusan : Teknik Geofisika

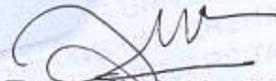
Fakultas : Teknik

**MENYETUJUI**

1. Komisi Pembimbing

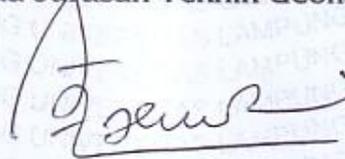


**Dr. Nandi Haerudin, S.Si., M.Si.**  
NIP 19750911 200012 1 002



**Rustadi, S.Si., M.T.**  
NIP 19720511 199703 1 002

2. Ketua Jurusan Teknik Geofisika



**Dr. Ahmad Zaenudin, S.Si., M.T.**  
NIP 19720928 199903 1 001

**MENGESAHKAN**

**1. Tim Penguji**

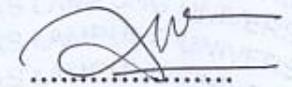
**Ketua**

**: Dr. Nandi Haerudin, S.Si., M.Si.**



**Sekretaris**

**: Rustadi, S.Si., M.T.**



**Penguji**

**Bukan Pembimbing : Prof. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D.**



**2. Dekan Fakultas Teknik**



**Prof. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D.**  
**NIP 19620717 198703 1 002**

**Tanggal Lulus Ujian Skripsi : 2 November 2017**

## PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya tulis bukan merupakan karya dari orang lain melainkan berdasarkan pemikiran saya sendiri, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana. Adapun kutipan tertentu dalam penulisan skripsi ini terdapat karya atau pendapat orang lain yang ditulis menurut sumbernya sebagaimana disebutkan dalam daftar pustaka secara jelas sesuai dengan norma, kaidah dan etika penulisan ilmiah.

Apabila pernyataan saya ini tidak benar maka saya bersedia dikenakan sanksi sesuai dengan hukum yang berlaku.

Bandar Lampung, 10 Desember 2017



**Farkhan Raflesia**  
NPM. 1315051020

## RIWAYAT HIDUP



Penulis dilahirkan di Desa Tambahrejo pada tanggal 28 Juni 1996, sebagai anak kedua dari tiga bersaudara dari pasangan Bapak Fatudin dan Ibu Temon Miati. Penulis mengenyam pendidikan formal dimulai pada tahun 2001 hingga 2006 di SDN 2 Tambahrejo. Melanjutkan ke sekolah menengah pertama di SMPN 1 Gadingrejo pada tahun 2007 hingga 2009. Jenjang pendidikan menengah atas di SMAN 1 Gadingrejo pada tahun 2010 hingga 2012. Pada tahun 2011 penulis tercatat sebagai mahasiswa S1 Teknik Geofisika Universitas Lampung melalui jalur SNMPTN Undangan.

Semasa kuliah penulis aktif dalam organisasi Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana sebagai Kepala Bidang Sains dan Teknologi tahun 2015-2016 juga aktif dalam organisasi Society of Exploration Geophysicists Student Chapter Unila sebagai Kepala Divisi Company Visit tahun 2016-2017. Satu prestasi yang berhasil saya raih adalah menjadi Juara 5 Lomba Karya Tulis Ilmiah di Universitas Negeri Padang tahun 2014. Penulis dipercaya menjadi asisten praktikum geologi dasar tahun 2014 dan 2015.

Penulis melaksanakan kerja praktek di Pusat Penelitian Geoteknologi LIPI pada Bulan Oktober 2016 dengan judul “AKUISISI DAN *PRE-PROCESSING* DATA AUDIO MAGNETOTELLURIK (AMT) PADA LINTASAN 2 LAPANGAN PANASBUMI WAY RATAI” dan menyelesaikan Tugas Akhir di Laboratorium Eksplorasi Geofisika, Teknik Geofisika Universitas Lampung pada bulan Juni hingga November 2017 dengan judul skripsi “ANALISIS SEBARAN HIPOSENTER GEMPA MIKRO DAN *POISSON’S RATIO* DI LAPANGAN PANASBUMI DESERT PEAK SEBELUM DAN SESUDAH STIMULASI *ENHANCED GEOTHERMAL SYSTEM (EGS)*” dan dinyatakan lulus pada 2 November 2017.

## **PERSEMBAHAN**

**Bismillahirrohmanirrohim**

**Atas ridho Allah SWT dan dengan segala kerendahan hati kupersembahkan  
skripsiku ini kepada:**

**Bapakku tercinta Fatudin dan Ibuku tersayang Temon Miati, terimakasih  
untuk setiap pengorbanan, peluh keringat, kesabaran dan kasih sayang, serta  
doa yang tiada henti diberikan sehingga aku dapat mempersembahkan  
keberhasilan ini untuk mu Bapak dan Ibu.**

**Kepada kakak tersayang, Ogy Fanta Yoga serta adik tersayang, Agil  
Kuncoro Jati.**

**Keluarga Besar yang selalu mendukung dan mendoakan.**

**Teknik Geofisika Unila 2013.**

**Keluarga Besar Teknik Geofisika Unila.**

**Almamater tercinta Universitas Lampung.**

## **MOTTO**

“Dan Sesungguhnya Kami telah menciptakan manusia dari suatu saripati (berasal)  
dari tanah”

(Q. S. Al Mu'minun: 12)

“**Khairunnaas Anfa'uhum Linnas**”

Sebaik-baik manusia diantara mu adalah yang paling banyak member manfaat  
bagi orang lain”

(H. R. Ahmad dan Thabrani)

## SANWACANA

Puji syukur penulis ucapkan kehadiran Tuhan Yang Maha Esa, karena atas rahmat dan hidayah-Nya skripsi ini dapat diselesaikan. Penulis menyadari selesainya skripsi ini tidak lepas dari bantuan berbagai pihak, maka penulis menyampaikan rasa terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Nandi Haerudin, S.Si., M.Si. selaku Dosen Pembimbing Utama atas kesediaannya memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam proses penyelesaian skripsi ini;
2. Bapak Rustadi, S.Si., M.T. selaku Dosen Pembimbing kedua atas kesediaannya memberikan arahan dan bimbingan penulisan skripsi ini;
3. Bapak Prof. Suharno, M.S., M.Sc., Ph.D. selaku Dosen Penguji atas kesediaannya memberikan bimbingan, saran dan kritik dalam perbaikan dan penyempurnaan skripsi ini;
4. Dosen-Dosen Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung yang saya hormati;
5. Keluarga serta saudaraku TG'13 yang selama ini mendukung dan menjadi tempat berbagi suka dan duka pada masa perkuliahan;
6. Keluarga besar Teknik Geofisika Unila, khususnya Kak Nanda Hanyfa Maulida, Kak Fitri Wahyuningsih dan Kak Irfan Hanif yang telah memberi banyak masukan dan arahan dalam penelitian skripsi ini.
7. Bapak, Ibu, Kakak dan Adik serta keluarga besar, atas dukungan, semangat dan doa yang tidak pernah putus untuk Penulis. Semoga Penulis dapat membahagiakan dan memberikan yang terbaik untuk kalian.
8. Seluruh staf Administrasi Jurusan Teknik Geofisika Unila yang telah memberi banyak bantuan dalam proses administrasi.

Semoga segala kebaikan dan bantuan yang telah diberikan kepada penulis dibalas oleh Allah SWT dan bermanfaat bagi kita semua. Aamiin.

Bandarlampung, 10 Desember 2017

Penulis

**Farkhan Raflesia**

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRACT</b> .....	i
<b>ABSTRAK</b> .....	ii
<b>HALAMAN JUDUL</b> .....	iii
<b>HALAMAN PERSETUJUAN</b> .....	iv
<b>HALAMAN PENGESAHAN</b> .....	v
<b>HALAMAN PERNYATAAN</b> .....	vi
<b>RIWAYAT HIDUP</b> .....	vii
<b>HALAMAN PERSEMBAHAN</b> .....	ix
<b>HALAMAN MOTTO</b> .....	x
<b>SANWACANA</b> .....	xi
<b>DAFTAR ISI</b> .....	xiii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xv
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xvii
<b>I. PENDAHULUAN</b>	
A. Latar Belakang .....	1
B. Batasan Masalah .....	2
C. Tujuan Penelitian .....	2
<b>II. TINJAUAN PUSTAKA</b>	
A. Lokasi Daerah Penelitian .....	4
B. Geologi Daerah Penelitian .....	5
C. Energi Panasbumi .....	6
1. Tipe Sumber Daya Panasbumi .....	8
2. Komponen Penyusun Sistem Panasbumi .....	14
3. Klasifikasi Temperatur .....	14
D. EGS ( <i>Enhanced Geothermal System</i> ) .....	16
<b>III. TEORI DASAR</b>	
A. Metode <i>Micro Earthquake</i> (MEQ) atau Gempa Mikro .....	18
1. Hukum Fisika Gelombang Seismik .....	19

1.1. Hukum Snellius .....	19
1.2. Prinsip Huygens.....	20
1.3. Prinsip Fermat .....	20
2. Gelombang Seismik .....	21
1.1. Gelombang Badan .....	21
1.2. Gelombang Permukaan.....	23
3. Parameter Sumber gempa.....	24
B. Pemrograman Matlab.....	25
C. Metode <i>Single Event Determination</i> (SED).....	26
D. Diagram Wadati.....	35
E. <i>Poisson's Ratio</i> .....	37

#### **IV. METODOLOGI PENELITIAN**

A. Waktu dan Tempat Penelitian .....	39
B. Perangkat Lunak dan Data Penelitian .....	39
C. Diagram Alir .....	40

#### **V. HASIL DAN PEMBAHASAN**

A. Program Penentuan Hiposenter.....	42
B. Hiposenter .....	44
C. <i>Poisson's Ratio</i> .....	51

#### **VI. KESIMPULAN DAN SARAN**

A. Kesimpulan .....	57
B. Saran.....	57

#### **DAFTAR PUSTAKA**

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Tabel waktu dan kegiatan penelitian.....	39

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Contoh penyebab gempa mikro .....	2
2. Peta lokasi daerah penelitian .....	4
3. Peta geologi daerah penelitian .....	5
4. Konseptual model sistem panasbumi Desert Peak.....	7
5. Sistem panasbumi dominasi uap.....	9
6. Sistem panasbumi dominasi air .....	9
7. Sumber daya cekungan sedimen.....	10
8. Sistem panasbumi <i>Geopressured</i> .....	11
9. Sistem panasbumi <i>Radiogenic</i> .....	12
10. Eksploitasi <i>Hot Dry Rock</i> .....	12
11. Sumber daya magma .....	13
12. Lokasi stimulasi EGS .....	16
13. Konsep metode gempa mikro/ <i>microearthquake</i> .....	18
14. Hukum Snellius .....	19
15. Prinsip Huygens .....	20
16. Prinsip Fermat .....	20
17. Simulasi gerakan gelombang P dan S .....	23
18. Alur SED .....	27
19. Perhitungan lintasan gelombang langsung untuk model berlapis .....	29
20. Tipe <i>trade-off curve</i> .....	33
21. Titik hiposenter dengan eror elips .....	35
22. Diagram Wadati .....	35
23. Diagram Alir .....	41
24. Tampilan <i>command window</i> .....	42

25. Tampilan <i>GUIDE Quick Start</i> .....	42
26. Tampilan GUI1.fig.....	43
27. Program penentuan hiposenter.....	44
28. Sebaran episenter sebelum EGS.....	45
29. Sebaran hiposenter sebelum EGS S-N.....	46
30. Sebaran hiposenter sebelum EGS W-E.....	46
31. Grafik RMS sebelum EGS.....	47
32. Grafik eror sebelum EGS.....	47
33. Sebaran episenter sesudah EGS.....	48
34. Sebaran hiposenter sesudah EGS S-N.....	49
35. Sebaran hiposenter sesudah EGS W-E.....	50
36. Grafik RMS sesudah EGS.....	50
37. Grafik eror sesudah EGS.....	51
38. Diagram Wadati hasil penelitian.....	52
39. Model 3 dimensi sebaran <i>poisson's ratio</i> sebelum EGS.....	53
40. Model 3 dimensi sebaran <i>poisson's ratio</i> sesudah EGS.....	53
41. Penampang vertikal sebelum EGS.....	54
42. Penampang vertikal sesudah EGS.....	55
43. Penampang horizontal elevasi 500 m sebelum EGS.....	56
44. Penampang horizontal elevasi 500 m sesudah EGS.....	56

## I. PENDAHULUAN

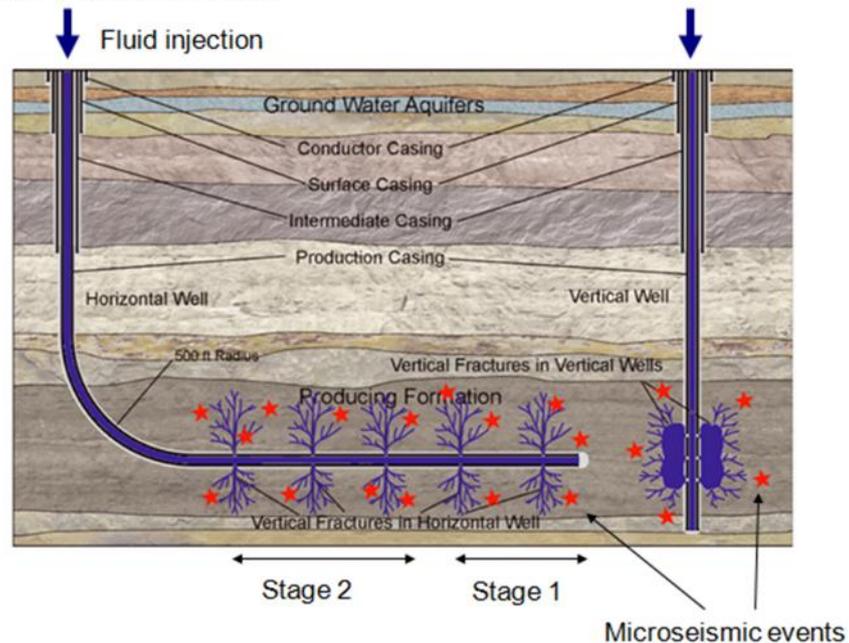
### A. Latar Belakang

Lapangan Panasbumi Desert Peak berada di Negara Bagian Nevada, Amerika Serikat. Lapangan panasbumi ini merupakan lapangan panasbumi *hydrothermal* dengan temperatur sedang. Lapangan panasbumi ini mengalami penambahan produksi sebesar 1,7 MWe dari proses *enhanced geothermal system* (EGS) (Ethan dan Ezra, 2013). Proses ini dilakukan dengan cara menginjeksikan air bertekanan tinggi (stimulasi) melalui sumur injeksi ke dalam batuan reservoir. Akibatnya terjadi peningkatan permeabilitas batuan reservoir ke tingkatan komersial. Proses stimulasi EGS dilakukan pada tahun 2010 hingga 2013 di sumur 27-15 oleh Ormat Nevada, Inc.

Lapangan panasbumi sangat erat kaitannya dengan aktivitas gempa mikro (Foulger dan Long, 1984). Gempa jenis ini dapat digunakan untuk mempelajari lebih dalam mengenai sistem panasbumi yang sudah ataupun belum dieksploitasi (Maulida, 2015). Aktifitas gempa mikro yang terjadi pada lapangan panasbumi dapat menjadi sumber informasi yang penting mengenai kondisi reservoir. Terdapat kaitan hiposenter gempa mikro dengan munculnya zona rekahan akibat fluida reinjeksi serta aktifitas produksi yang diperlihatkan pada Gambar 1, (Geiddk., 2010). Dengan mengintegrasikan posisi sebaran hiposenter dan nilai *Poisson's ratio* bawah permukaan, dapat diamati perubahan yang mungkin terjadi

pada area stimulasi EGS sebelum dan sesudah stimulasi EGS.

## Hydraulic stimulation



Gambar 1. Contoh penyebab gempa mikro (Gei dkk., 2010)

### B. Batasan Masalah

Penelitian ini menggunakan data waktu tiba gelombang P dan S sebelum EGS (September 2008 hingga Agustus 2010) dan sesudah EGS (Maret 2013 hingga Februari 2015) dan model kecepatan 1 dimensi dari katalog, penentuan hiposenter menggunakan program yang dikembangkan penulis menggunakan *Graphical User Interfaces* (GUI) di MATLAB, serta pengolahan data hingga model 3D sebaran *poisson's ratio* menggunakan *software* Oasis Montaj.

### C. Tujuan

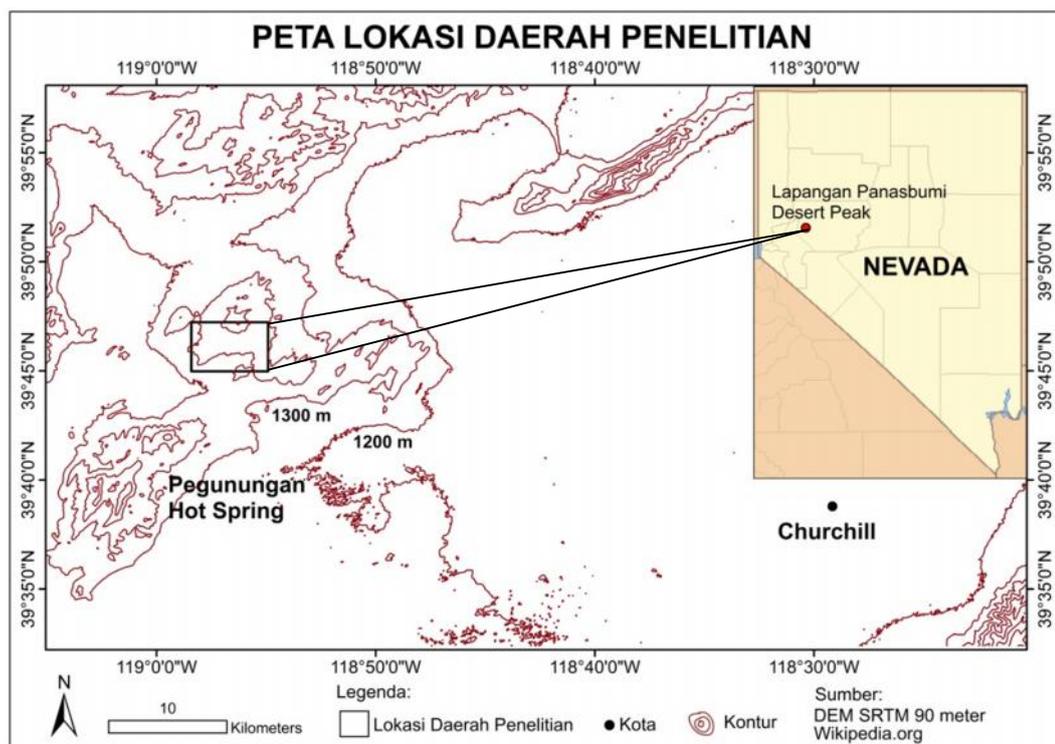
Tujuan dari dilakukannya penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Membuat program penentuan hiposenter menggunakan *Graphical User Interfaces* (GUI) di MATLAB.

2. Menganalisis sebaran hiposenter gempa mikro di Lapangan Panasbumi Desert Peak sebelum dan sesudah stimulasi EGS.
3. Menganalisis sebaran *poisson's ratio* di Lapangan Panasbumi Desert Peak sebelum dan sesudah stimulasi EGS.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

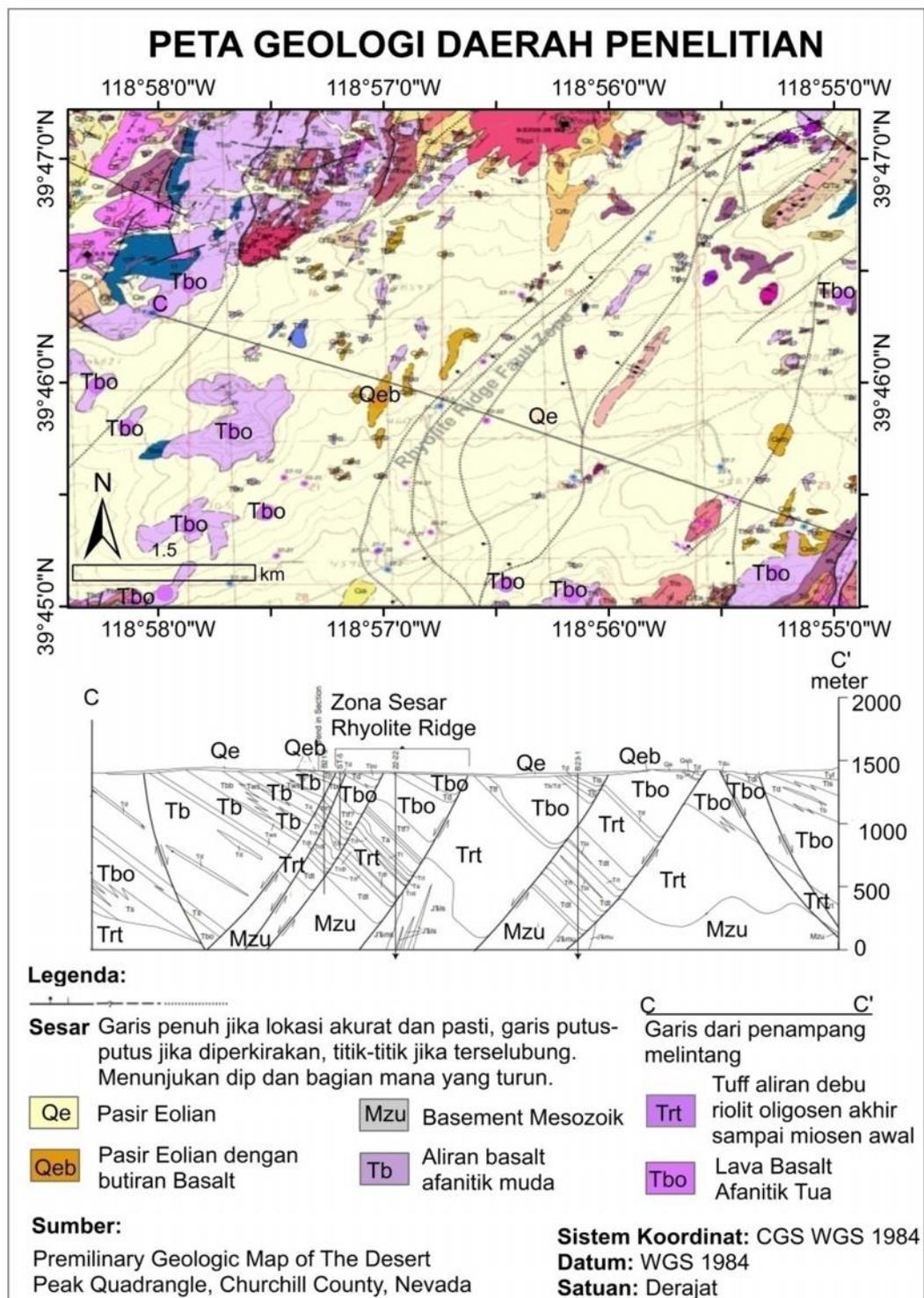
### A. Lokasi Daerah Penelitian



Gambar 2. Peta lokasi daerah penelitian

Posisi lokasi daerah penelitian diperlihatkan pada Gambar 2. Lapangan panasbumi Desert Peak secara administratif berada di Wilayah Churchill, Nevada. Terletak di bagian utara Pegunungan Hot Spring dengan ketinggian 1400 mdpl. Berada di koordinat geografis  $39,75^{\circ}$  Lintang Utara dan  $118,95^{\circ}$  Bujur Barat.

## B. Geologi Daerah Penelitian

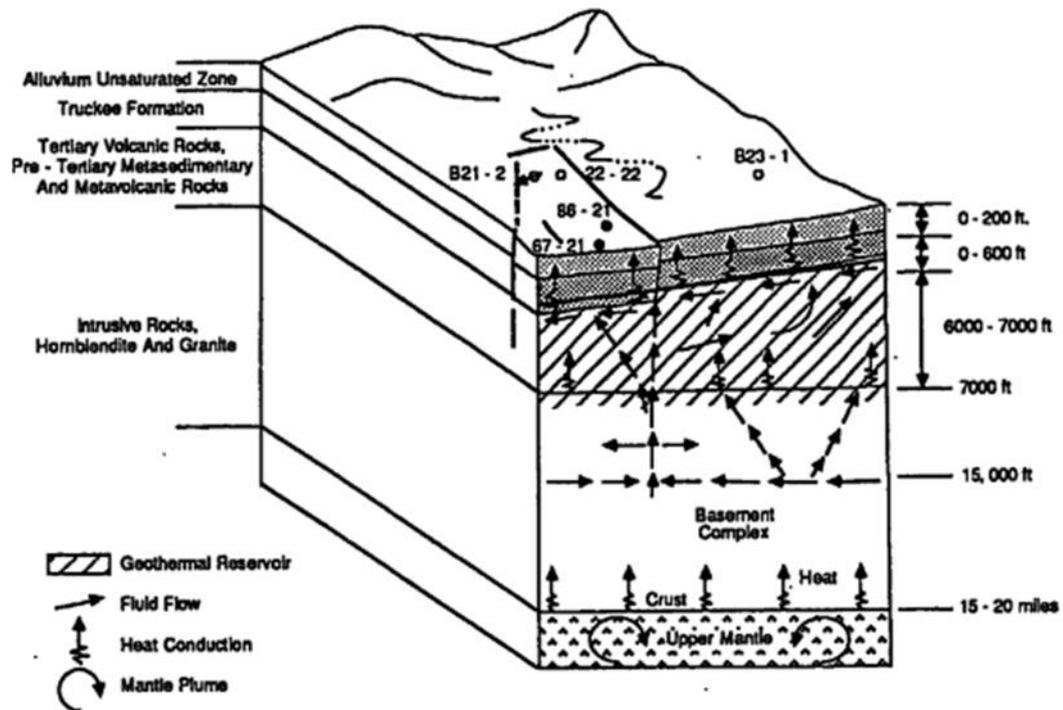


Gambar 3. Peta geologi daerah penelitian

Geologi daerah penelitian diperlihatkan pada Gambar 3. Lapangan panasbumi Desert Peak adalah sistem panas bumi yang tidak memiliki manifestasi permukaan berupa mata air panas atau fumarol. Suhu air di sumur produksi sekitar 215°C sesuai dengan data termometer geokimia. Lapangan panasbumi Desert Peak didominasi oleh sesar normal dengan tren utara-timur laut. Sesar yang paling signifikan di daerah ini adalah Zona Sesar *Rhyolite Ridge*, yang terdiri dari beberapa helai di sekitar lapangan panasbumi. Lapangan panasbumi Desert Peak lokasi utamanya berada di Zona Sesar *Rhyolite Ridge*.

Secara umum, batuan yang tersingkap dipermukaan deposit eolian kuartar yang terdiri dari batuan alluvial yang berasosiasi dengan batuan vulkanik dari Danau Lahontan saat Pleistosen (Formasi Truckee), Basalt Miosen (Formasi Choropaghus), dan Oligosen sampai miosen riolitik. Batuan bawah permukaan di Lapangan Panasbumi Desert Peak terdiri dari batuan vulkanik oligosen akhir sampai miosen awal yang berada di atas *basement* granitik dan metamorfik mesozoik. Urutan bagian yang paling tebal dari deretan aliran debu riolitik tersier ubahan aliran lava dan tuff menghampar dan mengerosi bagian atas dari *basement* metamorfik.

Konseptual model Lapangan Panasbumi Desert Peak diperlihatkan pada Gambar 4. Fluida reservoir terlihat naik dari kedalaman melewati rekahan atau patahan, lalu tertahan oleh sedimen permeabel yang berperan sebagai batuan penudung (*cap rock*). Batuan penudung ini memiliki ketebalan 244 meter yang terdiri dari zona aluvial dan Formasi Truckee. Reservoir terdiri dari Batuan vulkanik Tersier, batuan metavulkanik dan metasedimen pre-tercier. Keberadaan reservoir ini di kedalaman 244 meter sampai 2135 meter.



Gambar 4. Konseptual model sistem panasbumi Desert Peak (Benoit dkk., 1982)

Keberadaan dari sedikitnya empat akuifer panas dekat permukaan telah dibuktikan dengan pemboran. Bagian paling atas dari reservoir ini berada pada elevasi 1262 meter dan bagian paling bawah dari akuifer ini berada pada elevasi 896 meter. Ketebalan akuifer bervariasi dari 3m sampai 366m. Sedangkan temperaturnya dari 39°C sampai 148°C. Akuifer tersebut diperkirakan memiliki luas 14 mil<sup>2</sup>. Berdasarkan data geokimia, air dari akuifer ini berasal dari reservoir panasbumi Desert Peak dengan temperatur 204°C (Benoit dkk., 1982).

### C. Energi Panasbumi

Energi panasbumi (*geothermal*) merupakan salah satu bentuk energi alami yang dihasilkan oleh bumi. Sesuai dengan namanya, energi panasbumi mengacu pada panas (di atas suhu lingkungan rata-rata) yang tersimpan di dalam bumi, dan berasal terutama dari peluruhan bahan radioaktif di kerak bumi. Secara

alami, suhu bumi bertambah besar secara konstan selaras dengan bertambahnya kedalaman pada sistem panasbumi bumi mengalami peningkatan panas yang *kontinyu* seiring bertambahnya kedalaman lapisan. Perubahan suhu bumi ini biasa disebut gradien panasbumi (Suharno, 2013). Rata-rata peningkatan temperatur kerak bumi sebesar  $72^{\circ}\text{F}/\text{mil}$  atau  $25^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , meskipun masih dimungkinkan adanya perbedaan yang besar dari satu tempat dengan tempat lainnya (Kirkland, 2010). Seperti contoh, daerah vulkanik memiliki gradien temperatur yang lebih tinggi pada kedalaman dangkal dibanding daerah lainnya dengan kedalaman yang sama.

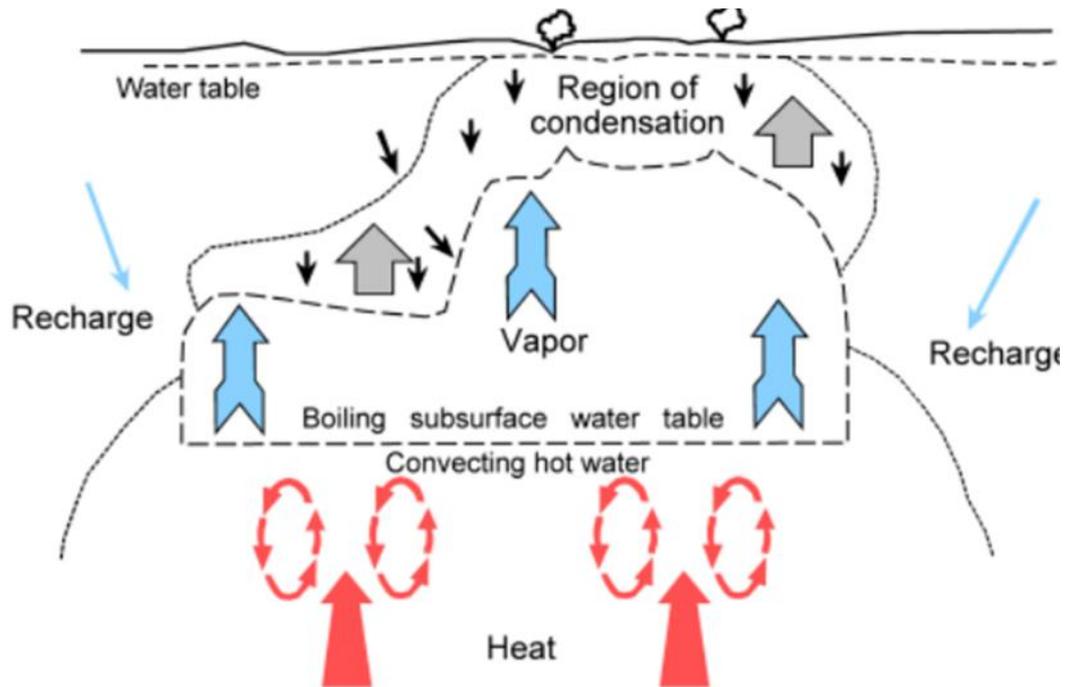
### **1. Tipe Sumber Daya Panasbumi**

Tipe sumber daya panasbumi yang terdapat di bawah permukaan menjadi enam kategori, yaitu:

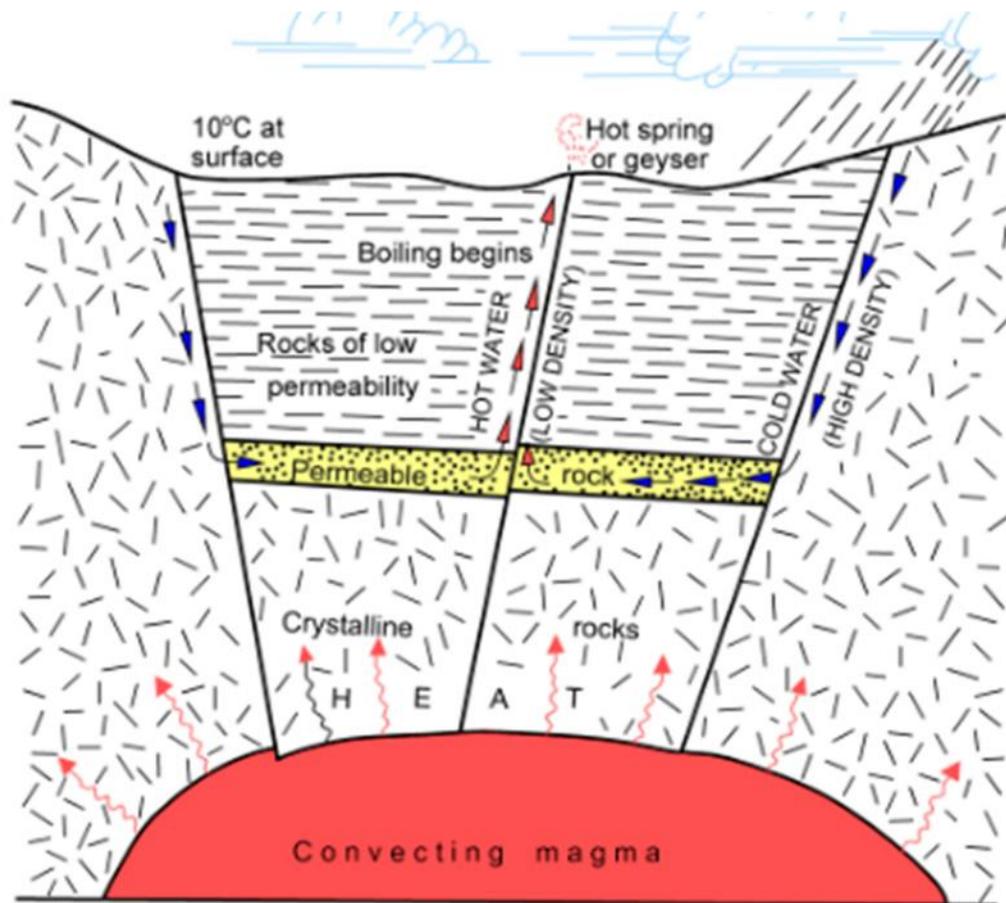
#### **a. Sumber Daya *Hydrothermal*.**

Terjadi ketika panasbumi dibawa keatas oleh sirkulasi konveksi air panas atau uap yang terjadi secara alamiah. Beberapa sumber daya panasbumi temperature tinggi dihasilkan dari sirkulasi dalam dari air sepanjang rekahan. Sumber daya *hydrothermal* dibagi menjadi system dominasi uap dan system dominasi air.

Sistem dominasi uap diperlihatkan pada Gambar 5, menghasilkan *steam* dari air mendidih di kedalaman, larutan garam di batuan permeabilitas rendah. Reservoir ini memiliki jumlah yang sedikit, seperti Geysers di California Utara, Larderello di Italia dan Matsukawa di Jepang dimana *steam* dieksploitasi untuk menghasilkan energi listrik.



Gambar 5. Sistem panasbumi dominasi uap (White dkk., 1971)

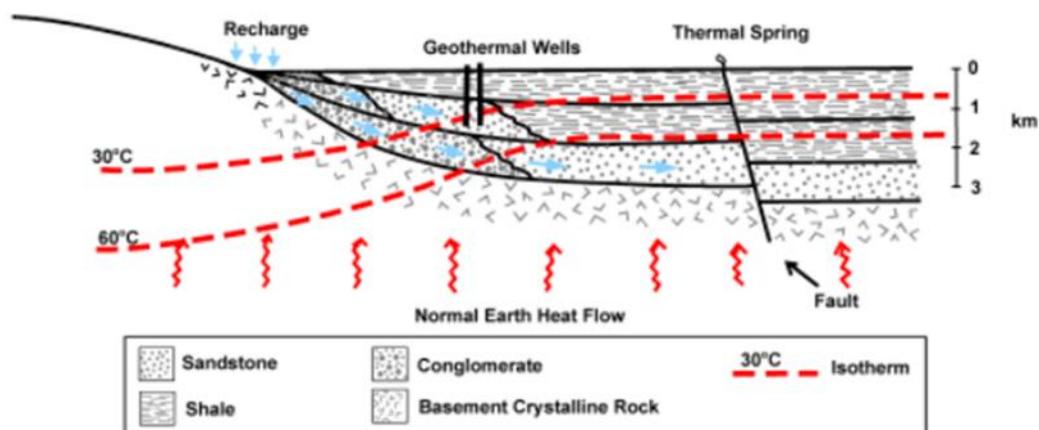


Gambar 6. Sistem panasbumi dominasi air (White dkk., 1971)

Sistem dominasi air diperlihatkan pada Gambar 6, diproduksi oleh sirkulasi air tanah ke bawah dan naik dari buoyancy di reservoir permeable dimana temperaturnya seragam di volume yang besar. Berikut ini tipe dari zona *upflow* di tengah tiap sel konveksi, zona *outflow* atau *plume* dari air panas bergerak secara mendatar menjauh dari pusat sistem dan zona *downflow* dimana merupakan tempat *recharge*. Manifestasi permukaan termasuk mata air panas, fumarol, geyser, deposit travertine, batuan teralterasi kimiawi, atau kadang kala tidak ada manifestasi permukaan (sumberdaya *blind*).

#### b. Cekungan Sedimen

Cekungan sedimen diperlihatkan pada Gambar 7, memproduksi sumberdaya temperatur yang lebih tinggi dari formasi sekitarnya. Secara umum memanjang di area yang luas dan merupakan tipe dari formasi Madison dari Dakota Utara, Dakota Selatan, Montana dan area Wyoming dari Amerika Utara dan Cekungan Pannonian dari Eropa Tengah dimana telah digunakan secara luas di Hungaria.

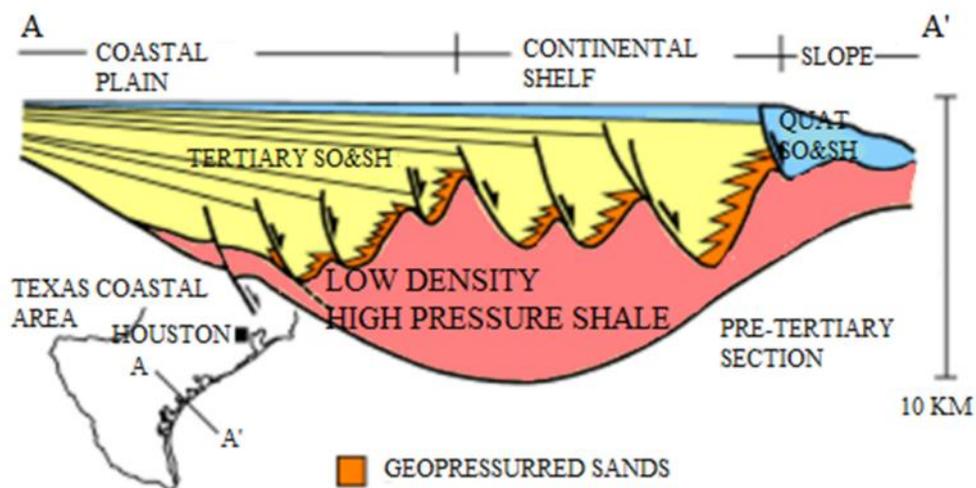


Gambar 7. Sumber daya cekungan sedimen (Anderson dan Lund, 1979)

#### c. Sumber Daya *Geopressured*

Sumber daya *Geopressured* diperlihatkan pada Gambar 8, terjadi di

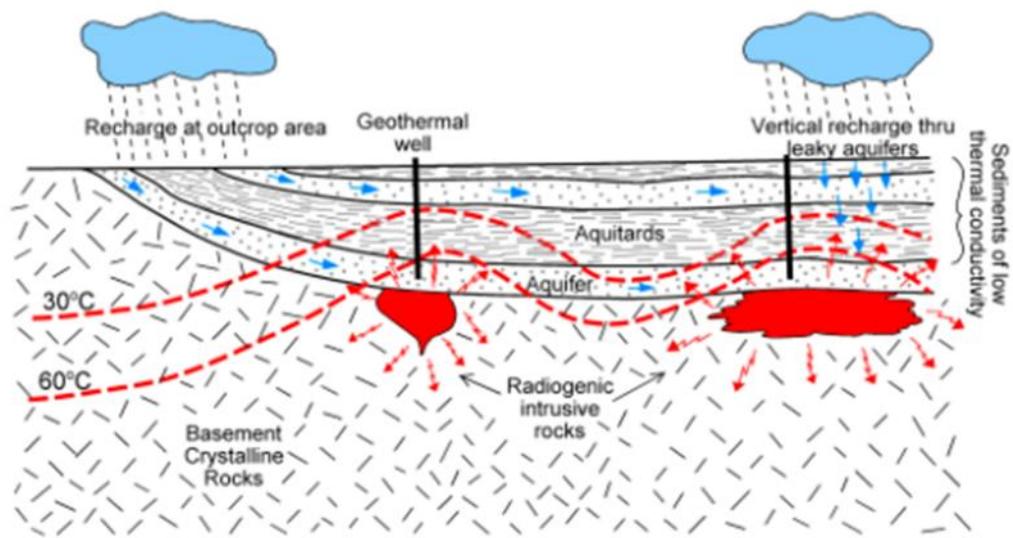
lingkungan cekungan dimana fluida yang terpendam dalam terkandung di batuan sedimen permeable yang terpanaskan di normal atau peningkatan gradient panas bumi. Fluida tersebut terjepit dengan ketat oleh batuan permeable sekitar dan memiliki tekanan yang lebih besar dari hidrostatik. Air panas dibawah tekanan tinggi di akuifer pasir adalah target pengeboran, terutama jika mereka mengandung metana terlarut. Sumber energy tersedia dari tipe ini terdiri dari panas, energy mekanik dan metana. Pesisir teluk Louisiana dan Texas di Amerika telah diuji untuk energi panas bumi, bagaimanapun kedalaman beberapa kilometer tidak ekonomis.



Gambar 8. Sistem panas bumi *Geopressured* (Bebout dkk., 1978)

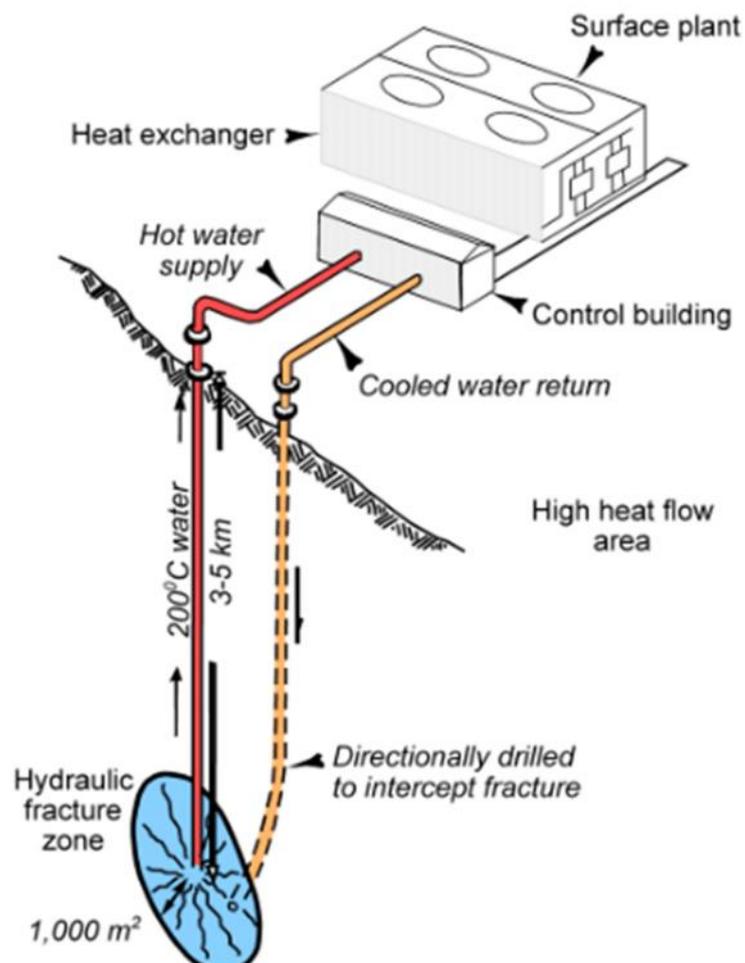
#### d. Sumber Daya *Radiogenic*

Sumber daya *radiogenic* diperlihatkan pada Gambar 9, ditemukan di intrusi granitik di dekat permukaan memanaskan air tanah lokal dari peluruhan radioaktif thorium, potassium dan uranium. Peningkatan normal gradient panas bumi menyediakan air panas di kedalaman pengeboran yang ekonomis, Tipe sumber daya ini terjadi sepanjang sebelah timur Amerika, tapi belum dikembangkan secara komersil.



Gambar 9. Sistem panasbumi *Radiogenic* (Anderson dan Lund, 1978)

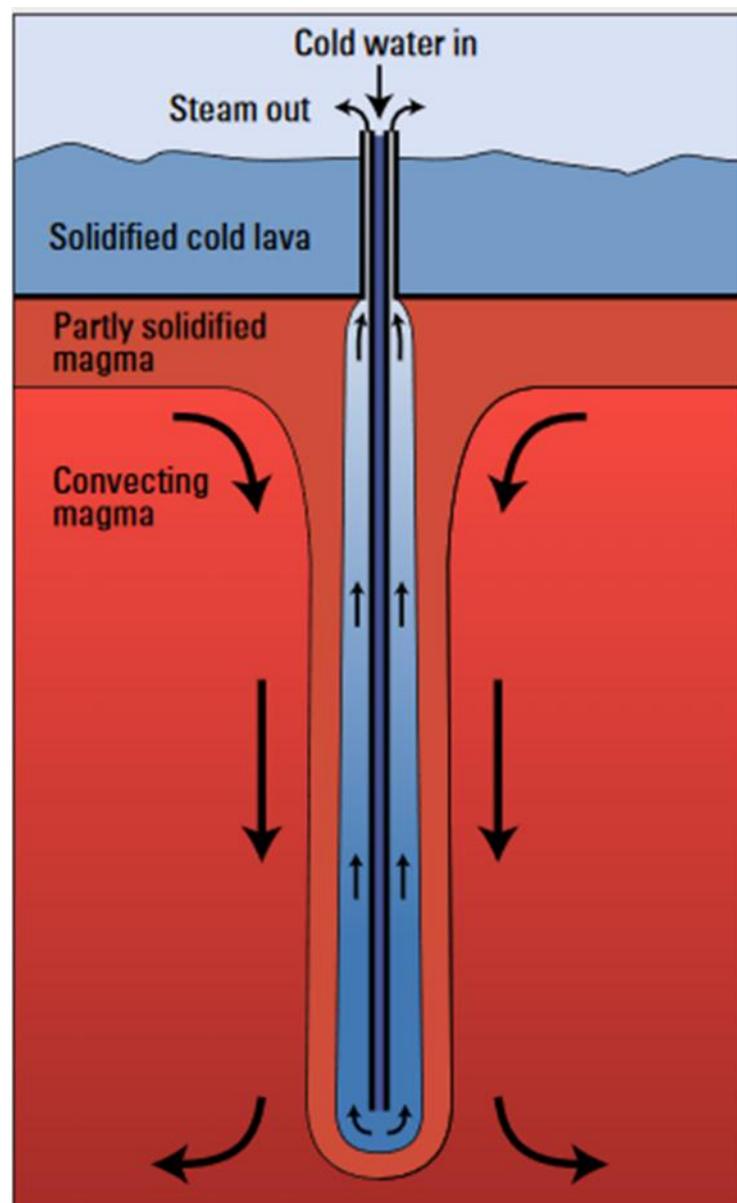
e. Sumber Daya *Hot Dry Rock*



Gambar 10. Eksploitasi *Hot Dry Rock* (Tenzer, 2001)

Sumber daya *hot dry rock* diperlihatkan pada Gambar 10. Batuan panas ini memiliki ruang pori yang sedikit dan mengandung sedikit air dan sedikit permeabilitas. Untuk mengekstrak panas, dilakukan rekahan buatan menggunakan tekanan hidrolik, menggunakan sirkulasi ke bawah air dingin oleh sumur pertama untuk mengekstrak panas dari batuan dan memproduksi dari sumur kedua di sistem tertutup.

f. Sumber Daya Magma



Gambar 11. Sumber daya magma (Wendell dan John, 2003)

Sumber daya magma diperlihatkan pada Gambar 11. Sebuah pipa diborkan atau ditekan kedalam magma. Air dingin dipompakan kebawah melalui pipa, menjadi dipanaskan oleh magma yang melakukan kontak dengan pipa dan kembali ke permukaan menjadi *steam*. Sistem ini telah sukses dicoba di Kawah Kilauea Iki, Gunungapi Kilauea, Hawaii pada tahun 1980.

## 2. Komponen Penyusun Sistem Panasbumi

Sistem panas bumi dikontrol oleh adanya:

- a. Sumber panas (*heat source*) berupa plutonik,
- b. Batuan berporos atau reservoir (*reservoir*) tempat uap panas terjebak di dalamnya,
- c. Lapisan penutup, berupa batu lempung,
- d. Keberadaan struktur geologi (patahan, runtunan, rekahan dan ketakselarasan),
- e. Daerah resapan air atau aliran air bawah permukaan (*recharge area*).

Air hujan merembes ke dalam tanah melalui pori-pori atau rongga-rongga diantara butir-butir batuan, sehingga air dengan leluasa menerobos turun ke batuan panas. Air tersebut terakumulasi dan terpanaskan oleh batuan panas, akibatnya suhu air meningkat, volume bertambah dan tekanan menjadi naik. Tekanan yang terus meningkat menyebabkan air panas naik ke atas melalui celah, retakan dan pori-pori yang berhubungan di dalam permukaan (Suharno, 2013).

## 3. Klasifikasi Temperatur

Skema yang mungkin dalam sumberdaya panasbumi diklasifikasikan ke dalam tujuh kategori berdasarkan temperaturnya, yaitu:

a. Kelas *Non-electrical*

Kelas ini memiliki suhu kurang dari 100°C. Titik didih air di tekanan atmosfer adalah 100°C batas bawah yang pantas untuk menghasilkan energi dari fluida panasbumi. Proyek energy panasbumi yang tidak komersial didasarkan pada sumberdaya yang lebih dingin dari 100°C. Oleh karena itu, sumberdaya dalam kelas ini hanya sesuai untuk kegunaan *non-elektrikal*.

b. Temperatur Sangat Rendah

Kelas ini memiliki suhu antara 100°C sampai 150°C. Fase fluida yang aktif di resevoir ini adalah air. Hanya ada tiga proyek (kapasitas total 6 MWe) yang telah dikembangkan di Amerika Serikat berdasarkan sumberdaya panasbumi di rentang suhu 100°C sampai 150°C.

c. Temperatur Rendah

Kelas ini memiliki suhu antara 150°C sampai 190°C. Fase fluida yang aktif di reservoir ini adalah air. Air panasbumi sampai rentang suhu ini harus di pompa karena fluida tidak cukup energy untuk mengalir sendiri ke tingkat komersil.

d. Temperatur Sedang

Kelas ini memiliki suhu antara 190°C sampai 230°C. Fase fluida yang aktif di reservoir ini adalah air.

e. Temperatur Tinggi

Kelas ini memiliki suhu antara 230°C sampai 300°C. Fase fluida yang aktif di reservoir ini adalah uap.

f. Temperatur Ultra Tinggi

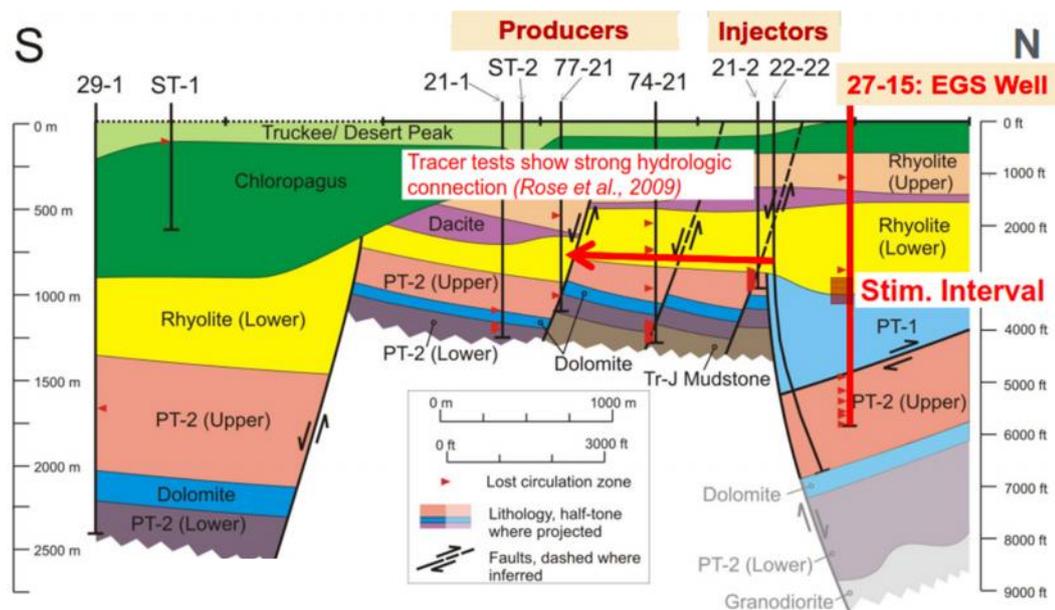
Kelas ini memiliki suhu lebih dari 300°C. Fase fluida yang aktif di

reservoar ini adalah uap. Batas atas temperature unruk kelas ini mungkin berhubungan dengan temperature kritis air ( $374,1^{\circ}\text{C}$ ).

#### g. Lapangan Uap

Kelas special ini adalah sumberdaya yang harus dikenali, keunikan ini menjadi luar biasa ketika temperature dan tekanan awal tetap (kira-kira  $240^{\circ}\text{C}$  dan 33,5 bar-a) dengan entalpi 2800 kJ/kg, seperti lapangan panasbumi Kamojang (Indonesia) dan The Geysir (California). Fase fluida yang aktif di reservoar ini adalah uap (Sanyal, 2005).

#### D. EGS (*Enhanced Geothermal System*)



Gambar 12. Lokasi stimulasi EGS (Hickman dan Davatzes, 2010)

EGS (*Enhanced Geothermal System*) adalah metode memanen energi dari kerak bumi dengan cara melewati fluida melalui zona yang ditingkatkan permeabilitasnya di batuan bawah permukaan. Peningkatan dimulai dari 1) mengebor sampai kedalaman yang cukup dimana temperature tinggi berada; 2) menciptakan permeabilitas yang cukup sehingga fluida dapat

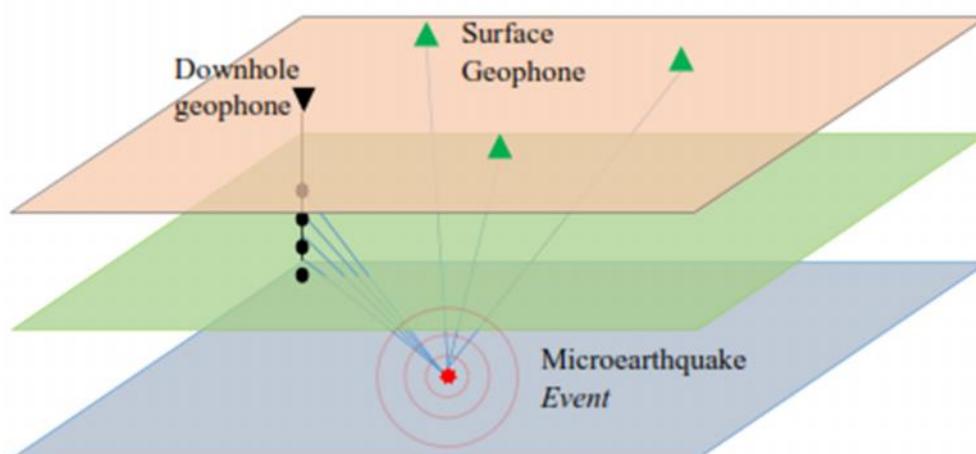
dibilas pada tingkatan yang signifikan melewati batuan panas, sasarannya mentransfer energi panas ke fluida tanpa terlalu banyak kehilangan fluida ke dalam batuan dan 3) mengekstrak energy dari fluida untuk menghasilkan listrik (Jeanloz dan Stone, 2013).

Lokasi stimulasi EGS di Lapangan Panasbumi Desert Peak diperlihatkan pada Gambar 11. Interpretasi penampang melintang utara-selatan di Lapangan Panasbumi Desert Peak. Stimulasi berada di interval 3000 sampai 3500 ft di dasar riolit tersier dan di atas batuan metasedimen pre-tercier. Anak panah merah menggambarkan hubungan hidrologi yang kuat antara sumur injeksi dan sumu produksi yang berada di selatan dari sumur EGS. Jadi, untuk meningkatkan hubungan hidrologi antara sumur 27-15 dan ujung utara lapangan yang sedang aktif, dilakukan peningkatan zona permeabilitas selama stimulsi hidrolik di sumur 27-15.

### III. TEORI DASAR

#### A. Metode *Micro Earthquake (MEQ)* atau Gempa Mikro

Metode gempa mikro menggunakan sumber pengukuran gelombang sesmik natural yang memiliki frekuensi rendah. Gempa mikro merekam gempa-gempa ( $< 3$  SR). Konsep metode gempa mikro diperlihatkan pada Gambar 13. Konsep pengukuran gempa mikro sama dengan metode seismik, yaitu dengan menangkap gelombang getar yang berasal dari sumber getar atau sumber gempa. Secara sederhana metode ini merekam *event-event* seismik (gempa mikro) yang ada di suatu tempat. Sama dengan cara kerja jaringan seismograf di dunia untuk mempelajari gempa, walaupun magnitudo yang terekam lebih kecil dengan resolusi yang lebih baik tentunya.

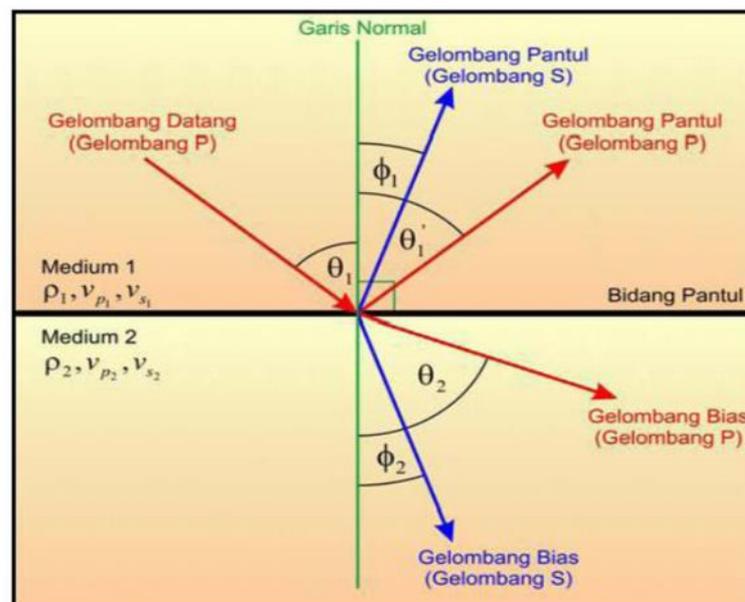


Gambar 13. Konsep metode gempa mikro/*microearthquake*

## 1. Hukum Fisika Gelombang Seismik

### 1.1. Hukum Snellius

Perambatan gelombang seismik dari satu medium ke medium lain yang mempunyai sifat fisik yang berbeda seperti kecepatan dan densitas akan mengalami perubahan arah ketika melewati bidang batas antar medium. Suatu gelombang yang datang pada bidang batas dua media yang sifat fisiknya berbeda akan dibiaskan jika sudut datang lebih kecil atau sama dengan sudut kritisnya dan akan dipantulkan jika sudut datang lebih besar dari sudut kritis. Sudut kritis adalah sudut datang yang menyebabkan gelombang dibiaskan  $90^\circ$ . Jika suatu berkas gelombang  $P$  yang datang mengenai permukaan bidang batas antara dua medium yang berbeda, maka sebagian energi gelombang tersebut akan dipantulkan sebagai gelombang  $P$  dan gelombang  $S$ , dan sebagian lagi akan dibiaskan sebagai gelombang  $P$  dan gelombang  $S$ , seperti yang diilustrasikan pada gambar dibawah ini.



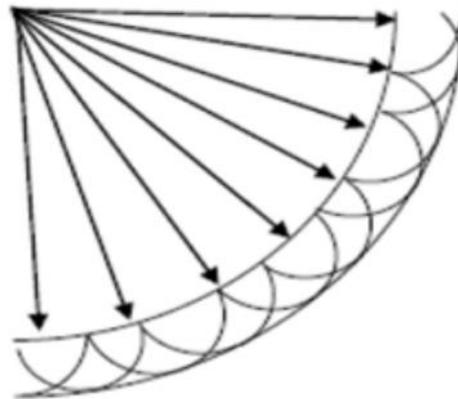
Gambar 14. Hukum Snellius (Bhatia dan Singh, 1986)

Lintasan tersebut mengikuti hukum Snellius, yaitu:

$$\frac{\sin\theta_1}{v_{p1}} = \frac{\sin\theta_1'}{v_{p1}} = \frac{\sin\theta_2}{v_{p2}} = \frac{\sin\phi_1}{v_{s1}} = \frac{\sin\phi_2}{v_{s2}} = p \quad (1)$$

### 1.2. Prinsip Huygens

Prinsip Huygens menyatakan bahwa setiap titik-titik pengganggu yang berada didepan muka gelombang utama akan menjadi sumber bagi terbentuknya deretan gelombang yang baru. Jumlah energi total deretan gelombang baru tersebut sama dengan energi utama. Gambar 15, menunjukkan prinsip Huygens. Didalam eksplorasi seismik titik-titik diatas dapat berupa patahan, rekahan, pembajian, antiklin, dll. Sedangkan deretan gelombang baru berupa gelombang difraksi.

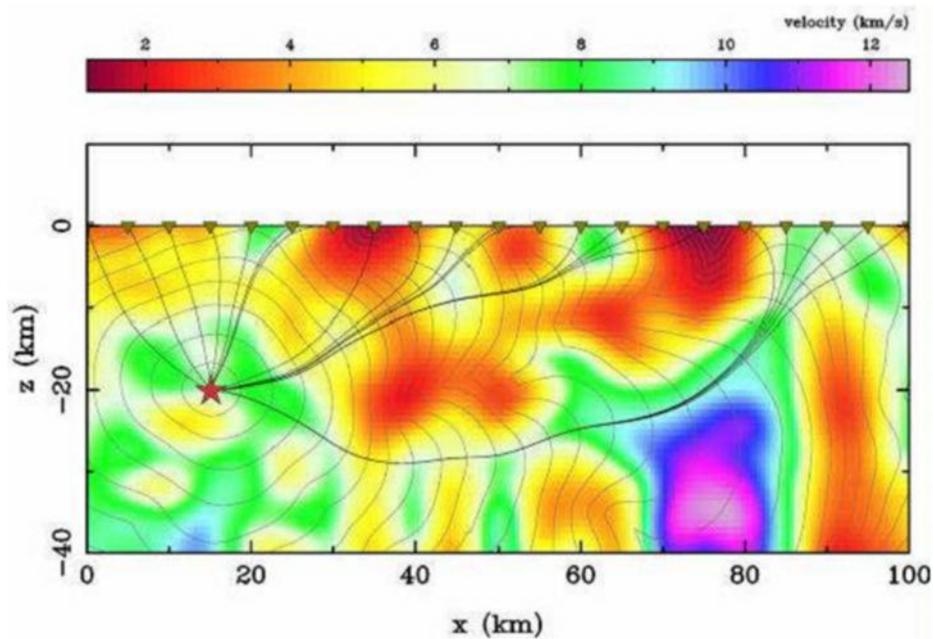


Gambar 15. Prinsip Huygens (Hasim dan Santosa, 2015)

### 1.3. Prinsip Fermat

Prinsip Fermat menyatakan bahwa jika sebuah gelombang merambat dari satu titik ke titik yang lain maka gelombang tersebut akan memilih jejak yang tercepat. Tidak selamanya yang terpendek itu tercepat. Dengan demikian jika gelombang melewati sebuah medium yang memiliki variasi kecepatan gelombang seismik, maka gelombang tersebut akan cenderung melalui zona-zona kecepatan

tinggi dan menghindari zona-zona kecepatan rendah. Untuk lebih jelasnya perhatikan gambar dibawah ini.



Gambar 16. Prinsip Fermat (Abdullah, 2007)

## 2. Gelombang Seismik

Gelombang seismik adalah rambatan energi yang disebabkan karena adanya gangguan di dalam kerak bumi, misalnya adanya patahan atau adanya ledakan. Energi ini akan merambat ke seluruh bagian bumi yang dapat terekam oleh seismometer. Efek yang ditimbulkan oleh adanya gelombang seismik ini adalah apa yang kita kenal sebagai fenomena gempa bumi. Perambatan gelombang seismik tergantung dari sifat elastisitas yang dimiliki oleh suatu batuan. Gelombang seismik yang melalui bidang interior bumi disebut Gelombang Badan sedangkan gelombang seismik yang merambat melalui luar bumi disebut Gelombang Permukaan (Biot dan Romain, 1965).

### 2.1. Gelombang Badan

Gelombang badan (*Body Wave*) adalah gelombang seismik yang

merambat hingga ke dalam bumi. Berdasarkan gerak partikel pada media dan arah penjarannya, gelombang dapat dibedakan menjadi:

#### a. Gelombang Primer

Gelombang P atau disebut juga gelombang primer adalah gelombang yang pertama kali tercatat di alat seismometer. Hal ini disebabkan karena gelombang ini memiliki kecepatan yang paling cepat dibandingkan gelombang seismik yang lain. Bentuk penjaran gelombang P adalah longitudinal dimana arah gelombang sejajar dengan arah penjarannya.

Gelombang P dapat menjar di semua medium. Arah getarannya kedepan dan kebelakang sehingga materi yang dilaluinya mengalami tekanan dan peragangan seperti spiral. Oleh karena itu, sering disebut dengan *Push-Pull Wave* atau *Compressional Wave*. Persamaan dari kecepatan gelombang P adalah

$$v_p = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2)$$

Dimana  $v_p$  adalah kecepatan gelombang primer,  $\lambda$  adalah parameter lame,  $\mu$  adalah modulus geser dan  $\rho$  adalah massa jenis batuan.

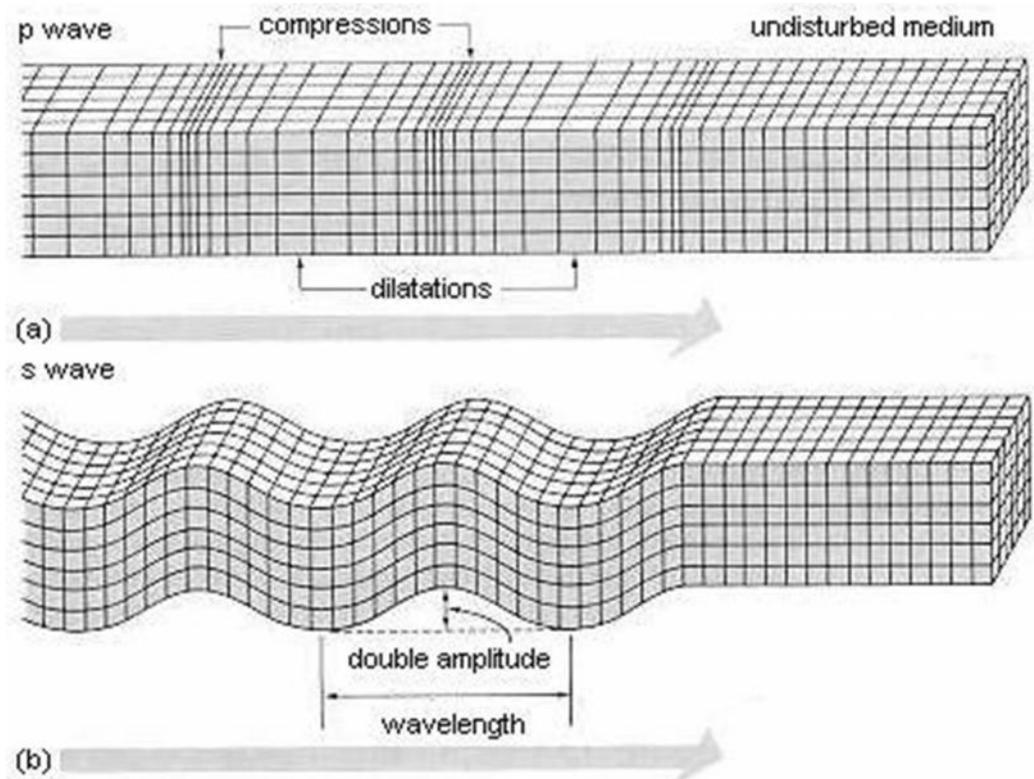
#### b. Gelombang Sekunder

Gelombang S atau gelombang sekunder adalah gelombang seismik yang hanya merambat di permukaan bumi. Merupakan gelombang transversal yang memiliki arah getar tegak lurus dengan arah penjarannya. Gelombang ini memiliki waktu perambatan yang lebih lama dari pada gelombang P sehingga akan tercatat setelah gelombang P pada alat seismometer. Gelombang S tidak dapat merambat di medium cair. Persamaan dari kecepatan gelombang S adalah,

$$v_s = \beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (3)$$

Dimana  $v_s$  adalah kecepatan gelombang sekunder,  $\mu$  adalah modulus geser dan  $\rho$  adalah massa jenis batuan.

Simulasi pergerakan gelombang badan diperlihatkan pada Gambar 17. Gelombang ini menyebabkan gerakan partikel-partikel media dalam arah tangensial terhadap arah penjalaran gelombang. Bila arah getar gelombang S terpolarisi pada bidang vertikal maka gelombang tipe ini disebut gelombang SV. Sedangkan bila arah getarnya terpolarisir pada bidang horisontal maka gelombang ini disebut gelombang SH (Munadi, 2002).



Gambar 17. Simulasi gerakan gelombang P dan S (Bolt, 1976)

## 2.2. Gelombang Permukaan

Gelombang permukaan (*Surface wave*) adalah jenis gelombang seismik yang hanya merambat di permukaan bumi. Amplitudo gelombang ini akan semakin melemah jika semakin masuk ke dalam bumi. Gelombang ini dapat

disamakan dengan gelombang air yang mengalir diatas permukaan bumi, gerakannya lebih lambat dibandingkan gelombang badan. Ada dua tipe Gelombang Permukaan, yaitu:

a. Gelombang *Rayleigh*

Gelombang *Rayleigh* adalah gelombang yang merambat pada batas permukaan saja dan hanya dapat merambat pada media padat serta arah getarannya berlawanan arah dengan arah perambatannya. Gelombang *Rayleigh* memiliki gerakan partikel yang merupakan kombinasi dari gerakan partikel Gelombang P dan S. Gerakan partikel gelombang ini terpolarisasi elips dengan faktor amplitudo yang mempunyai tanda berkebalikan sehingga gerakan partikelnya mundur (Santoso, 2002).

b. Gelombang *Love*

Gelombang *love* adalah gelombang yang hanya merambat pada batas lapisan saja dan bergerak pada bidang yang horisontal saja (Putri, 2012). Gelombang *Love* adalah Gelombang Permukaan yang gerakan partikelnya mirip dengan Gelombang S, yaitu terjadi secara transversal. Gelombang *Love* merupakan gelombang permukaan yang terbesar dan amplitudonya meningkat seiring dengan bertambahnya kedalaman. Gelombang *Love* merambat lebih cepat dibandingkan Gelombang *Rayleigh*.

### **3. Parameter Sumber Gempa**

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:

a. *Origin Time*

*Origin Time* atau waktu terjadinya gempa bumi merupakan waktu dimana pelepasan energi pertama kali terjadi pada lempeng tektonik bumi yang mengalami tekanan akibat tumbukan atau gesekan dan dinyatakan dalam hari, tanggal, bulan, tahun, jam, menit, detik dalam satuan UTC (*Universal Time Coordinated*).

b. Hiposenter

Hiposenter merupakan pusat gempa bumi yang berada di dalam permukaan bumi. Untuk memudahkan terkadang hiposenter diasumsikan sebagai sebuah titik, namun pada kenyataannya hiposenter merupakan sebuah bidang yang luasnya tergantung pada besarnya energi yang dilepaskan.

c. Episenter

Episenter merupakan titik di permukaan bumi yang merupakan reflektifitas tegak lurus dari hiposenter. Lokasi episenter dibuat dalam koordinat kartesian bola bumi atau sistem koordinat geografis dan dinyatakan dalam derajat lintang dan bujur.

d. Magnitudo

Ukuran dari kekuatan gempa disebut magnitudo, yaitu parameter gempa yang mengukur besarnya energi gempa yang dilepaskan dari sumbernya. Jadi pengukuran magnitudo yang dilakukan di tempat yang berbeda harus menghasilkan harga yang sama walaupun gempa yang dirasakan di tempat-tempat tersebut tentu berbeda. Satuan yang dipakai adalah Skala Richter.

## **B. Pemrograman MATLAB**

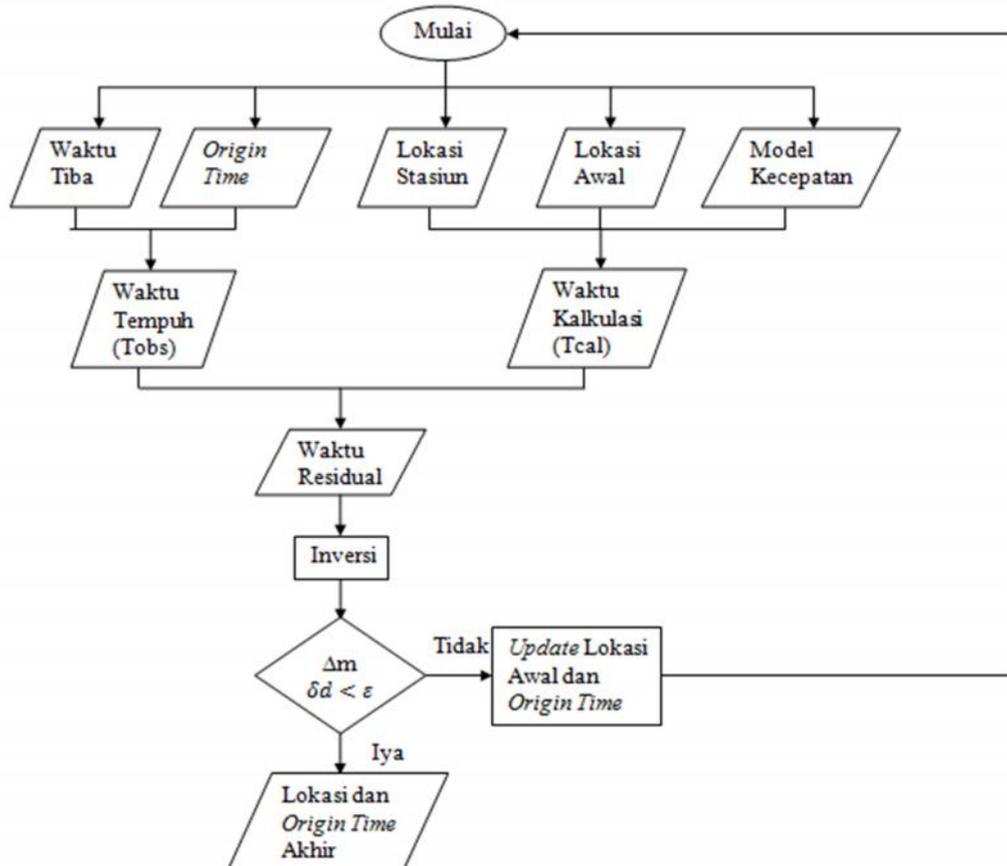
MATLAB merupakan bahasa pemrograman tingkat tinggi yang dikembangkan oleh MathWorks dan dikhususkan untuk komputasi numerik, visualisasi dan pemrograman. Selain itu pengguna matlab dapat melakukan analisa data, mengembangkan algoritma dan membuat aplikasi. Bahasa, *tools* dan fungsi-fungsi *built-in* akan memudahkan pengguna untuk mengeksplorasi berbagai pendekatan dan memperoleh solusi dengan lebih cepat dibandingkan apabila menggunakan bahasa pemrograman tradisional seperti C/C++ atau Java. MATLAB menggunakan konsep *array*/matrik sebagai standar variable elemennya tanpa memerlukan pendeklarasian *array* seperti pada bahasa lainnya. Selain itu juga diintegrasikan dengan aplikasi dan bahasa pemrograman eksternal seperti C, Java, NET dan Microsoft Excel (Kodong, 2015).

## **C. Metode *Single Event Determination* (SED)**

Metode ini dikembangkan oleh Geiger (1912) memperkenalkan teknik iterasi *least-square* untuk determinasi hiposenter gempa. Teknik ini cukup sederhana dan relatif mudah untuk diaplikasikan. Pada prinsipnya metode ini merupakan prosedur iterasi dengan optimasi *least square* dimana kuadrat residual minimum dari waktu tempuh gelombang seismik di setiap seismometer yang digunakan.

Berdasarkan propagasi gelombang dibedakan menjadi dua jenis yaitu gelombang P dan gelombang S. Gelombang P memiliki waktu tempuh yang lebih singkat dibandingkan dengan gelombang S sehingga memiliki residual waktu kedatangan kedua gelombang. Langkah pertama adalah menebak hiposenter dan *origin time* ( $x_0, y_0, z_0, t_0$ ). Dalam kasus *event* dekat atau dalam jaringan stasiun,

ini dapat diselesaikan menggunakan lokasi dekat stasiun dengan waktu tiba pertama dan menggunakan waktu tiba tersebut sebagai  $t_0$ . Untuk melinierkan masalah, sekarang diasumsikan bahwa hiposenter sebenarnya cukup dekat dengan nilai tebakan sehingga waktu tempuh residual itu di hiposenter percobaan adalah fungsi linier dari koreksi yang kita punya untuk membuat jarak hiposenter.



Gambar 18. Alur SED

Dimulai dari  $t$  adalah waktu tiba pertama gelombang seismik di setiap stasiun ke- $i$  ( $x_i, y_i, z_i$ ) dari hiposenter,  $t_{cal}$  adalah waktu tempuh kalkulasi berdasarkan model kecepatan 1 dimensi bawah permukaan. Waktu residual  $r_i$  untuk stasiun  $i$  adalah selisih antara waktu tiba observasi dan waktu tiba kalkulasi yang secara matematis dirumuskan sebagai berikut:

$$r_i = t_i^{obs} - t_i^{cal} \quad (4)$$

Pendekatan yang paling umum untuk menggunakan solusi *least squares* untuk menemukan jumlah residual kuadrat minimum  $e$  dari  $n$  observasi:

$$e = \sum_{i=1}^n (r_i)^2 \quad (5)$$

Lokasi hiposenter akan menjadi titik yang paling sesuai antara waktu kalkulasi dan observasi dengan cara  $e$  terkecil. Residual *root mean squared* (RMS) digambarkan sebagai  $\sqrt{\frac{e}{n}}$ . RMS diberikan dalam hampir semua program lokasi dan umumnya digunakan sebagai panduan untuk akurasi lokasi (Havskov dan Ottemoller, 2010).

Selanjutnya residual dapat dituliskan:

$$r_i = \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial x_i} \Delta x + \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial y_i} \Delta y + \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial z_i} \Delta z + \Delta t \quad (6)$$

Dengan,

$t_i^{tra}$  : waktu tempuh kalkulasi di stasiun  $i$

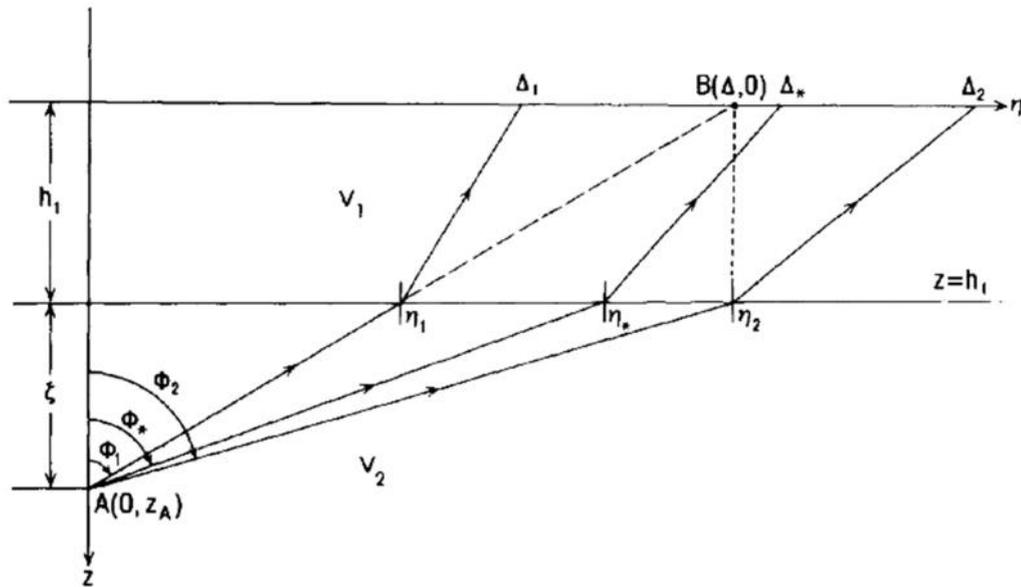
$$t_i^{tra} = \frac{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}}{v} \quad (7)$$

$$\frac{\partial t_i^{tra}}{\partial x} = \frac{(x-x_i)}{v} \frac{1}{\sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2 + (z-z_i)^2}} \quad (8)$$

Persamaan yang sama juga digunakan untuk  $y$  dan  $z$ .

Bagaimanapun, jika sumber gempa berada di lapisan kedua atau lebih dalam, tidak ada formula jelas untuk menghitung waktu tempuh dari *direct path*. Dalam kasus ini, kita harus menggunakan prosedur iterasi untuk menemukan sudut  $\emptyset$  yang berhubungan dengan sinar yang akan diterima stasiun sepanjang *direct path*. Pertimbangkan sebuah model dimana sumber gempa berada di lapisan kedua yang ditunjukkan pada gambar 19. Lapisan pertama mempunyai ketebalan  $h_1$ ,  $v_1$  dan  $v_2$  adalah kecepatan lapisan pertama dan kedua. Dalam

model ini kecepatan lapisan meningkat dengan kedalaman sehingga  $v_2 > v_1$ . Dipilih sebuah system koordinat sehingga sumbu  $z$  melewati sumber di titik A dan sumbu  $\eta$  melewati stasiun di titik B.



Gambar 19. Perhitungan lintasan gelombang langsung untuk model berlapis

Untuk menemukan sudut  $\phi$  menggunakan prosedur iterasi yang berhubungan dengan gelombang yang akan mencapai stasiun, pertama anggap batas atas dan bawah ( $\phi_1$  dan  $\phi_2$ ) untuk sudut  $\phi$ . Jika kita menghubungkan titik A dan B menggunakan garis lurus, lalu  $\overline{AB}$  memotong garis  $z=h_1$  di titik  $\eta_1$ . Menggunakan Hukum Snell dan fakta bahwa  $v_2 > v_1$ ,  $\overline{A\eta_1}$  akan muncul ke permukaan di titik dengan koordinat  $\eta$  dari  $\Delta_1$ , yang selalu kurang dari  $\Delta$ . Lalu sudut  $\phi_1$  yang berhubungan dengan  $\overline{A\eta_1}$  bisa dipilih sebagai batas bawah dari  $\phi$ . Untuk menemukan batas atas dari  $\phi$ ,  $\eta_2$  menjadi titik langsung di bawah stasiun dan di garis  $z=h_1$ ,  $\eta_2 = \Delta$ . Menggunakan Hukum Snell dan  $v_2 > v_1$ ,  $\overline{A\eta_2}$  akan mencapai permukaan di titik dengan koordinat  $\eta$  dari  $\Delta_2$ , yang selalu lebih besar

dari  $\xi$ . Lalu sudut  $\theta_2$  yang berhubungan dengan  $\overline{\eta_2}$  bisa dipilih menjadi batas atas  $\theta$ .

Untuk memulai prosedur iterasi, anggap sebuah  $\overline{\eta^*}$  yang berhubungan dengan sudut  $\theta^*$ , sehingga  $\eta^*$  ditentukan oleh

$$(\eta^* - \eta_1) / (\eta_2 - \eta_1) = (\xi - \xi_1) / (\xi_2 - \xi_1) \quad (9)$$

$$\theta^* = \arctan(\eta^* / \xi) \quad (10)$$

Menggunakan Hukum Snell mengetahui  $\eta^*$ , kita dapat menentukan koordinat  $\Delta^*$ , dari titik dimana  $\overline{\eta^*}$  mencapai permukaan. Supaya sudut  $\theta^*$  disetujui,  $\overline{\eta^*}$  harus mencapai permukaan sangat dekat dengan stasiun  $|\Delta - \Delta^*| < \varepsilon$ , dimana batas error  $\varepsilon$  umumnya beberapa puluh meter. Jika  $|\Delta - \Delta^*| > \varepsilon$ , dipilih  $\theta^*$  baru dan mengulang prosedur yang sama. Untuk melakukan iterasi, harus mempertimbangkan dua kasus berikut:

1. Jika  $\theta^* > \theta_2$ ,  $\theta^*$  baru dipilih diantara  $\overline{\eta_1}$  dan  $\overline{\eta^*}$ . Untuk melakukan ini, di persamaan (8), nilai  $\Delta^*$  dan  $\eta^*$  diganti  $\xi_2$  dan  $\eta_2$ , sehingga didapatkan nilai baru dari  $\eta^*$ .
2. Jika  $\theta^* < \theta_1$ ,  $\theta^*$  baru dipilih diantara  $\overline{\eta_2}$  dan  $\overline{\eta^*}$ . Untuk melakukan ini, di persamaan (8), nilai  $\Delta^*$  dan  $\eta^*$  diganti  $\xi_1$  dan  $\eta_1$ , sehingga didapatkan nilai baru dari  $\eta^*$ . Di kedua kasus, nilai baru  $\theta^*$  dapat diketahui dari persamaan (9) (Lee dan Stewart, 1981).

Prosedur terdahulu untuk sumber di lapisan kedua bisa disamaratakan untuk sumber di lapisan yang lebih dalam, sebut saja di lapisan ke-j. Turunan spasial dari waktu tempuh di sumber untuk kasus ini adalah

$$\frac{\partial t_i^{tra}}{\partial x} = -[(x_i - x) / (L \cdot v_j)] \sin \theta \quad (11)$$

$$\frac{\partial t_i^{tra}}{\partial y} = -[(xi - x)/(\ell \cdot vj)] \sin\emptyset \quad (12)$$

$$\frac{\partial t_i^{tra}}{\partial z} = \cos \emptyset/vj \quad (13)$$

Dalam bentuk matriks kita dapat menuliskan

$$J \cdot m = d \quad (14)$$

$$[J^T] [J] m = [J]^T d \quad (15)$$

$$[ m] = [J^T J]^{-1} J^T d \quad (16)$$

Dengan elemen penyusun matriks sebagai berikut:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial x} & \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial y} & \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial z} & \frac{\partial t_i^{tra}}{\partial t} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial t_n^{tra}}{\partial x} & \frac{\partial t_n^{tra}}{\partial y} & \frac{\partial t_n^{tra}}{\partial z} & \frac{\partial t_n^{tra}}{\partial t} \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$m = \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta z \\ \Delta t \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$d = \begin{bmatrix} r_1 \\ \dots \\ \dots \\ r_n \end{bmatrix} \quad (19)$$

Dimana matriks J berupa matriks kernel (jacobian), bersisi derivative parsial residual waktu tempuh tiap stasiun terhadap parameter hiposenter berukuran  $n \times 4$ , dengan n adalah jumlah stasiun pengamat dan 4 adalah representasi jumlah parameter hiposenter yang dicari. Matriks  $m$  adalah model yang diinginkan dan  $d$  merupakan matriks residual berisikan parameter residual waktu tiba yang diperoleh dari data. Sehingga didapatkan perkiraan koordinat setelah dikoreksi, diberikan oleh persamaan:

$$X_0 + \Delta x = x \quad (20)$$

$$Y_0 + \Delta y = y \quad (21)$$

$$Z_0 + z = z \quad (22)$$

$$t_0 + t = t \quad (23)$$

Dengan,

$x_0, y_0, z_0, t_0$  : lokasi dan *origin time* dugaan

$x, y, z, t$  : selisih hiposenter dugaan hasil kalkulasi

$x, y, z, t$  : lokasi dan *origin time* hasil kalkulasi

Proses inversi jacobian dilakukan untuk mendapatkan matriks yang representasi dari nilai yang diinginkan. Proses inversi ini dilakukan dengan iterasi yang terus menerus untuk mendapatkan nilai konvergen sehingga nilai residual waktu  $t_{\text{obs}}$  dan  $t_{\text{cal}}$  mendekati 0.

Untuk solusi inversi linier teredam (*damped linier inversion*) sebagai berikut:

$$\Delta m = [J^T J + \epsilon^2 I]^{-1} J^T \Delta d \quad (24)$$

Penggunaan istilah redaman atau *damping* untuk estimasi parameter model sebagaimana dinyatakan oleh persamaan (24) berasosiasi dengan proses “meredam” ketidak-stabilan yang mungkin timbul akibat keterbatasan data pada inversi yang termasuk *under-determined*.

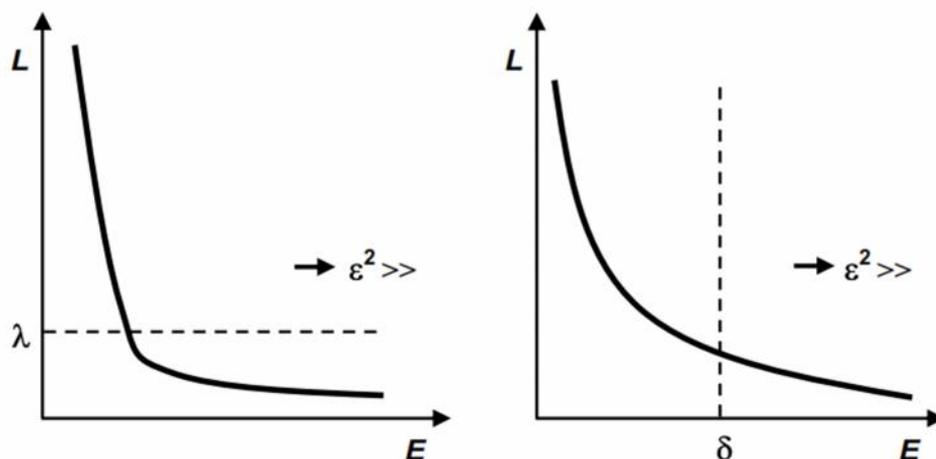
Secara matematis penambahan suatu bilangan relative kecil  $\epsilon^2$  pada setiap elemen diagonal matrik  $[J^T J]$  seperti terlihat pada persamaan (24) dapat menstabilkan proses inversi matriks (misalnya menggunakan algoritma eliminasi Gauss-Jordan) dilakukan prosedur *pivoting* yaitu membagi setiap baris matriks dengan elemen diagonalnya. Tujuan prosedur *pivoting* adalah untuk memperoleh elemen diagonal berharga satu yang kemudian digunakan untuk mengeliminasi elemen pada baris lainnya. Jika elemen diagonal sangat kecil atau mendekati nol

maka proses *pivoting* akan menghasilkan bilangan yang sangat besar dan proses inverse menjadi tidak stabil. Dengan kata lain parameter  $\epsilon^2$  berfungsi meredam ketidakstabilan proses inversi matriks tersebut.

Faktor redaman  $\epsilon^2$  yang sering disebut pula sebagai *regularization parameter* harus dipilih sedemikian rupa sehingga menyatakan perimbangan atau kompromi antara masing-masing faktor yang diminimumkan. Pada umumnya  $\epsilon^2$  ditentukan secara coba-coba (*trial and error*) kemudian melalui mekanisme tertentu dipilih diantara beberapa harga  $\epsilon^2$  dengan menerapkan salah satu dari kriteria berikut:

1. Norm model minimum dengan kesalahan prediksi data yang masih berada di bawah harga tertentu,  $E = \|e\|^2 \leq \delta$ .
2. Kesalahan prediksi data minimum dengan norm model  $L = \|m\|^2 \leq \lambda$ .

Harga L menurun sebagai fungsi  $\epsilon^2$ , sementara E meningkat sesuai peningkatan  $\epsilon^2$ . Plot harga L dan E untuk beberapa harga  $\epsilon^2$  (biasanya dalam skala log-log) menghasilkan kurva berbentuk “L” yang disebut *trade-off curve* yang dapat digunakan untuk menentukan harga  $\epsilon^2$  yang diperlihatkan pada Gambar 20 (Grandis, 2009).



Gambar 20. Tipe *trade-off curve*

Ketika metode iterasi digunakan, perhitungan harus dihentikan di titik tertentu. Pada penelitian ini, proses perhitungan iterasi akan berhenti ketika:

$$\delta d < \varepsilon \quad (25)$$

$$\delta d = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (26)$$

Dengan  $\delta d$  vektor koreksi dan  $\varepsilon$  adalah toleransi ( $\varepsilon > 0$ ) (Maochen, 2003).

Sejak penentuan lokasi gempa bumi dengan waktu tiba yang mengandung eror pengamatan dan waktu tempuh yang dihitung dengan asumsi model kecepatan, semua estimasi hiposenter akan mempunyai eror. Eror dalam hiposenter dan *origin time* umumnya didefinisikan dengan varian-covarian matrik  $\sigma_x^2$  dari parameter hiposenter. Matrik ini didefinisikan sebagai

$$\sigma_x^2 = \begin{pmatrix} \sigma_{xx}^2 & \sigma_{xy}^2 & \sigma_{xz}^2 & \sigma_{xt}^2 \\ \sigma_{yx}^2 & \sigma_{yy}^2 & \sigma_{yz}^2 & \sigma_{yt}^2 \\ \sigma_{zx}^2 & \sigma_{zy}^2 & \sigma_{zz}^2 & \sigma_{zt}^2 \\ \sigma_{tx}^2 & \sigma_{ty}^2 & \sigma_{tz}^2 & \sigma_{tt}^2 \end{pmatrix} \quad (27)$$

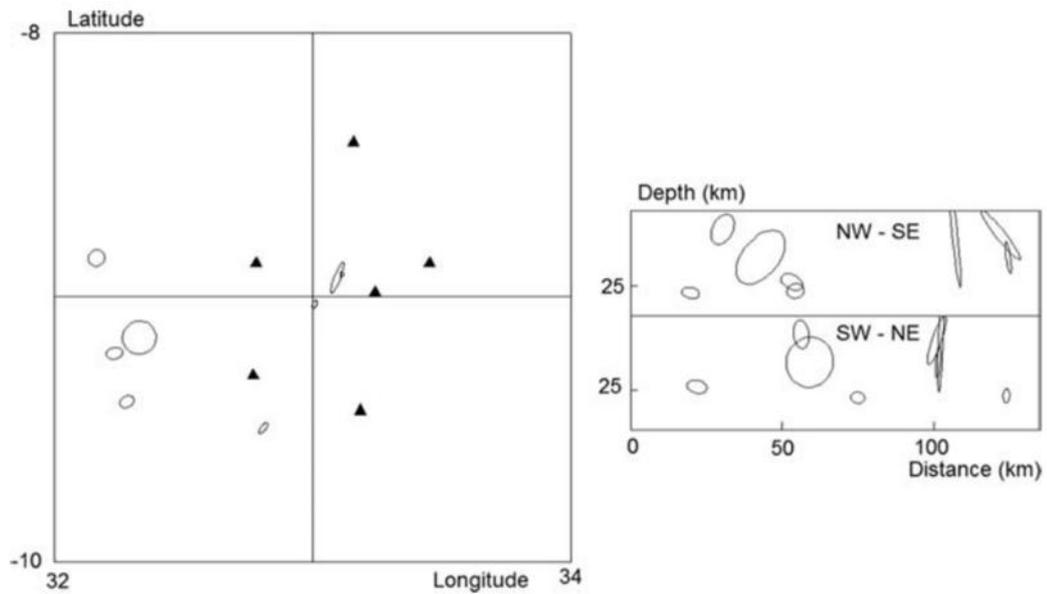
Elemen diagonal adalah varian dari parameter lokasi  $x_0$ ,  $y_0$ ,  $z_0$  dan  $t_0$  dimana selain diagonal elemen memberikan hubungan antara eror di parameter hiposenter yang berbeda. Dimana  $\sigma_x^2$  dapat dihitung dengan persamaan sebagai berikut

$$\sigma_x^2 = \sigma^2 (J^T J)^{-1} \quad (28)$$

Dimana  $\sigma^2$  adalah varian dari waktu tiba dikalikan dengan matrik identitas. Standar deviasi dari parameter hiposenter merupakan akar kuadrat dari elemen diagonal. Gambar 21, merupakan contoh untuk eror elips. Gambar tersebut menunjukkan eror elips yang lebih besar untuk *event* diluar jaringan dari pada didalam jaringan. Eror di kedalaman juga umumnya lebih besar dari pada eror di episenter. Variabel kritis dalam eror analisis adalah varian waktu tiba  $\sigma^2$ .

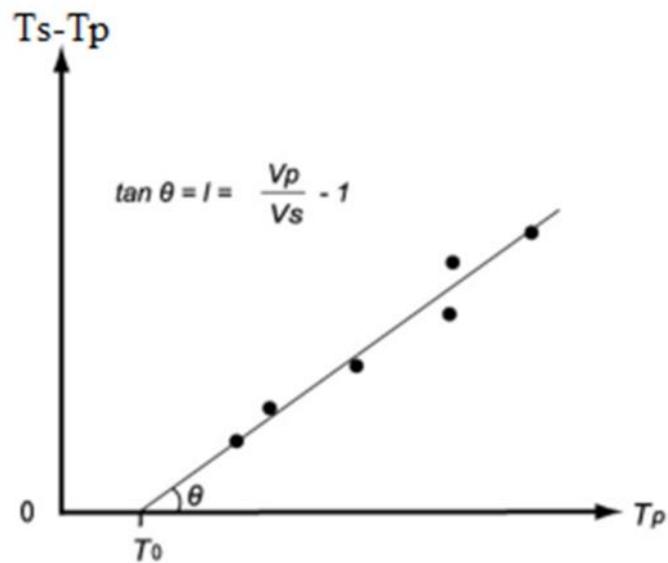
Nilai ini umumnya lebih besar dari pada yang diharapkan dari waktu dan *picking* eror sendiri, bagaimanapun ini bisa bervariasi dari kasus ke kasus. Kebanyakan program penentuan lokasi menentukan  $\sigma$  dari residual hiposenter:

$$\sigma^2 = \frac{1}{ndf} \sum_{i=1}^n (r_i^2) \quad (29)$$



Gambar 21. Titik hiposenter dengan error elips

#### D. Diagram Wadati



Gambar 22. Diagram Wadati

Analisa gempa bumi dapat menggunakan Diagram Wadati yang diperlihatkan pada Gambar 22, yang hanya menggunakan waktu tiba gelombang P dan gelombang S. Waktu S-P adalah perbedaan waktu antara waktu tiba gelombang P dan gelombang S dan sangat sering digunakan dalam analisa gempa bumi. Dalam penelitian ini Diagram Wadati sangat penting dalam pemrosesan data gempa mikro untuk dua alasan. Pertama diagram wadati dapat digunakan untuk mengontrol hasil *picking* waktu tempuh gelombang P dan gelombang S dari data rekaman. Kedua dapat digunakan untuk menentukan perbandingan  $v_p/v_s$  (*poisson's ratio*).

Plot waktu S-P terhadap waktu tiba gelombang P di setiap stasiun. Selanjutnya mencocokkan garis lurus ke semua data. Berikut ini adalah dasar dari Diagram Wadati, asumsikan medium homogen dan menggunakan notasi berikut:

$T_p$ : Waktu tiba gelombang P

$T_s$ : Waktu tiba gelombang S

$T_o$ : *Origin time*

$T_{po}$ : Waktu tempuh gelombang P ( $T_p - T_o$ )

$T_{so}$ : Waktu tempuh gelombang S ( $T_s - T_o$ )

$T_{sp}$ : Waktu S-P ( $T_s - T_p$ )

$v_p$ : Kecepatan gelombang P

$v_s$ : Kecepatan gelombang S

$D$ : Jarak hiposenter

Jarak hiposenter diwakili oleh waktu tempuh dan kecepatan gelombang P dan S sebagai berikut:

$$D = T_{po} * v_p \quad (30)$$

$$\begin{aligned}
 D &= T_{so} * v_s = (T_s - T_o) * v_s = \{(T_s - T_p) + (T_p - T_o)\} * v_s \\
 &= (T_{sp} + T_{po}) * v_s
 \end{aligned} \tag{31}$$

$$T_{po} * v_p = (T_{sp} + T_{po}) * v_s$$

$$T_{po} * (v_p - v_s) = T_{sp} * v_s \tag{32}$$

$$T_{sp} = \left( \frac{v_p}{v_s} - 1 \right) * T_{po}$$

$$T_{sp} = \left( \frac{v_p}{v_s} - 1 \right) * (T_p - T_o) \tag{33}$$

$$T_{sp} = I * T_{po}$$

### E. Poisson's Ratio

Pada dasarnya *poisson's ratio* didefinisikan dengan rasio regangan tegak lurus terhadap jenis gaya deformasi dalam arah gaya itu sendiri. Dapat juga didefinisikan sebagai perbandingan kecepatan gelombang kompresi dengan kecepatan gelombang transversal (Mavko dkk., 2003).

$$PR = \frac{v_p^2 - 2v_s^2}{2(v_p^2 - v_s^2)} \tag{34}$$

$$PR = \frac{(v_p/v_s)^2 - 2}{2[(v_p/v_s)^2 - 1]} \tag{35}$$

Dimana PR adalah *poisson's ratio*,  $V_p$  adalah kecepatan gelombang kompresi dan  $V_s$  adalah kecepatan gelombang transversal.

*Poisson's ratio* dapat diperkirakan dengan memeriksa waktu perjalanan relatif gelombang kompresi dan transversal dari *event* gempa mikro yang terekam pada beberapa stasiun (Foulger 1982). Dilakukan pengukuran *poisson's ratio* di laboratorium terhadap batu pasir kering dan jenuh air dari Lapangan Panasbumi Cerro Prieto dengan nilai 0,1 untuk kering dan 0,3 untuk sampel basah (Somerton, 1978). Nilai *poisson's ratio* untuk Lapangan Panasbumi Geysir dengan metode seismik pasif diperoleh nilai 0,15 sampai 0,2 dalam zona produksi

dan nilai-nilai yang lebih tinggi di luar zona itu. Rendahnya nilai yang diperoleh dianggap mencerminkan dominasi uap dari batuan reservoir (Majer dan Evilly, 1979). Pada daerah dominasi uap, nilai *Poisson's ratio* yang dominan adalah rendah. Nilai *Poisson's ratio* lebih rendah dari 0,25 untuk daerah dominasi uap sedangkan pada sistem panasbumi dominasi air, maka harga *Poisson's ratio* lebih besar dari 0,25 (Silitonga dan Suroso, 2005).

## IV. METODOLOGI PENELITIAN

### A. Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan :

Tempat: Laboratorium Eksplorasi Teknik Geofisika Universitas Lampung

Tabel 1. Tabel waktu dan kegiatan penelitian

No	Kegiatan	Juni	Juli	Agustus	September	Oktober	November
1	Pengumpulan Data dan Studi Literatur	■					
2	Seminar Proposal	■					
3	Pegolahan, Pemodelan dan Interpretasi Data	■	■	■	■		
4	Seminar Hasil				■		
5	Penyelesaian Skripsi				■	■	■
6	Sidang Komprehensif						■

### B. Perangkat Lunak dan Data Penelitian

Perangkat lunak yang diperlukan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. *Software* MATLAB versi 2013 untuk membuat GUI.

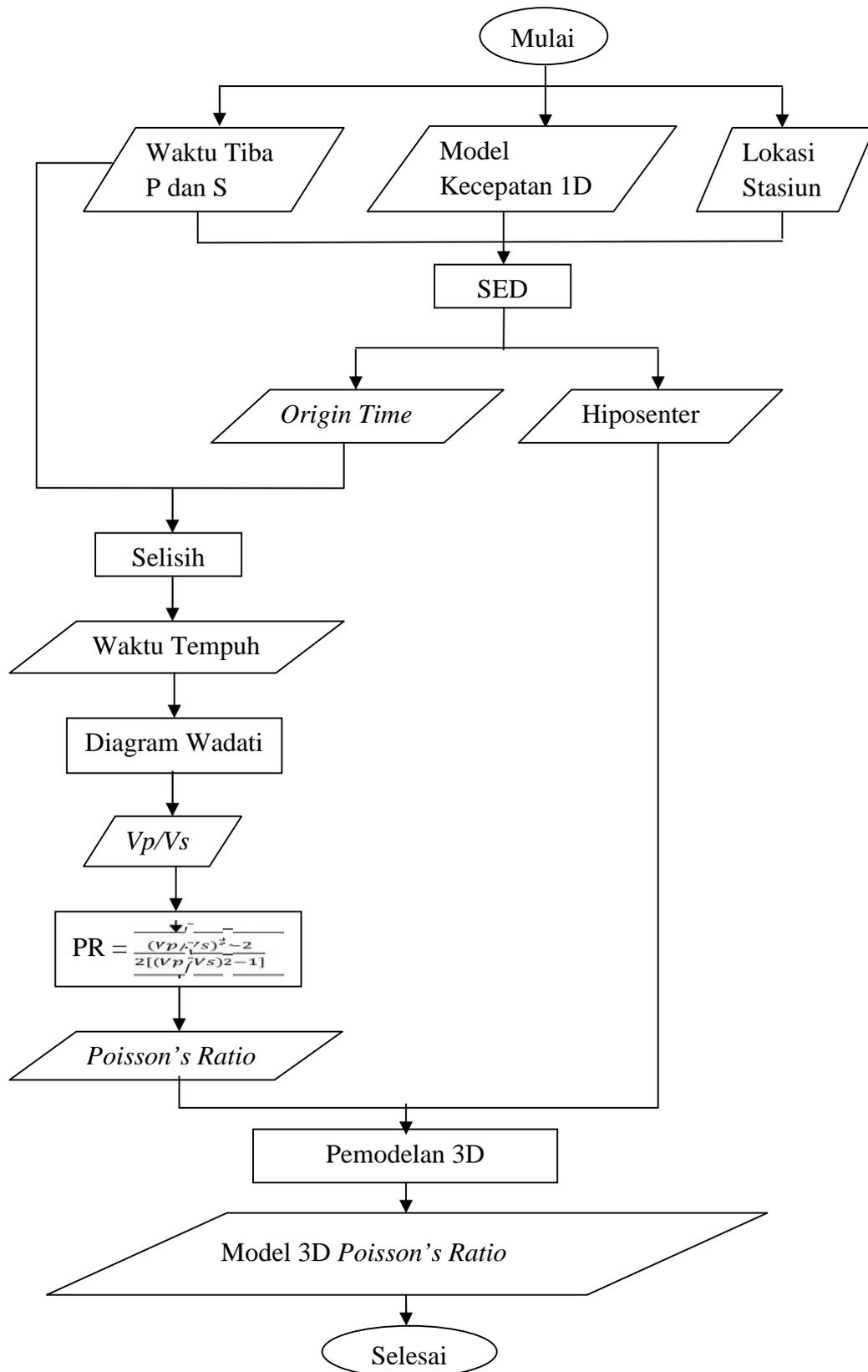
- b. Data penunjang pada lapangan panasbumi lainnya (geologi dan topografi) digunakan untuk penunjang interpretasi.
- c. *Software* Surfer 11, Global Mapper dan Arc GIS untuk membuat peta lokasi dan geologi daerah penelitian.
- d. *Software microsoft excel* untuk perhitungan *poisson's ratio*.
- e. *Software* Geosoft Oasis Montaj 8.3, digunakan untuk memodelkan nilai *poisson's ratio*.

Data yang digunakan dalam penelitian ini adalah data katalog gempa mikro Lapangan Panasbumi Desert Peak sebelum EGS (September 2008 hingga Agustus 2010) dan sesudah EGS (Maret 2013 hingga Februari 2015). Sumber data dari *Northern California Earthquake Data Center* (NCEDC) dan merupakan data sekunder yang meliputi waktu tiba gelombang P dan S, posisi stasiun serta model kecepatan 1 dimensi.

### **C. Diagram Alir**

Secara umum, penelitian ini terdiri dari penentuan hiposenter dan *poisson's ratio*. Diagram alir dapat dilihat pada Gambar 23. Berikut ini adalah tahap-tahap yang dilakukan:

1. Penentuan hiposenter menggunakan metode SED dengan data awal berupa waktu tiba gelombang P dan S, model kecepatan 1 dimensi dan lokasi stasiun (UTM X, UTM Y dan elevasi).
2. Penentuan *poisson's ratio* menggunakan diagram wadati dengan data awal berupa selisih antara waktu tiba gelombang P dan S dengan *origin time*.



Gambar 23. Diagram alir

## VI. KESIMPULAN DAN SARAN

### A. Kesimpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan didapatkan beberapa kesimpulan diantaranya:

1. Penentuan hiposenter gempa mikro berhasil dilakukan menggunakan program GUI di MATLAB yang dikembangkan penulis.
2. Sebaran hiposenter gempa mikro sebelum dan sesudah stimulasi EGS mengikuti alur sesar *ridge rhyolite* yang merupakan lokasi utama Lapangan Panasbumi Desert Peak. Sesudah dilakukannya stimulasi EGS sebaran gempa mikro meningkat 2 kali, dengan peningkatan paling tinggi berada di elevasi 500m (zona stimulasi EGS).
3. Terjadi peningkatan nilai *poisson's ratio* sesudah dilakukan stimulasi EGS terutama di elevasi 500m (zona stimulasi EGS). Hal ini menunjukkan adanya peningkatan saturasi air di area EGS sesudah stimulasi EGS.

### B. Saran

Perlu dilakukannya penentuan faktor *damping* yang optimal sehingga ketidakstabilan dalam proses inversi dapat diredam.