

**IDENTIFIKASI KALDERA GUNUNG API BAKAUHENI  
BERDASARKAN DEMNAS DAN METODE HVSR**

**(Skripsi)**

**Oleh**

**MASRUL HIDAYAT  
NPM 1815051001**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

**IDENTIFIKASI KALDERA GUNUNG API BAKAUHENI  
BERDASARKAN DEMNAS DAN METODE HCSR**

Oleh

**MASRUL HIDAYAT**

**Skripsi**

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

**Pada**

**Jurusan Teknik Geofisika  
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS LAMPUNG  
BANDAR LAMPUNG  
2023**

## ABSTRAK

# IDENTIFIKASI KALDERA GUNUNG API BAKAUHENI BERDASARKAN DEMNAS DAN METODE HVSR

Oleh

**MASRUL HIDAYAT**

Telah dilakukan penelitian menggunakan DEMNAS dan Metode HVSR di Kecamatan Bakauheni dan sekitarnya, untuk mengidentifikasi kaldera gunung api di Bakauheni. Pengolahan DEMNAS menggunakan proses deliniasi berdasarkan kenampakan permukaan dari *hillshade* untuk analisis geomorfologi. Metode HVSR mengukur frekuensi alami dari 3 (tiga) komponen dengan alat Seismometer. Pengolahan data HVSR meliputi *windowing signal* menggunakan *software* Geopsy untuk menghasilkan kurva H/V yang berisi informasi nilai  $f_0$  dan  $A_0$ . Pemodelan dilakukan dengan menerapkan inversi PSO dari nilai kurva H/V menggunakan program HVSR berbasis Matlab. Berdasarkan analisis permukaan dari DEMNAS, dapat di deliniasi 7 (tujuh) kaldera purba di sekitar Bakauheni yang disebut sebagai kaldera B-2, B-3, B-4, B-5, B-7, R-2 dan R-4. Hasil ini sesuai dengan penelitian Bronto, 2010. Sedangkan analisis geomorfologi menunjukkan keberadaan dan aktivitas vulkanik purba. Perhitungan HVSR menghasilkan nilai  $f_0$  yang menunjukkan adanya sedimen yang relatif tebal di kaldera. Dari hasil inversi PSO HVSR, dapat di ekstraksi kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) yang menghasilkan klasifikasi tanah sangat lunak (0 – 175 m/s), tanah lunak (175 – 350 m/s), tanah sedang dan batuan lunak (350 – 750 m/s), batuan sedang hingga keras (750 – 1500 m/s) dan batuan sangat keras (>1500 m/s). Hasil 2D *Crosssection*  $V_s$  menunjukkan bahwa didalam kaldera memiliki klasifikasi tanah sangat lunak hingga tanah lunak.

**Kata kunci:** kaldera purba, bakauheni, demnas, metode hvsr, pso inversi, 2D *crosssection*, kecepatan gelombang geser.

## ABSTRACT

# IDENTIFICATION OF BAKAUHENI VOLCANO CALDERA BASED ON DEMNAS AND HVSR METHOD

By

**MASRUL HIDAYAT**

Research has been carried out using DEMNAS and the HVSR method in Bakauheni District and its surroundings, to identify volcanic calderas in Bakauheni. DEMNAS processing uses a delineation process based on the surface appearance of the hillshade for geomorphological analysis. The HVSR method measures the natural frequency of 3 (three) components with a seismometer. HVSR data processing includes signal windowing using Geopsy software to generate H/V curves containing information on  $f_0$  and  $A_0$  values. Modeling is done by applying the PSO inversion of the H/V curve value using the Matlab-based HVSR program. Based on surface analysis from DEMNAS, it can be delineated 7 (seven) ancient calderas around Bakauheni which are referred to as calderas B-2, B-3, B-4, B-5, B-7, R-2 and R-4. These results are in accordance with the research of Bronto, 2010. Meanwhile, geomorphological analysis shows the existence and activity of ancient volcanoes. The HVSR calculation produces a value of  $f_0$  which indicates the presence of relatively thick sediment in the caldera. From the results of the PSO HVSR inversion, it can be extracted the shear wave velocity ( $V_s$ ) which results in the classification of very soft soil (0 – 175 m/s), soft soil (175 – 350 m/s), medium soil and soft rock (350 – 750 m/s), medium to hard rocks (750 – 1500 m/s) and very hard rocks (>1500 m/s). The results of the 2D Crosssection  $V_s$  show that the inside of the caldera has a classification of very soft soil to soft soil.

**Key words:** ancient caldera, bakauheni, demnas, hvsr method, pso inversion, 2D *crosssection*, shear wave velocity.

Judul Skripsi : **IDENTIFIKASI KALDERA GUNUNG API  
BAKAUHENI BERDASARKAN DEMNAS  
DAN METODE HVSR**

Nama Mahasiswa : **Masruf Hidayat**

Nomor Pokok Mahasiswa : **1815051001**

Program Studi : **Teknik Geofisika**

Fakultas : **Teknik**



1. **Komisi Pembimbing**

Pembimbing 1

**Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, M.T., CRP.**  
NIP. 19720928 199903 1001

Pembimbing 2

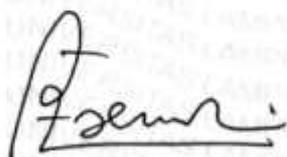
**Rahmi Mulyasari, S.Pd., M.T.**  
NIP. 19910207 201803 2001

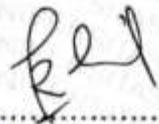
2. **Ketua Jurusan Teknik Geofisika**

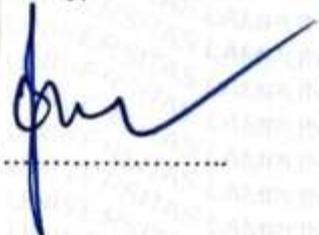
**Karyanto, S.Si., M.T.**  
NIP. 19691230 199802 1001

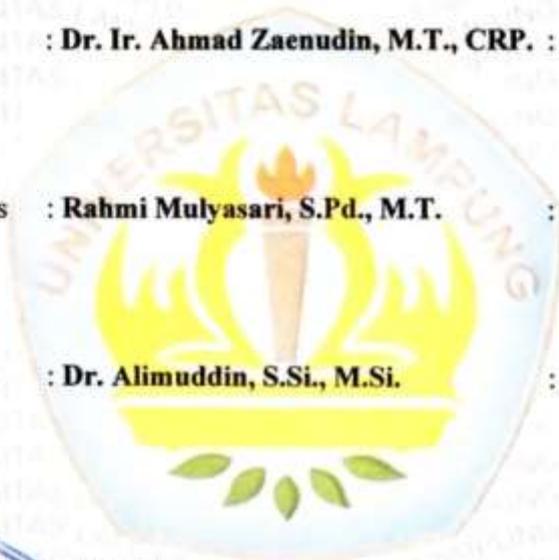
**MENGESAHKAN**

1. Tim Penguji

Ketua : **Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, M.T., CRP.** : 

Sekretaris : **Rahmi Mulyasari, S.Pd., M.T.** : 

Anggota : **Dr. Alimuddin, S.Si., M.Si.** : 



2. Dekan Fakultas Teknik

  
**Dr. Eng. Ir. Helmy Fitriawan, S.T., M.Sc.** ✓  
NIP. 19750928 200112 1002

Tanggal Ujian Skripsi : **16 Mei 2023**

## PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya tulis ini 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.

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

Bandar Lampung, 06 Juni 2023

Penulis,



  
**Masrul Hidayat**  
**NPM. 1815051001**

## RIWAYAT HIDUP



**Masrul Hidayat**, lahir di Dusun Repong Bakau pada tanggal 27 Mei 1999. Anak pertama dari 3 bersaudara, dari pasangan Bapak Samsudin dan Ibu Siti Mariyam. Penulis telah menempuh Pendidikan Sekolah Dasar di SD Negeri 1 Teratas, lalu melanjutkan pada jenjang Sekolah Menengah Pertama di SMP Muhammadiyah Kota Agung, kemudian menempuh Pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA Negeri 1 Kota Agung. Pada tahun 2018 penulis melanjutkan Pendidikan di perguruan tinggi negeri, tepatnya di Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Selama menjadi mahasiswa, penulis aktif di berbagai kegiatan organisasi intra kampus, antara lain : Anggota Bidang Saintek Himpunan Mahasiswa Teknik Geofisika Bhuwana (2019/2020 dan 2020/2021), Koordinator Acara Panitia Pemilihan Khusus Pemira Gubernur BEM Fakultas Teknik tahun 2021, Anggota Departemen *Education and Resource Development* SEG SC Unila tahun 2021. Dalam bidang keilmuan dan akademik penulis pernah melakukan publikasi jurnal ilmiah dan Kompetisi Sains Indonesia bidang Kebumihan tahun 2021. Selain itu, penulis dipercaya menjadi asisnten praktikum pada beberapa mata kuliah seperti, Geologi Dasar, Geologi Struktur, Sistem Informasi Geografis, dan Eksplorasi Geotermal.

Pada tahun 2021 penulis melaksanakan Kerja Praktik (KP) di jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung dengan judul “**Validasi Sesar Peterjajar Menggunakan DEM ALOS PALSAR Berdasarkan parameter Kelurusan dan Nilai Kerapatan Kelurusan**”. Pada akhir masa studi penulis melakukan penelitian Tugas Akhir untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik dengan judul “**Identifikasi Kaldera Gunung Api Bakauheni Berdasarkan DEMNAS dan Metode HVSR**”.

## **PERSEMBAHAN**

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah SWT. atas terselesaikannya skripsi ini dengan baik dan lancar. Skripsi ini saya persembahkan untuk :

**IBU DAN AYAH TERCINTA**

**SAMSUDIN**

**&**

**SITI MARIYAM**

Yang tiada hentinya memberikan kasih sayang, doa, motivasi, semangat dan segala dukungan yang tidak terhingga.

**ADIK TERCINTA**

**HANA SAPITRI & AFIKA AISA AZAHRA**

Yang telah memberikan doa, semangat dan dukungannya.

**Keluarga Besar Teknik Geofisika Universitas Lampung**

**Semua yang terlibat dalam proses pembuatan dan penyusunan skripsi ini,  
saya ucapkan terima kasih.**

*Sesungguhnya Bersama kesukaran itu ada kemudahan.  
Karena itu bila kau sudah selesai (mengerjakan yang  
lain) dan kepada Tuhan, berharaplah*

*(Q.S Al Insyirah : 6-8)*

*Tidak ada sesuatu yang mustahil untuk dikerjakan.  
Hanya tidak ada sesuatu yang mudah.*

*~Napoleon Bonaparte*

## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan atas kehadiran Allah SWT, karena berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan Skripsi yang berjudul “**Identifikasi Kaldera Gunung Api Bakauheni Berdasarkan DEMNAS dan Metode HVSR**”. Adapun maksud dan tujuan dari penulisan Skripsi adalah untuk memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Sarjana Teknik pada Jurusan Teknik Geofisika, Fakultas Teknik, Universitas Lampung. Selama penulisan Skripsi ini banyak sekali terdapat hambatan yang dialami. Namun berkat adanya bantuan serta bimbingan dari berbagai pihak, sehingga skripsi ini dapat terselesaikan dengan baik. Penulis menyadari bahwa tidak menutup kemungkinan di dalam Skripsi ini terdapat kekurangan. Oleh karena itu, penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan Skripsi ini. Semoga Skripsi ini dapat berguna dan bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi para pembaca pada umumnya, serta bagi perkembangan ilmu pengetahuan.

Bandar Lampung, 06 Juni 2023

Penulis,

**Masrul Hidayat**  
**NPM. 1815051001**

## SANWACANA

Puji dan syukur penulis panjatkan atas rahmat dan karunia Allah SWT, yang telah melimpahkan nikmat dan karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Skripsi ini dengan baik. Shalawat serta salam semoga selalu tercurahkan kepada suri tauladan Rasulullah Muhammad SAW beserta para sahabatnya dan kita selaku umatnya akhir zaman.

Skripsi ini berjudul **“Identifikasi Kaldera Gunung Api Bakauheni Berdasarkan DEMNAS dan Metode HVSR”** merupakan Skripsi dari Penelitian yang dilakukan penulis untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik.

Adapun dalam penyelesaian Skripsi ini, terdapat banyak pihak yang terlibat, yang mana pada kesempatan ini penuli ingin menyampaikan rasa terima kasih kepada :

1. Kedua orang tua tercinta, Bapak Samsudin dan Ibu Siti Mariyam yang selalu memberi doa, dukungan, motivasi dan selalu menyemangati.
2. Adik tercinta, Hana Sapitri dan Afika Aisa Azahra yang telah memberi dukungan dan selalu memberi semangat.
3. Bapak Karyanto, S.Si., M.T. selaku Ketua Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung.

4. Bapak Ir. Syamsurijal Rasimeng, S.Si., M.Si. selaku Sekretaris Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung.
5. Bapak Dr. Ir. Ahmad Zaenudin, M.T., CRP. selaku dosen Pembimbing I yang telah meluangkan waktu dalam membimbing dan memberikan arahan, saran, kritik, masukan serta motivasi dalam pengerjaan skripsi ini.
6. Ibu Rahmi Mulyasari, S.Pd., M.T. selaku dosen Pembimbing II yang telah meluangkan waktu dalam membimbing dan memberikan arahan, saran, kritik, masukan serta motivasi dalam pengerjaan skripsi ini.
7. Bapak Alhada Farduwin, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing pengolahan data yang telah meluangkan waktu dalam membimbing dan memberikan arahan, saran, kritik, masukan serta motivasi dalam pengerjaan skripsi ini.
8. Bapak Dr. Alimuddin, S.Si., M.Si. selaku penguji yang telah meluangkan waktunya dan senantiasa memberikan masukan, kritik dan saran.
9. Bapak dan Ibu dosen Jurusan Teknik Geofisika, Universitas Lampung yang telah mengajarkan banyak ilmu dan wawasan serta staf akademik Jurusan Teknik Geofisika.
10. Kekasih tercinta yaitu Elok Budi Utami, S.T. yang selalu memberikan dukungan semangat, tempat keluh kesah dan tempat berbagi cerita selama pengerjaan Skripsi ini.
11. Tim pengukuran Mikrotremor Bakauheni yaitu Ikram, Tectona dan Aldika (Alex) yang telah membantu dalam penyelesaian skripsi, serta memberikan dukungan dan motivasi satu sama lain.

12. Teman-teman kantor CV. Summa Terra Consultant yaitu Mas Maman, Mas Rifki, Teh Restika, dan Mba Novi yang telah banyak memberi dukungan serta semangat dalam penyelesaian Skripsi ini.
13. Keluarga Teknik Geofisika 2018 (Tgasak) yang tidak dapat disebutkan satu persatu. Terima kasih banyak atas semua dukungan, semangat, menjadi tempat bercerita, berbagi beban bersama selama menajalani dunia perkuliahan.
14. Semua pihak yang terlibat selama penyusunan Skripsi ini yang telah memberikan kesempatan, bantuan dan pengalaman yang sangat luar biasa. Penulis ucapkan terima kasih.

Bandar Lampung, 06 Juni 2023  
Penulis,

**Masrul Hidayat**  
**NPM. 1815051001**

## DAFTAR ISI

	Halaman
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>iii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>iv</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>xii</b>
<b>SANWACANA .....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xviii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xix</b>
<b>I. PENDAHULUAN .....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Tujuan Penelitian.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	3
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
<b>II. TINJAUAN PUSATAKA.....</b>	<b>4</b>
2.1 Fisiografi dan Morfologi .....	4
2.2 Stratigrafi Regional.....	5
2.3 Geologi Daerah Penelitian.....	6
2.4 Gunung Api Purba Lampung.....	7
2.5 Penelitian Terdahulu.....	8
<b>III. TEORI DASAR.....</b>	<b>11</b>
3.1 <i>Digital Elevation Model</i> (DEM).....	11
3.2 DEMNAS .....	12
3.3 Geomorfologi.....	12
3.4 Gelombang Seismik.....	12

3.4.1. Gelombang Badan ( <i>Body wave</i> ) .....	13
3.4.2. Gelombang Permukaan ( <i>Surface wave</i> ) .....	14
3.5 Karakter Mikroseismik, <i>Microearthquake</i> dan Mikrotremor .....	16
3.6 Metode <i>Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr)</i> .....	18
3.7 Frekuensi Predominan .....	22
3.8 Faktor Amplifikasi .....	22
3.9 Kecepatan Gelombang Geser ( $V_s$ ) .....	23
3.10 Indeks Kerentanan Seismik ( $K_g$ ) .....	24
3.11 RR-PSO .....	24
<b>IV. METODE PENELITIAN.....</b>	<b>26</b>
4.1 Tempat dan Waktu Penelitian.....	26
4.2 Alat dan Bahan Penelitian .....	27
4.3 Jadwal Kegiatan Penelitian.....	27
4.4 Prosedur Penelitian .....	28
4.5 Diagram Alir.....	29
<b>V. HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>33</b>
5.1 Geomorfologi.....	33
5.2 <i>Horizontal To Vertical Spectral Ratio (HVSr)</i> .....	40
5.2.1. Analisis Peta Persebaran Nilai Frekuensi Dominan ( $f_0$ ) .....	46
5.2.2. Analisis Peta Persebaran Periode Dominan ( $T_0$ ).....	46
5.2.3. Analisis Peta Persebaran Nilai $V_{s30}$ .....	46
5.2.4. Analisis Peta Persebaran Nilai Faktor Amplifikasi .....	47
5.2.5. Analisis Peta Nilai Indeks Kerentanan Seismik .....	47
5.3 PSO Inversi <i>Horizontal To Vertical Spectral Ratio (HVSr)</i> .....	53
<b>VI. KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>77</b>

## DAFTAR PUSTAKA

## DAFTAR TABEL

Tabel	Halaman
1. Kriteria-kriteria untuk mendapatkan kurva HVSR yang <i>reliable</i> .....	21
2. Klasifikasi tanah berdasarkan nilai frekuensi resonansi Mikrotremor.....	22
3. Klasifikasi nilai faktor amplifikasi.....	23
4. Klasifikasi jenis batuan berdasarkan <i>Uniform Building Code</i> (UBC).....	23
5. Klasifikasi nilai indeks kerentanan seismik.....	24
6. Jadwal kegiatan penelitian.....	27
7. Hasil perhitungan data HVSR daerah penelitian.....	42
8. Hasil PSO inversi Lintasan 1.....	68
9. Hasil PSO inversi Lintasan 2.....	68
10. Hasil PSO inversi Lintasan 3.....	69
11. Hasil PSO inversi Lintasan 4.....	69
12. Hasil PSO inversi Lintasan 5.....	69

## DAFTAR GAMBAR

Gambar	Halaman
1. Tatanan fisiografi dan morfologi daerah Lampung .....	4
2. Stratigrafi regional daerah penelitian .....	5
3. Peta geologi daerah penelitian .....	6
4. Peta <i>hillshade</i> citra satelit .....	8
5. Ilustrasi gelombang primer .....	14
6. Ilustrasi gelombang sekunder .....	14
7. Ilustrasi gelombang <i>Rayleigh</i> .....	15
8. Ilustrasi gelombang <i>Love</i> .....	15
9. Peta lokasi penelitian .....	26
10. Diagram alir umum .....	29
11. Diagram alir pengolahan data DEMNAS .....	30
12. Diagram alir pengolahan data Mikrotremor .....	31
13. Kenampakan <i>hillshade</i> daerah penelitian .....	34
14. Delineasi kaldera berdasarkan kenampakan <i>hillshade</i> .....	34
15. Peta morfologi daerah penelitian .....	36
16. Peta morfogenesis daerah penelitian .....	37
17. Peta kaldera hasil delineasi geomorfologi .....	38
18. <i>Landscape</i> daerah penelitian .....	39
19. Rekaman mikrotremor tiga komponen .....	40
20. <i>Windowing</i> sinyal mikrotremor .....	40
21. Kurva HVSR .....	41
22. Peta persebaran nilai frekuensi dominan .....	48
23. Peta persebaran nilai periode dominan .....	49
24. Peta persebaran nilai <i>Vs30</i> .....	50

25. Peta persebaran nilai faktor amplifikasi.....	51
26. Peta persebaran nilai indeks kerentanan seismik .....	52
27. Kurva HVSR Lintasan 1 .....	55
28. Kurva HVSR Lintasan 2 .....	56
29. Kurva HVSR Lintasan 3 .....	57
30. Kurva HVSR Lintasan 4 .....	58
31. Kurva HVSR Lintasan 5 .....	59
32. Kurva HVSR PSO inversi Lintasan 1 .....	60
33. Kurva HVSR PSO inversi Lintasan 2 .....	61
34. Kurva HVSR PSO inversi Lintasan 3 .....	61
35. Kurva HVSR PSO inversi Lintasan 4 .....	62
36. Kurva HVSR PSO inversi Lintasan 5 .....	62
37. Model lapisan bumi Lintasan 1 .....	63
38. Model lapisan bumi Lintasan 2 .....	63
39. Model lapisan bumi Lintasan 3 .....	64
40. Model lapisan bumi Lintasan 4 .....	64
41. Model lapisan bumi Lintasan 5 .....	65
42. Kurva <i>error</i> Lintasan 1 .....	65
43. Kurva <i>error</i> Lintasan 2 .....	66
44. Kurva <i>error</i> Lintasan 3 .....	66
45. Kurva <i>error</i> Lintasan 4 .....	67
46. Kurva <i>error</i> Lintasan 5 .....	67
47. Peta Lintasan 2D <i>Crossection</i> .....	73
48. 2D <i>Crossection</i> Lintasan 1 .....	74
49. 2D <i>Crossection</i> Lintasan 2 .....	74
50. 2D <i>Crossection</i> Lintasan 3 .....	75
51. 2D <i>Crossection</i> Lintasan 4 .....	75
52. 2D <i>Crossection</i> Lintasan 4 .....	76
53. Peta korelasi $f_0$ dan $V_s$ identifikasi kaldera purba .....	77

## I. PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Negara Indonesia tidak hanya mempunyai banyak gunung api berumur kuartar (kurang dari 2 juta tahun yang lalu) dan aktif masa kini, tetapi juga mempunyai batuan gunung api berumur tersier dan pra-tersier yang tersebar sangat melimpah. Berdasarkan keberadaan batuan gunung api yang tersingkap di permukaan, kegiatan gunung api di Indonesia sudah ada sejak zaman Perem yakni, berumur 280 - 260 juta tahun yang lalu. Menurut Hartono (1996), keberadaan gunung api dibuktikan melalui tersingkapnya batuan gunung api berumur Perem di Pulau Sumatera, batuan tersebut dikelompokkan ke dalam Formasi Silungkang, Palepat dan Gunung Api Panti.

Pulau Sumatera merupakan salah satu pulau yang memiliki banyak gunung berapi. Hal tersebut dapat terjadi karena Pulau Sumatera tempat terdapatnya fenomena subduksi yang dihasilkan oleh sesar Sumatera (sesar Semangko). Pulau Sumatera terletak pada bagian tepi selatan Busur Sunda, dimulai dari Laut Andaman utara hingga Aceh, kemudian Pulau Jawa sampai ke Pulau Sumbawa di selatan sebagai *island arc systems*. Perubahan arah subduksi dari lempeng Indo-Australia ke arah Lempeng Eurasia bersifat normal terhadap Jawa yang membentuk *trench* Jawa dan miring (*oblique*) ke arah Sumatera membentuk *trench* Sumatera. Penunjaman miring tersebut membentuk zona Sesar Sumatera yaitu zona sesar geser mengangan yang memanjang dari ujung utara hingga ujung selatan Pulau Sumatera. Menurut Sieh dan Natawidjaja (2000), penunjaman tersebut membentuk dua sistem tektonika utama, yaitu sistem zona subduksi sepanjang palung Sumatera dan sistem Sesar Sumatera (sesar Semangko) yang merupakan sesar mendatar (*strike-slip fault*).

Hubungan Pulau Sumatera dan Pulau Jawa menjadi satu sebelum umur Miosen Atas sehingga pemisahan kedua pulau tersebut terjadi penyobekan, oleh karena itu sesar ini bersifat bukaan yang didasarkan hasil interpretasi kelurusan pusat gempa bumi dan kelurusan beberapa gunung api. Pembukaan Selat Sunda dipengaruhi oleh pergerakan ke barat-laut blok Sumatera dan ke arah barat-daya sepanjang Sesar Sumatera Tengah.

Sesar bukaan ini mengontrol munculnya gunung api purba Rajabasa dan gunung api purba Bakauheni yang berumur Miosen Atas dan mungkin juga gunung api yang membentuk Pulau Panaitan di Selat Sunda. Kemudian diikuti Gunung api Sebuku (Pulau Sebuku) yang merupakan kerucut gunung api (*volcanic cone*) dari Gunung api Rajabasa Purba dan diduga berumur Pliosen. Di dalam kaldera Rajabasa Purba muncul Gunung api Pandan yang berumur Pleistosen dan selanjutnya dalam kawah Gunung api Pandan munculnya Gunung api Rajabasa (Resen). Gunung api Sebesi yang berumur Resen, dan diikuti munculnya Gunung api Krakatau yang masih aktif. Deretan gunung api tersebut menunjukkan keaktifan gunung api berantai, yaitu gunung api satu mati diikuti gunung api lain muncul. Apabila Gunung api Krakatau tidak aktif, sangat mungkin muncul gunung api baru (Sidarto dkk., 2017).

Daerah Bakauheni, Lampung Selatan dan sekitarnya telah dilakukan penelitian mengenai gunung api purba. Pada penelitian sebelumnya, oleh Bronto dkk., (2012) membahas tentang gunung api purba di Bakauheni hingga Pulau Sangiang, Selat Sunda Kabupaten Lampung Selatan. Penelitian tersebut mengkaji gunung api purba berdasarkan peta topografi dari DEM SRTM. Mengacu pada penelitian tersebut, maka penelitian ini akan mengidentifikasi kaldera gunung api Bakauheni menggunakan analisis DEMNAS dan Metode HVSR. Analisis DEMNAS yang digunakan meliputi kajian geomorfologi gunung api dan morfogenesis gunung api. Analisis DEMNAS digunakan untuk mengidentifikasi kaldera gunung api dari permukaan. Penggunaan DEMNAS pada penelitian dikarenakan resolusi data yang ditampilkan lebih baik yakni 8,1 meter atau 0,27 *arc second* dibandingkan DEM SRTM yang resolusinya 30

meter. Sedangkan metode HVSR digunakan untuk mengidentifikasi kaldera gunung api dari bawah permukaan. Keunggulan dari metode HVSR yakni dapat menunjukkan jenis tanah berdasarkan nilai frekuensi dominan, tentunya sangat membantu dalam pengaplikasian bawah permukaan (Haerudin dkk., 2020). Penelitian mengenai kaldera gunung api dilakukan karena informasi keberadaan gunung api purba ini sangat penting untuk memahami kondisi geologi suatu daerah maupun perkembangan magmatisme dan vulkanisme yang bertujuan untuk memahami tatanan produk batuan gunung api yang menyusun kondisi geologi pada suatu daerah penelitian.

## **1.2. Tujuan Penelitian**

Adapun tujuan penelitian pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

1. Mengidentifikasi kaldera gunung api Bakauheni berdasarkan kenampakan permukaan yang dihasilkan dari DEMNAS.
2. Mengidentifikasi kaldera purba berdasarkan klasifikasi lapisan tanah dari nilai  $f_0$ .
3. Mengaplikasikan RR-PSO inversi pada metode HVSR untuk mengidentifikasi kaldera gunung api Bakauheni.

## **1.3. Batasan Masalah**

Dalam pelaksanaan penelitian ini, data penginderaan jauh berupa *Digital Elevation Model* Nasional (DEMNAS) dengan resolusi spasial 8,1 m (0,27 *arcsecond*) yang bersumber dari <https://tanahair.indonesia.go.id> dan data mikrotremor metode *HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio)*, hasil akuisisi dan pengolahan tim peneliti.

## **1.4. Manfaat Penelitian**

Adapun manfaat dari pelaksanaan penelitian ini adalah sebagai berikut:

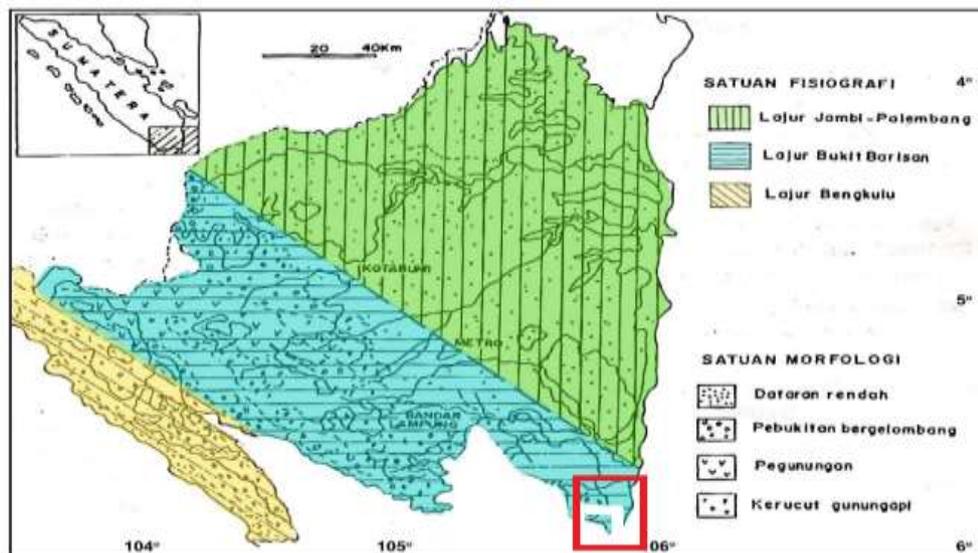
1. Memberikan informasi kaldera gunung api Bakauheni berdasarkan kenampakan permukaan dari DEMNAS dan data HVSR.
2. Memberikan informasi mengenai aplikasi PSO Inversi HVSR dalam mengidentifikasi kaldera purba.

## II. TINJAUAN PUSTAKA

### 2.1. Fisiografi dan Morfologi

Secara fisiografi, wilayah Provinsi Lampung terdiri dari tiga lajur pergerakan tektonik, yakni Lajur Bengkulu berada di sebelah barat, Lajur Bukit Barisan di bagian tengah– baratdaya, dan Lajur Jambi-Palembang di bagian timur–timurlaut (Mangga dkk., 1993).

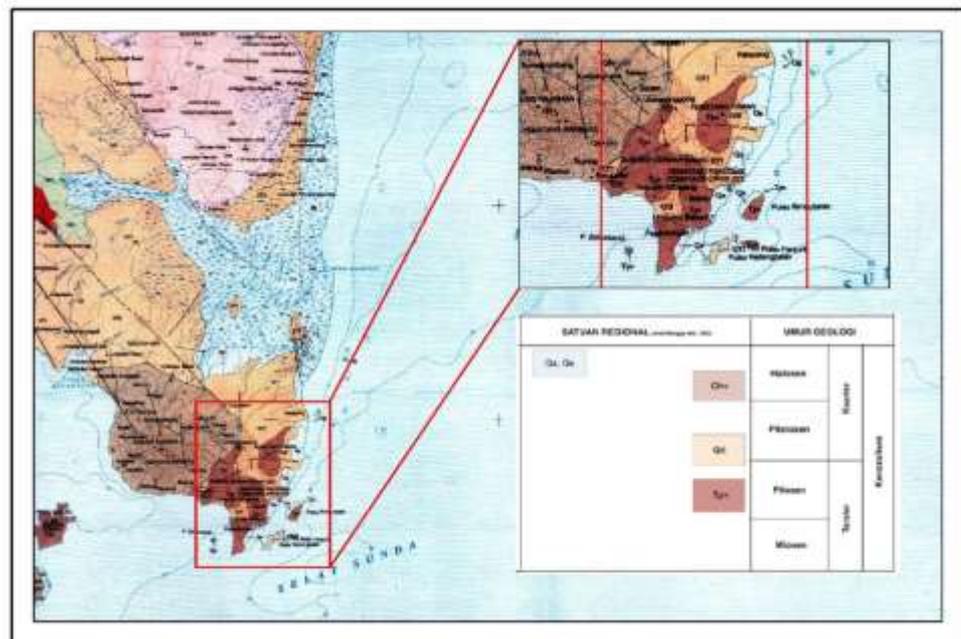
Secara morfologi, Provinsi Lampung terdiri dari tiga satuan morfologi, yaitu berupa pantai berbukit sampai dataran di bagian barat, pegunungan kasar di bagian tengah–baratdaya, dan dataran bergelombang di bagian timur–timurlaut (Mangga dkk., 1993). Sedangkan di daerah penelitian yakni Kecamatan Bakauheni dan sekitarnya berada pada fisiografi Lajur Bukit Barisan dan secara morfologi daerah tersebut berada pada pegunungan (**Gambar 1**).



**Gambar 1.** Tatanan fisiografi dan morfologi daerah Lampung (Mangga dkk., 1993).

## 2.2. Stratigrafi Regional

Geologi daerah penelitian relatif lebih sederhana, hanya tersusun oleh empat jenis batuan, yaitu batuan yang tertua adalah andesit berumur Paleosen dengan karakteristik kekar lembaran, Formasi Lampung berupa asosiasi tuf lapilli, batupasir tufan dan batulempung tufan, Endapan vulkanik Rajabasa berupa asosiasi breksi, lava, dan tuf, dan satuan termuda berumur Resen berupa endapan aluvial (Mangga dkk., 1993).

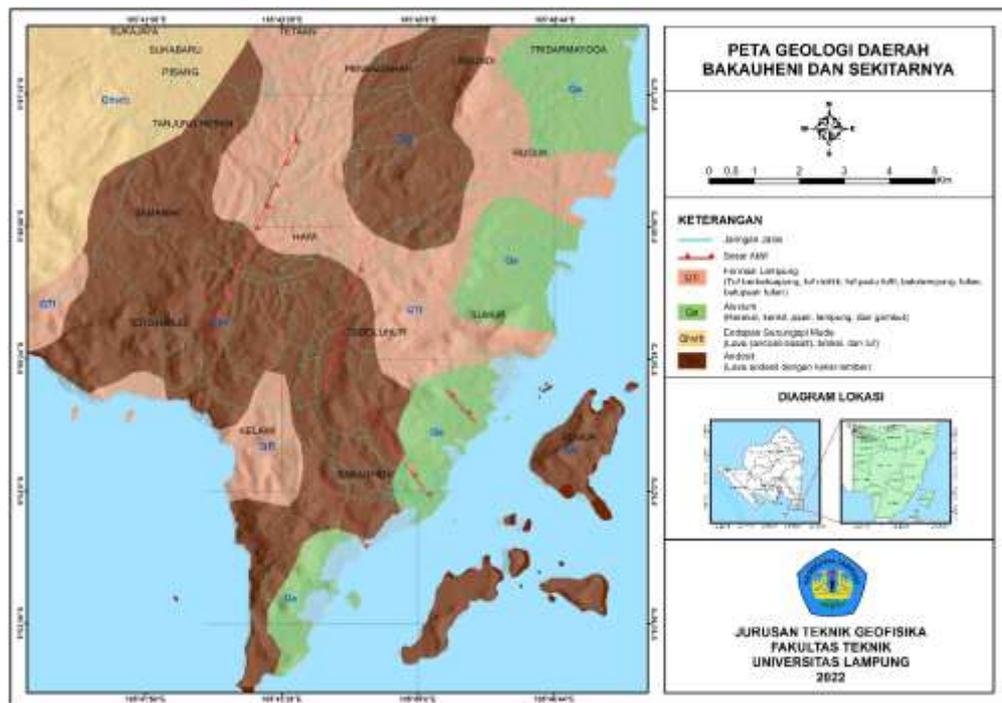


**Gambar 2.** Stratigrafi regional daerah penelitian (Mangga dkk., 1993).

Satuan Andesit (Tpv) terdiri atas lava andesit, merupakan produk vulkanik Tersier, tersebar di sebelah timur sampai tenggara Gunung api Rajabasa. Pulau Harimaubalak dan Pulau Panjurit di dekat Pelabuhan Bakauheni tersusun oleh batuan andesit. Formasi Lampung (QTI), dikenal juga sebagai Tuf Lampung (van Bemmelen, 1949) adalah tuf yang banyak mengandung batuapung (pumisan), berkomposisi riolitik, yang tersebar sangat luas. Hasil penelitian penulis (Bronto dkk., 2012) menyatakan bahwa Tuf Lampung di daerah Bakauheni dan sekitarnya, dihasilkan oleh letusan besar Gunung api purba Pra-Rajabasa. Akibat letusan besar tersebut kerucut komposit Gunung api purba Pra-Rajabasa hancur dan terbentuk Kaldera Pra-Rajabasa. Di dalam

kaldera kemudian muncul Gunung api Rajabasa periode sekarang ini. Batuan Gunung api Rajabasa (Qhv) termasuk endapan gunung api muda (Kuarter) sebagai hasil erupsi Gunung api Rajabasa. Batuan tersebut tersusun oleh lava andesit basalt, breksi dan tuf, yang membentuk tubuh kerucut gunung api komposit Rajabasa. Sementara itu, batuan gunung api di Pulau Sangiang dikelompokkan ke dalam Batuan Gunung api Gede. Satuan batuan ini terdiri atas aliran lava andesit-basalt, breksi gunung api, tuf dan lahar termampatkan (**Gambar 2**).

### 2.3. Geologi Daerah Penelitian



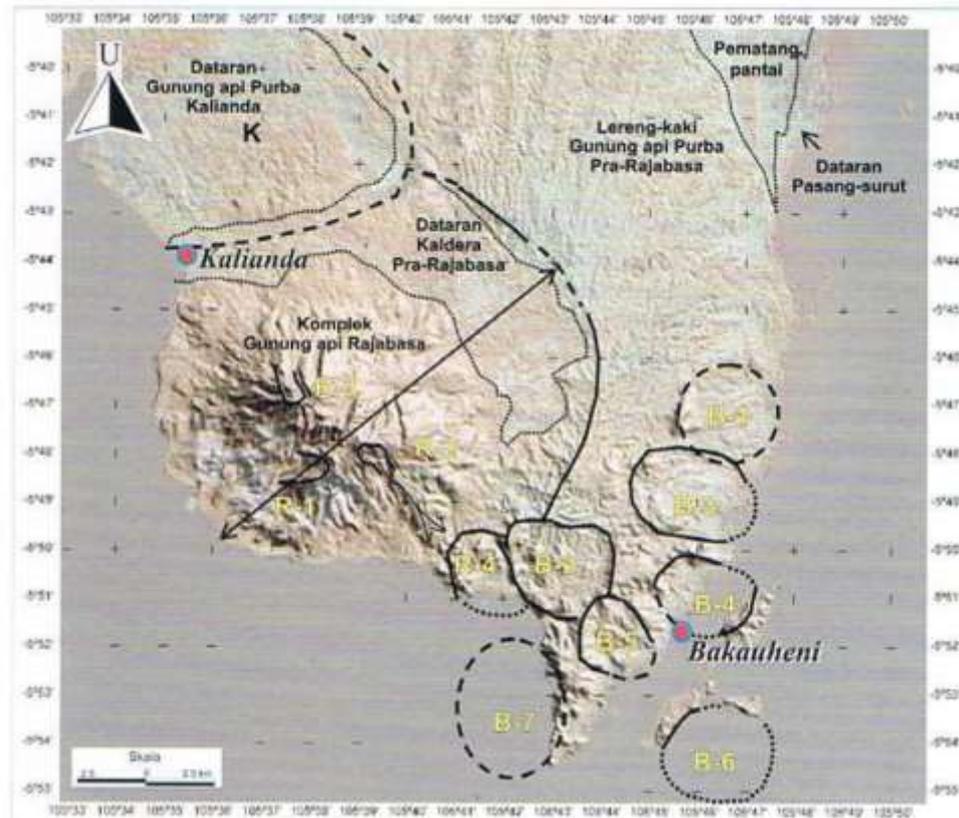
**Gambar 3.** Peta geologi daerah penelitian (modifikasi dari Mangga dkk., 1993).

Berdasarkan peta geologi daerah penelitian modifikasi dari Mangga dkk., (1993), daerah penelitian termasuk kedalam peta geologi lembar Tanjungkarang dan berada pada ujung selatan Kabupaten Lampung Selatan (**Gambar 3**). Daerah penelitian terdiri dari batuan vulkanik yang berumur antara Pliosen dan Holosen. Batuan paling tua di daerah penelitian merupakan batuan vulkanik andesit (Tpv) yang berumur Pliosen (Tersier). Di atasnya

diendapkan batuan Tufa Lampung (QTI) yang berumur Pliosen akhir sampai Pleistosen. Batuan paling muda merupakan endapan gunung api Rajabasa (Qhvr**b**) muda yang berasal dari Gunung Rajabasa, terdiri dari lava (andesit-basal), breksi, dan tuf yang diendapkan dari Pleistosen akhir sampai Holosen.

#### **2.4. Gunung Api Purba Lampung**

Menurut Bronto dan Poedjoprajitno (2010), berdasarkan analisis penginderaan jauh di Lampung bagian selatan terdapat 3 (tiga) kelompok gunung api purba yang terdiri dari Kelompok Pra-Rajabasa, Kelompok Kalianda, dan Kelompok Bakauheni. Kelompok Pra-Rajabasa di tandai adanya penampakan gawir setengah melingkar yang melingkupi Kawasan Gunung api Rajabasa di sebelah tenggara dan penampakan punggung perbukitan berpola semi memancar di sebelah timur. Kaldera yang terdapat dala kelompok Pra-Rajabasa terdapat 4 kaldera yang ditandai dengan huruf R. Sementara itu, kelompok Kalianda berada di sebelah utara kelompok Pra-Rajabasa. Pada kelompok tersebut, sebagian besar bataun gunung apinya tersebar ke arah barat. Kaldera dalam kelompok Kalianda terdapat 1 (satu) kaldera besar yang masih dalam perkiraan. Kemudian, kelompok Gunung api purba Bakauheni ditandai dengan susunan perbukitan yang terdiri dari lava andesit seperti yang diperlihatkan pada **Gambar 4**. Sebagian pulau-pulau di sekitar Pelabuhan Bakauheni juga tersusun oleh batuan andesit, kecuali Pulau Kandangbalak yang terususun oleh Tuf Lampung. Adanya batuan andesit sebagai penyusun pulau-pulau di sekitar Bakauheni mendukung hasil analisis penginderaan jauh bahwa pulau-pulau tersebut adalah bagian dari gunung api purba kelompok Bakauheni. Lava andesit dierupsikan pada tahap pembangunan kerucut gunung api komposit di dalam kelompok Bakauheni. Keberadaan tuf diyakini sebagai hasil erupsi eksplosif atau pembentukan kaldera sebagai tahap penghancuran gunung api purba. Bentuk kaldera sebagai penciri gunung api purba pada kelompok Bakauheni terdapat 7 (tujuh) kaldera yang dicirikan dengan simbol B.



**Gambar 4.** Peta *hillshade* citra satelit (Bronto dan Poedjoprajitno, 2010).

## 2.5. Penelitian Terdahulu

Penelitian pendahuluan terkait gunung api purba di Lampung telah dilakukan oleh Bronto dan Poedjoprajitno (2010) menggunakan analisis penginderaan jauh. Berdasarkan analisis tersebut terdapat tiga kelompok gunung api purba, yaitu kelompok Pra-Rajabasa, Kelompok Kalianda, dan Kelompok Bakauheni. Kelompok gunung api di Bakauheni membentuk perbukitan yang tersusun oleh lava andesit. Adanya batuan andesit sebagai penyusun pulau-pulau di sekitar Bakauheni yang mendukung hasil analisis penginderaan jauh.

Dari penelitian sebelumnya terkait kaldera purba di Kecamatan Bakauheni telah dilakukan oleh Bronto dkk., (2012) dengan pendekatan menggunakan peta topografi skala 1:50.000 dan kegiatan lapangan yakni pengamatan geologi di daerah penelitian. Dari penelitian tersebut dihasilkan bukti-bukti terkait adanya gunung api purba dengan ditemukannya batuan-batuan produk gunung api seperti lava lapuk mengulit bawang dan autobreksi di kaki gawir

Harimaubalak, lapisan lava andesit, lava basal, perlapisan lava yang berstruktur kekar plat, batuan tuf teralaskan, pulau yang tersusun oleh lava andesit-basal, breksi gunung api, lava andesit berstruktur kekar kolom dan lain sebagainya.

Rahayu dkk., (2016), telah melakukan penelitian untuk menentukan nilai kerentanan bencana gempabumi di wilayah Bandar Lampung berdasarkan metode *Horizontal to Vertical Spectrum Ratio* (HVSR) mikrotremor. Penelitian menghasilkan kurva HVSR agar mendapatkan nilai frekuensi natural ( $F_0$ ) dan nilai puncak perbandingan spectrum horizontal dan vertikal H/V ( $A_0$ ). Pengambilan data dilakukan pada tiga lokasi pengukuran di wilayah Bandar Lampung yaitu daerah Kemiling, Kedaton, dan Panjang. Pemilihan wilayah berdasarkan zonasi berupa zona perumahan penduduk, fasilitas umum dan industri. Tahapan penelitian ini meliputi pengukuran data lapangan meliputi pengukuran mikrotremor tiga komponen dan pengolahan data pengukuran berupa import sinyal, pemilihan lebar *window*, analisis FFT, pembuatan kurva HVSR dan penentuan frekuensi natural. Berdasarkan hasil analisis nilai frekuensi dominan pada daerah penelitian yakni Kemiling sebesar 0.3 Hz, Kedaton sebesar 0.1 Hz, dan daerah Panjang sebesar 0.2 Hz. Kemudian membandingkan nilai tersebut ke dalam referensi tabel zona kerentanan gempa bumi maka didapatkan hasil bahwa daerah tersebut berada pada zona tinggi gempa bumi karena nilai frekuensi didapatkan kurang dari 1.5 Hz.

Laby dkk., (2016), telah melakukan penelitian untuk mengenai penggunaan algoritma RR-PSO untuk dispersi gelombang *Rayleigh* dan data *vertical electrical sounding* (VES). Dari penelitian tersebut didapatkan hasil bahwa algoritma RR-PSO dapat diimplementasikan pada inversi dispersi gelombang *Rayleigh* dan *Vertical Electrical Sounding*. Kemudian algoritma tersebut dapat menebak parameter dengan akurat dengan ketidakpastian solusi yang dihasilkan relatif kecil.

Zaenudin dkk., (2022), telah melakukan penelitian untuk mengidentifikasi. Sesar Way Baka di Kecamatan Bakauheni dengan estimasi kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) berdasarkan pengolahan data mikrotremor menggunakan Kurva HVSR RR-PSO Inversi. Dari penelitian tersebut dihasilkan sebuah pemodelan pemetaan berupa *crosssection* yang menunjukkan adanya perbedaan kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) yang dikombinasi dengan elevasi atau titik ketinggian hasil pengukuran data mikrotremor.

### III. TEORI DASAR

#### 3.1. *Digital Elevation Model (DEM)*

Menurut Pilouk dan Tempfli (1991), *Digital Elevation Model (DEM)* adalah data digital dengan penggambaran geometri dari bentuk permukaan bumi atau bagiannya, terdiri dari himpunan titik-titik koordinat hasil *sampling* dari permukaan dengan algoritma yang mendefinisikan permukaan tersebut menggunakan himpunan koordinat. DEM digunakan untuk menggambarkan relief muka bumi. Gambaran model relief rupa bumi tiga dimensi yang menyerupai keadaan sebenarnya di dunia nyata direpresentasikan dengan bantuan teknologi komputer grafis dan teknologi *virtual reality*. DEM terbentuk berdasarkan titik-titik yang memiliki nilai koordinat 3D (X, Y, Z). Permukaan tanah dipetakan dengan memecah area menjadi bidang-bidang yang terhubung satu sama lain, dimana bidang-bidang tersebut terbentuk oleh titik-titik pembentuk DEM. Titik-titik tersebut dapat berupa titik sampel permukaan tanah atau titik hasil interpolasi atau ekstrapolasi titik-titik sampel. Kualitas DEM dapat dilihat pada akurasi dari DEM tersebut. Yang dimaksud dengan akurasi yakni nilai ketinggian titik (Z) yang diberikan oleh DEM, berbanding dengan nilai sebenarnya yang dianggap benar. Sedangkan presisi adalah banyaknya informasi yang dapat diberikan oleh DEM. Presisi bergantung pada jumlah dan sebaran titik-titik sampel dan ketelitian titik sampel sebagai masukan atau input bagi pembentukan DEM dan juga metode interpolasi untuk mendapatkan ketinggian titik-titik pembentuk DEM. Titik-titik sampel yang dipilih untuk digunakan harus dapat mewakili bentuk *terrain* secara keseluruhan sesuai dengan kebutuhan aplikasi penggunaannya.

### 3.2. DEMNAS

Indonesia sudah memiliki model elevasi nasional atau yang lebih dikenal dengan DEMNAS. DEMNAS adalah DEM hasil integrasi dari berbagai sumber data. Hasil evaluasi integrasi, DEMNAS menunjukkan uji keakuratan *mosaic* DEM dengan bobot memiliki akurasi yang lebih baik dibandingkan dengan *mosaic* DEM tanpa bobot yakni sebesar 2,065 meter (Mukti dkk., 2018).

Prinsip utama dalam pembuatan DEMNAS yakni DEM dengan kualitas yang lebih baik dengan penggabungan beberapa data (*data blending*). DEMNAS dibangun dengan asimilasi *mass point* dan DSM (*Digital Surface Model*) menggunakan *GMT-surface* dengan *tension* 0,32. Proses asimilasi dilakukan dengan mempertimbangkan perbedaan tinggi antara elevasi di atas permukaan tanah dari *mass point* dengan elevasi permukaan dari DSM (*Digital Surface Model*) untuk menghasilkan DTM (*Digital Terrain Model*) terkoreksi (Susetyo dkk., 2018).

### 3.3. Geomorfologi

Van Zuidam (1979) dalam bukunya dengan judul *Terrain Analysis and Classification Using Aerial Photograp*, mendefinisikan bahwa geomorfologi merupakan ilmu yang mendeskripsikan bentukan lahan dan proses-proses yang mempengaruhinya, menyelidiki hubungan timbal balik antara bentuklahan dan proses dalam tatanan keruangannya. Di dalam bukunya Van Zuidam juga mengemukakan bahwa geomorfologi terdiri dari aspek-aspek : (1) Morfologi meliputi morfografi dan morfometri, (2) Morfoganesa meliputi morfostruktur pasif dan aktif serta morfodinamik.

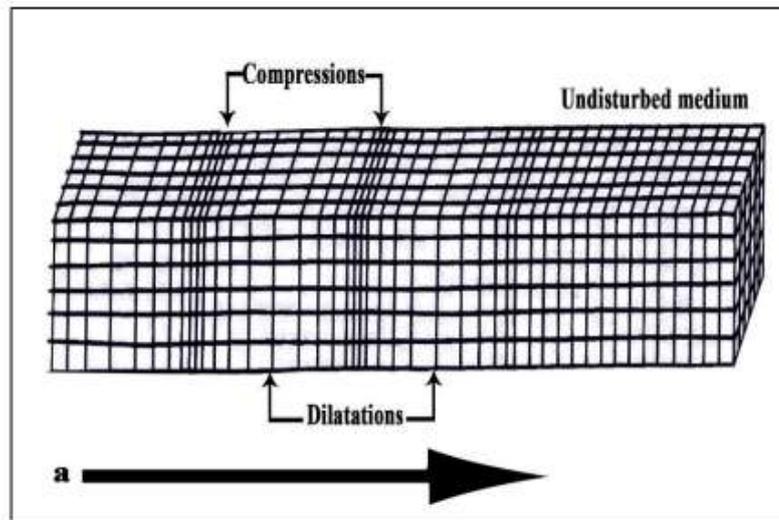
### 3.4. Gelombang Seismik

Gelombang seismik dapat dibedakan berdasarkan tempat penjararannya yaitu gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*). Gelombang tubuh yaitu gelombang yang arah rambatannya masuk ke bawah permukaan bumi terdiri atas gelombang kompresional (gelombang

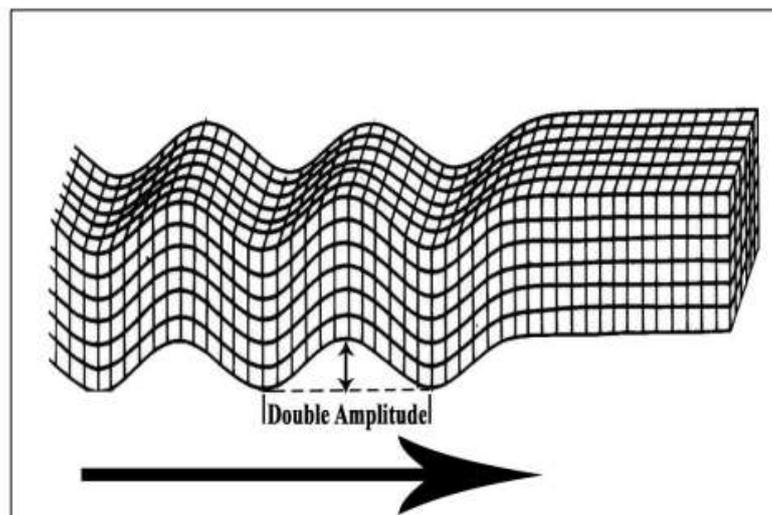
longitudinal atau *P-wave*) dan gelombang geser (gelombang transversal atau *S-wave*). Gelombang P memiliki ciri arah gerakan partikel dalam medium searah dengan arah perambatan gelombang sedangkan gelombang S arah perambatannya tegak lurus dengan gerak partikel dalam medium. Gelombang permukaan merupakan gelombang seismik yang arah rambatannya hanya pada batas permukaan medium. Berdasarkan pada sifat gerakan partikel media elastik, gelombang permukaan merupakan gelombang yang kompleks dengan frekuensi yang rendah dan amplitudo yang besar, yang menjalar akibat adanya efek *free surface* dimana terdapat perbedaan sifat elastis. Jenis dari gelombang permukaan ada dua yaitu gelombang *Rayleigh* dan gelombang *Love* (Telford dkk., 1976).

#### **3.4.1. Gelombang badan (*Body wave*)**

Gelombang badan merupakan gelombang yang menjalar dalam medium elastis dan arah rambatnya ke seluruh bagian di dalam bumi. Berdasarkan gerak partikel pada media dan arah penjarannya, gelombang dibedakan atas gelombang P (**Gambar 5**) dan gelombang S (**Gambar 6**). Gelombang Primer atau gelombang kompresi merupakan gelombang badan (*body wave*) yang memiliki kecepatan paling tinggi dari gelombang S. Sedangkan gelombang S atau gelombang transversal (*shear wave*) adalah salah satu gelombang badan (*body wave*) yang memiliki gerak partikel tegak lurus terhadap arah rambatnya serta waktu tibanya setelah gelombang P. Karena memiliki kecepatan tinggi gelombang ini memiliki waktu tiba terlebih dahulu dari pada gelombang S. Kecepatan gelombang Primer ( $V_p$ ) adalah  $\pm 5-7$  km/s di kerak bumi,  $> 8$  km/s di dalam mantel dan inti bumi,  $\pm 1,5$  km/s di dalam air, dan  $\pm 0,3$  km/s di udara



**Gambar 5.** Ilustrasi gelombang primer (modifikasi dari Hidayati, 2010).

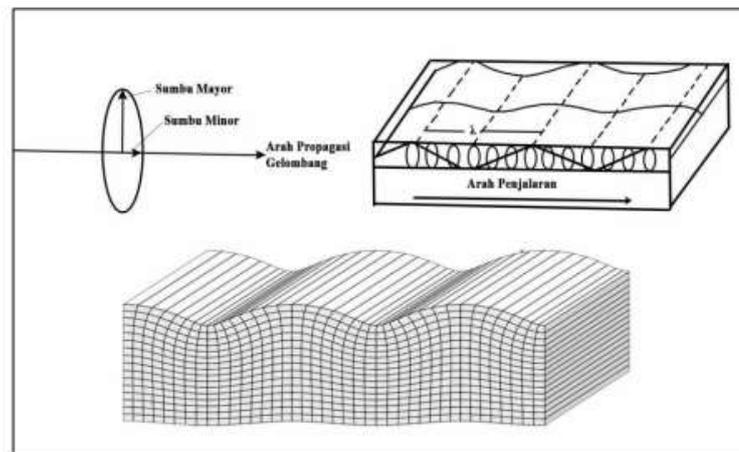


**Gambar 6.** Ilustrasi gelombang sekunder (modifikasi dari Hidayati, 2010).

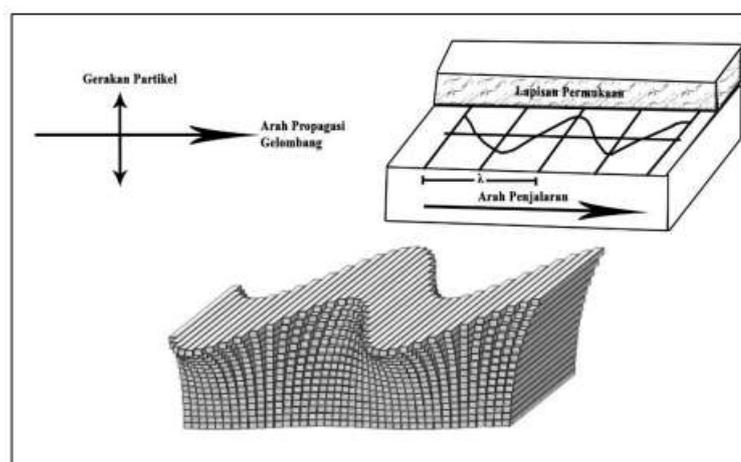
### 3.4.2. Gelombang permukaan (*Surface wave*)

Gelombang permukaan adalah gelombang yang kompleks dengan frekuensi yang rendah dan amplitudo yang besar, yang menjalar akibat adanya efek *free surface* dimana terdapat perbedaan sifat elastik. Gelombang ini dapat menjelaskan struktur mantel atas dan permukaan kerak bumi (*crust*). Sifat dan gerakan partikel media pada permukaan ada yang mirip gelombang P atau gelombang S. Berdasarkan sifat gerakan partikel media elastisnya, terdapat dua tipe

gelombang permukaan, yaitu gelombang *Rayleigh* (**Gambar 7**) dan gelombang *Love* (**Gambar 8**). Gelombang *Rayleigh* adalah jenis gelombang permukaan yang memiliki kecepatan ( $V_R$ ) adalah  $\pm 2-4,2$  km/s di dalam bumi. Arah rambatnya bergerak tegak lurus terhadap arah rambat dan searah bidang datar. Sedangkan gelombang *Love* merupakan gelombang yang arah rambat partikelnya bergetar melintang terhadap arah penjarannya. Gelombang *Love* adalah gelombang transversal, kecepatan gelombang ini di permukaan bumi ( $V_L$ ) adalah  $\pm 2-4,4$  km/s.



**Gambar 7.** Ilustrasi gelombang *Rayleigh* (modifikasi dari Hidayati, 2010).



**Gambar 8.** Ilustrasi gelombang *Love* (modifikasi dari Hidayati, 2010).

### 3.5. Karakteristik Mikroseismik, *Microearthquake* dan Mikrotremor

Sisi lain dari gelombang seismik yaitu gelombang mikroseismik (*microseismic wave*). Hal yang membedakan dengan gelombang seismik bukan hanya frekuensi dan amplitudonya yang jauh lebih kecil akan tetapi sumber gelombangnya juga bukan berasal dari pusat terjadinya gempa bumi. Tentunya ada perbedaan antara gelombang mikroseismik (*microseismic wave*) dan gelombang gempa bumi kecil (*micro-earthquake wave*). *Microearthquake* mempunyai karakteristik yang sama dengan gelombang seismik karena proses kejadiannya sama dengan proses terjadinya gelombang seismik. Hal yang membedakan keduanya hanyalah pada frekuensi dan amplitudo yang jauh lebih kecil dan tentunya dampak yang diakibatkannya. Pada gelombang *microearthquake* manusia tidak perlu untuk menyiapkan langkah preventif untuk mengatasi dampak dari gelombang ini karena memang tidak akan sampai pada taraf merusak yang membahayakan bagi kelangsungan hidup manusia. Gelombang ini memiliki karakteristik sendiri dan bukan berasal dari gempa bumi. Mikrotremor dapat juga disebut dengan suatu getaran yang memiliki periode pendek yang merupakan akumulasi akibat dari efek gelombang laut, interaksi angin dengan tanaman dan kegiatan atmosfer (Toiba dkk., 2016).

Mikrotremor awalnya digunakan untuk mempelajari serta mengetahui karakteristik dari batuan sedimen struktur tanah bawah permukaan berhubungan dengan daerah dinamis pada suatu titik pengukuran. Mikrotremor biasa disebut juga sebagai *ambient noise*. *Ambient noise* adalah suatu getaran yang berasal dari tanah dengan amplitudo tertentu serta dapat menggambarkan keadaan geologi pada daerah tersebut yang diakibatkan oleh peristiwa alam maupun buatan, seperti angin, getaran kendaraan atau gelombang laut. Pada penelitian mikrotremor berdasarkan parameter periode dominan dan amplifikasi maka dapat diketahui karakteristik lapisan tanah. Dan parameter yang terukur antara lain frekuensi dominan ( $f_0$ ) dan ketebalan sedimen. Mikrotremor adalah getaran tanah yang secara terus menerus dan

sangat kecil yang berasal dari getaran aktivitas manusia, angin, lalu lintas, dan lain-lain (Kanai, 1983).

Metode mikroseismik adalah metode yang banyak berperan dalam beberapa bidang seperti eksplorasi gas bumi dan minyak bumi, panasbumi, pembelajaran struktur dalam bumi, studi kegunungapian serta kegempaan. Alat mikroseismik harus bisa mengidentifikasi adanya peluruhan getaran yang ada pada medium, bersama dengan broadband seismometer mengukur secara real time pergerakan tanah kemudian direkam sebagai fungsi waktu. Mikroseismik adalah aktivitas gelombang seismik yang memiliki ukuran kecil, sama dengan proses gempabumi namun belum pasti dirasakan oleh manusia.

Secara umum, sinyal mikroseismik terproses dan terekam hampir sama dengan sinyal gempa tektonik. Namun, pada analisis gempa mikro di wilayah panasbumi berada pada magnitudo kurang dari 3 Mw, sedangkan pada analisis sinyal gempa tektonik membahas magnitudo diatas 5 Mw, sedangkan (Julian dan Foulger, 2009). Pertama sinyal kontinu yang terekam dianalisis menggunakan deteksi algoritma gempabumi agar dapat mengetahui kapan sumber energi impulsif muncul. Selanjutnya seismogram akan menyimpan sinyal termasuk beberapa *trigger time window* yang digunakan untuk menangkap data dalam bentuk sinyal digital. Pada aplikasi borehole, sensor triaxial ini digunakan untuk menjelaskan mengenai orientasi raypath dari fase insiden. Pada pemodelan kecepatan secara detail dalam industri minyak dan gas bisa direkonstruksi melalui *sonic logs* dan event location dikalkulasi pada titik yang sesuai dengan analisa waktu tiba pada beda fase dan orientasi raypath. Atribut seismik yang dapat didapatkan dari perekaman ini yang didefinisikan melalui frekuensi dan amplitudo yaitu magnitudo, asumsi dari beberapa patahan dari stress dan energi potensial, serta zona area patahan dapat bermanfaat untuk interpretasi dari seismik ini dan bisa langsung terkomputasi (Haerudin dkk., 2019).

### 3.6. Metode *Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR)*

Nakamura (1989) mengusulkan metode HVSR untuk mengestimasi frekuensi alami dan amplifikasi geologi setempat dari data mikrotremor. Metode ini juga dapat digunakan untuk melokalisasi daerah rawan kerusakan bangunan akibat efek lokal, interaksi antara bangunan dan tanah, dan kekuatan bangunan. HVSR merupakan salah satu cara untuk memahami sifat struktur bawah permukaan tanpa menyebabkan gangguan pada struktur tersebut. Metode ini merupakan metode yang memperlihatkan hubungan antara struktur bawah permukaan tanah dengan perbandingan rasio spektrum Fourier dari sinyal mikrotremor komponen horizontal terhadap komponen vertikalnya (Nakamura, 1989). Metode HVSR dapat menunjukkan jenis tanah yang berdasarkan dari nilai frekuensi dominan, yang tentunya sangat membantu dalam pengaplikasian bawah permukaan seperti klasifikasi kerentanan tanah atau referensi untuk membangun konstruksi yang tahan gempa (Haerudin dkk., 2020).

Metode HVSR menghasilkan parameter penting yaitu nilai frekuensi dominan dan faktor amplifikasi yang berkaitan dengan parameter fisik bawah permukaan. Metode HVSR dapat menjelaskan fenomena frekuensi resonansi lapisan permukaan tanpa harus menggunakan referensi dari batuan bedrock, yaitu dengan melakukan pengukuran di satu tempat dan menghasilkan tiga komponen yaitu vertikal, horizontal utara-selatan, dan horizontal timur-barat. Metode ini juga berfungsi untuk mengidentifikasi respon resonansi pada lembah sedimen atau cekungan yang berisi material sedimen. Metode ini merupakan metode yang efektif, murah, dan ramah lingkungan yang dapat digunakan pada wilayah pemukiman. Dalam karakterisasi HVSR, perlu diketahui model gelombang yang terkandung dalam HVSR terlebih dahulu. Ada beberapa perbedaan pendapat tentang model gelombang yang terkandung dalam HVSR. Nakamura (2000) berpendapat bahwa HVSR merupakan gelombang badan, yaitu gelombang SH (Sekunder-Horizontal). Menurut Sylvette dkk., (2006), bahwa HVSR dipengaruhi oleh factor gelombang permukaan yaitu gelombang *Love* dan *Rayleigh*. Nakamura

(1989) mengembangkan konsep bahwa amplitudo dan frekuensi puncak HVSR merepresentasikan amplifikasi dan frekuensi lokasi (*site*) setempat. *Site effect* terjadi akibat terdapatnya lapisan tanah lunak yang menempati setengah cekungan dari batuan dasar. Dalam kondisi ini terdapat empat komponen gerakan yang terlibat, yaitu komponen gerak horizontal dan vertikal di batuan dasar dan komponen gerak horizontal dan vertikal di permukaan (Arifti, 2014). Faktor amplifikasi dari gerakan horizontal dan vertikal di permukaan tanah sedimen berdasarkan pada gerakan seismik di permukaan tanah yang bersentuhan langsung dengan batuan dasar di area cekungan dilambangkan dengan  $T_H$  dan  $T_V$  (Nakamura, 2000).

*Site Effect* ( $T_{SITE}$ ) pada permukaan lapisan sedimen, biasanya digambarkan dengan cara membandingkan faktor amplifikasi dari gerakan horizontal dan vertikal pada permukaan tanah sedimen.

$$T_{SITE} = \frac{T_H}{T_V} \quad (1)$$

Besarnya faktor amplifikasi horizontal ( $T_H$ ) adalah sebagai berikut :

$$T_H = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (2)$$

Dengan  $S_{HS}$  adalah spektrum dari komponen gerak horizontal di permukaan tanah, dan  $S_{HB}$  adalah spektrum dari komponen gerak horizontal pada dasar lapisan tanah.

Besarnya faktor amplifikasi vertikal ( $T_V$ ) adalah sebagai berikut :

$$T_V = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (3)$$

Dengan  $S_{VS}$  yaitu spektrum dari komponen gerak vertikal di permukaan tanah, dan  $S_{VB}$  merupakan spektrum dari komponen gerak vertikal pada dasar lapisan tanah.

Gelombang *Rayleigh* mendominasi data mikrotremor dibanding beberapa jenis gelombang yang lain. Pengaruh gelombang *Rayleigh* pada rekaman mikrotremor memiliki besar yang sama untuk komponen vertikal dan horizontal saat rentang frekuensi 0,2 - 20,0 Hz, sehingga rasio spektrum antara komponen horizontal dan vertikal di batuan dasar mendekati satu :

$$\frac{S_{HB}}{S_{VB}} \approx 1 \quad (4)$$

Dengan mensubstitusikan persamaan amplifikasi horizontal dengan amplifikasi vertikal dimasukkan dalam amplifikasi horizontal dan vertikal pada permukaan tanah sedimen :

$$T_{SITE} = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (5)$$

Persamaan tersebut menjadi dasar perhitungan rasio spektrum mikrotremor komponen horizontal terhadap komponen vertikalnya (HVSR), sehingga dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$HVSR = T_{SITE} = \sqrt{\frac{f(S_{Utara-Selatan})^2 + (S_{Barat-Timur})^2}{S_{Vertikal}}} \quad (6)$$

Agar mendapatkan kurva HVSR yang *reliable* ada beberapa kriteria yang perlu diperhatikan (SESAME, 2004), kriteria-kriteria penting tersebut ditampilkan dalam tabel 1 berikut :

**Tabel 1.** Kriteria-kriteria untuk mendapatkan kurva HVSR yang *reliable* (SESAME, 2004).

No	Kriteria-kriteria untuk HVSR <i>Reliable</i>
1	$f_0 > 10/l_w$
2	$n_c(f_0) > 200$
3	$\partial_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$ dan $\partial_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$

Dimana frekuensi  $f_0$  pada puncak H/V,  $l_w$  panjang dari window dan  $n_c = l_w \cdot n_w$ .  $f_0$  dengan  $n_w$  merupakan jumlah window yang dipilih. Dan untuk  $\partial_A(f)$  merupakan deviasi standar dari  $A_{H/V}(f)$  atau amplitudo kurva H/V dari frekuensi.

### 3.7. Frekuensi Predominan

Pengolahan dengan menggunakan metode HVSR menghasilkan nilai frekuensi dominan atau frekuensi alami dan nilai amplifikasi. Frekuensi ini kerap muncul sehingga diakui sebagai nilai frekuensi dari lapisan batuan di wilayah tersebut dan nilai frekuensi dapat menunjukkan jenis maupun karakteristik batuan tersebut (Sungkono dan Santosa, 2011). Lachet dan Brad (1994) melakukan uji simulasi dengan menggunakan 6 model stuktur geologi sederhana dengan kombinasi variasi kontras kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) dan ketebalan lapisan permukaan ( $h$ ). Hasil simulasi menunjukkan bahwa nilai puncak frekuensi berubah terhadap variasi kondisi geologi. Dari nilai frekuensi dominan yang terukur di permukaan dapat diketahui karakteristik batuan di bawahnya. Hal tersebut dapat dilihat pada Tabel 2 tentang klasifikasi tanah berdasarkan nilai frekuensi dominan mikrotremor.

**Tabel 2.** Klasifikasi tanah berdasarkan nilai frekuensi resonansi Mikrotremor (Kanai, 1983).

Klasifikasi Tanah		Periode Predominan (s)	Frekuensi (Hz)	Klasifikasi Kanai	Deskripsi
Tipe	Jenis				
IV	I	0,05 – 0,15	6,667 – 20	Batuan tersier atau lebih tua. Terdiri dari batuan <i>hard sand</i> dan <i>gravel</i>	Ketebalan sedimen permukaannya sangat tipis, didominasi oleh batuan keras
	II	0,15 – 0,25	4,0 – 6,7	Batuan aluvial, dengan ketebalan 5 meter. Terdiri dari <i>sandy-gravel</i> , <i>sandy hard</i> , <i>clay</i> , dan <i>loam</i> .	Ketebalan sedimen permukaannya masuk dalam kategori menengah 5 – 10 meter.
II	III	0,25 – 0,4	2,5 – 4	Batuan aluvial dengan ketebalan > 5 meter. Terdiri dari <i>sandy-gravel</i> , <i>sandy hard</i> , <i>clay</i> , dan <i>loam</i> .	Ketebalan sedimen permukaan masuk dalam kategori tebal, sekitar 10 – 30 meter.
I dan II	IV	>0,4	< 2,5	Batuan aluvial yang terbentuk dari sedimentasi delta, top, soil, lumpur, dengan kedalaman $\geq$ 30 meter.	Ketebalan sedimen permukaannya sangat tebal.

### 3.8. Faktor Amplifikasi

Amplifikasi merupakan perbesaran gelombang seismik yang terjadi karena adanya perbedaan yang signifikan antar lapisan, dengan kata lain gelombang seismik akan diperbesar, jika merambat dari suatu medium ke medium lain yang lebih lunak dibandingkan dengan medium yang telah dilalui sebelumnya. Sedangkan frekuensi natural sangat erat kaitannya dengan

ketebalan sedimen. Karena nilai amplifikasi dan frekuensi natural merupakan dua parameter penting yang diperoleh dari kurva HVSR maka dicari hubungan antara keduanya. Apakah pada daerah dengan nilai frekuensi natural yang rendah nilai amplifikasinya rendah juga atau sebaliknya. Konsep dasar fenomena amplifikasi gelombang seismik oleh adanya batuan sedimen yang berada di atas basement dengan perbedaan kecepatan dan densitas pada lapisan sedimen ( $V_s$ ), kecepatan pada lapisan bawah permukaan tanah ( $V_o$ ) yang lebih dominan. Frekuensi resonansi banyak ditentukan oleh fisik dari lapisan sedimen dengan kecepatan gelombang S ( $V_s$ ) dan ketebalan ( $h$ ) (Haerudin dkk., 2019). Klasifikasi nilai faktor amplifikasi di tunjukkan pada **Tabel 3**. Berikut.

**Tabel 3.** Klasifikasi nilai faktor amplifikasi (Setiawan, 2009)

No	Klasifikasi	Nilai Faktor Amplifikasi
1	Rendah	<3
2	Sedang	3 – 6
3	Tinggi	6 - 9
4	Sangat Tinggi	$\geq 9$

### 3.9. Kecepatan Gelombang Geser ( $V_s$ )

Kecepatan gelombang geser (*shear wave*) adalah parameter penting untuk menentukan karakteristik dinamika tanah. Gelombang S diperlukan dalam analisis dan evaluasi *site effect* khususnya pada lapisan sedimen yang berada di atas batuan dasar.  $V_s$  ditentukan dari perambatan gelombang seismik yang tegak lurus terhadap arah rambatan gelombangnya. Nilai kecepatan gelombang geser merupakan representasi dari sifat geser struktur tanah (Sungkowo, 2016). Berikut adalah klasifikasi nilai  $V_{s30}$  berdasarkan *Uniform Building Code* (UBC) **Tabel 4**.

**Tabel 4.** Klasifikasi jenis batuan berdasarkan *Uniform Building Code* (UBC) (Nurrahmi dkk., 2015)

Tipe Batuan	Profil Jenis Batuan	$V_{s30}$
A	Batuan Keras	>1500 m/s

B	Batuan Sedang	760 – 1500 m/s
C	Tanah Keras dan Batuan Lunak	360 – 760 m/s
D	Tanah Sedang	180 – 360 m/s
E	Tanah Lunak	<180 m/s

### 3.10. Indeks Kerentanan Seismik (Kg)

Indeks kerentanan seismik (Kg) adalah indeks yang menggambarkan tingkat kerentanan lapisan tanah permukaan terhadap deformasi (perubahan) saat terjadi gempa bumi. Tinggi rendahnya indeks kerentanan seismik dipengaruhi oleh faktor amplifikasi dan frekuensi dominan. Tingkat indeks kerentanan seismik yang tinggi pada umumnya terdapat pada daerah yang. Indeks kerentanan seismik diklasifikasikan dalam **Tabel 5**. Berikut.

**Tabel 5.** Klasifikasi nilai indeks kerentanan seismik (Refrizon dkk, 2013)

No	Klasifikasi	Nilai Indeks Kerentanan
1	Rendah	<3
2	Sedang	3 – 6
3	Tinggi	>6

### 3.11. RR-PSO

Salah satu metode optimasi global yang telah banyak digunakan dalam permasalahan inversi geofisika adalah *Particle Swarm Optimization* (PSO). Baru-baru ini juga diperkenalkan berbagai versi dari algoritma PSO, salah satunya yakni *Regressive-Regressive* PSO (RR-PSO) (Sungkono, 2014). Yang dapat dituliskan sebagai berikut :

$$\begin{aligned}
 V(t + \Delta t) &= (1 - (1 - \omega)\Delta t)V(t) + \phi_2\Delta t(g(t) - X(t)) + \phi_1\Delta t(l(t) - X(t)) \\
 X(t + \Delta t) &= X(t) + V(t + \Delta t)
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

RR-PSO memiliki tingkat konvergensi tertinggi di antara semua versi PSO dan perhitungan parameter yang cukup mudah. Dalam inversi, dibutuhkan suatu algoritma yang cepat dalam melakukan pencarian minimum global dan stabil agar mendapatkan parameter bawah permukaan dengan akurat dan efisien (Sungkono dan Santoso, 2014). RR-PSO merupakan salah satu versi

PSO, dimana setiap versi PSO memiliki langkah yang sama dalam mengoptimasi suatu fungsi.

1. Dilakukan inisialisasi awal yaitu menentukan banyak partikel dan iterasi yang digunakan dalam optimasi. Pada tahap ini ditentukan juga range pencarian untuk mencari nilai  $X$ , yakni  $X_{min} \leq X \leq X_{max}$  dengan vektor  $X$  merupakan posterior yang berisi kumpulan solusi inversi.
2. Populasi awal  $X$  dibangkitkan dari *range* pencarian secara random sehingga diperoleh populasi awal.

$$X_1^0, X_2^0, X_3^0, \dots, X_j^i, i = \text{iterasi}, j = \text{partikel ke } - n; n = 1, 2, 3 \dots, 200 \quad (8)$$

Dan nilai  $V$  di set 0 menjadi :

$$V_1^0 = V_2^0 = V_3^0 = \dots = V_i^0 = 0 \quad (9)$$

3. Dilakukan evaluasi fungsi obyektif dari setiap partikel yang dibangkitkan secara random sehingga diperoleh nilai fungsi obyektif.

$$f[X_1^0]; f[X_2^0]; f[X_3^0]; \dots; f[X_j^0] \quad (10)$$

4. Dilakukan penentuan parameter  $l$  dan  $g$ .  $l$  merupakan posisi terbaik masing-masing partikel sejauh iterasi yang telah dilakukan. Sedangkan  $g$  yaitu posisi terbaik yang dapat dicapai partikel dalam kelompok. Indikator terbaik dilihat dari nilai evaluasi fungsi obyektifnya, di mana posisi terbaik ketika nilai minimum.
5. Nilai  $V$  dan  $X$  diperbarui menggunakan algoritma RR-PSO. Sehingga nilai  $V$  yang diperoleh dan  $X$  yang dihasilkan sebagai iterasi pertama.

$$\begin{aligned} v_i(k+1) &= \omega v_i(k) + \phi_1(g(k) - x_i(k)) + \phi_2(l_i(k) - x_i(k)) \\ x_i(k+1) &= x_i(k) + v_i(k+1) \end{aligned} \quad (11)$$

Dimana,

$$\phi_1 = r_1 a_g, \phi_2 = r_2 a_l, r_1, r_2 \rightarrow U(0,1) \omega, a_l, a_g \in \mathbb{R} \quad (12)$$

## IV. METODE PENELITIAN

### 4.1. Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun penelitian ini dilakukan di :

Lokasi Penelitian : Kecamatan Bakauheni dan Sekitarnya (**Gambar 9**).

Tempat

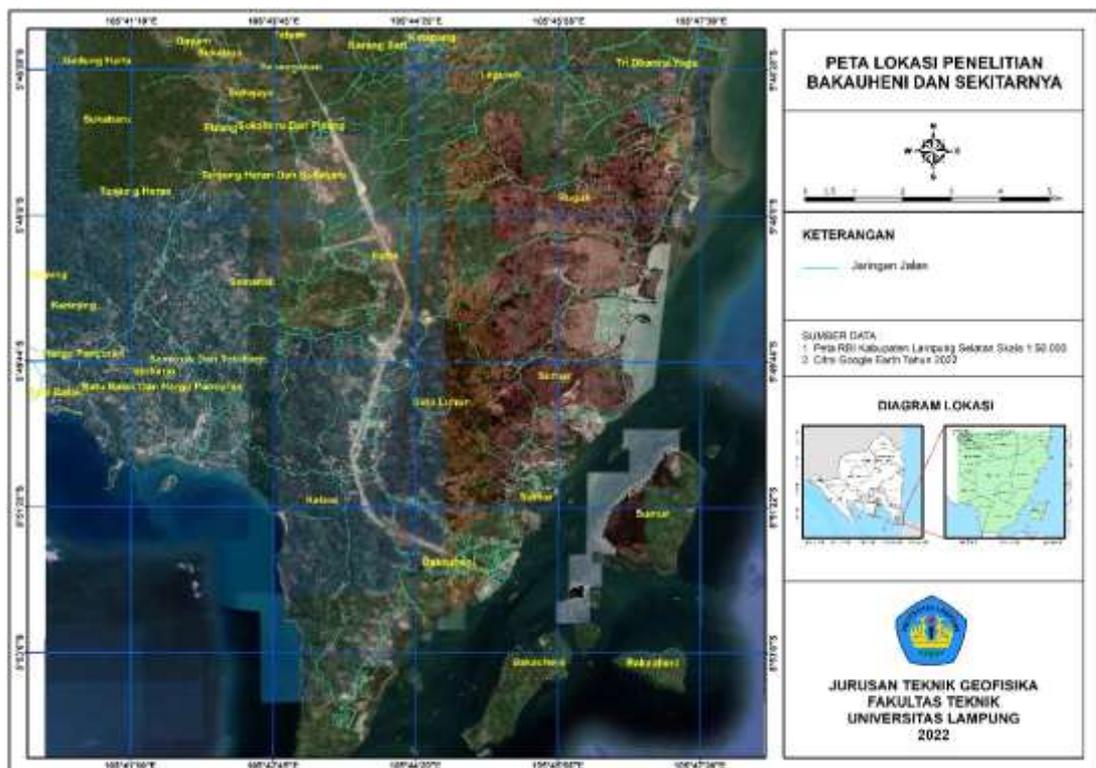
Pengolahan Data : Jurusan Teknik Geofisika Universitas Lampung.

Alamat : Laboratorium Terpadu JTG Lt. 1 - Jl. Brojongoro No.1

Gedong Meneng, Rajabasa, Gedong Meneng,

Kec. Rajabasa, Kota Bandar Lampung, Lampung 35142.

Tanggal : Juli – Oktober 2022.



Gambar 9. Peta lokasi penelitian.



#### 4.4. Prosedur Penelitian

Adapun tahapan dalam pelaksanaan penelitian adalah sebagai berikut :

##### 1. Tahap Persiapan

Pada tahap ini dilakukan persiapan alat dan bahan, kemudian melakukan pengumpulan informasi dari studi pustaka, informasi geologi, dan studi lapangan. Studi pustaka untuk mempelajari literatur-literatur yang berhubungan dengan bahasan mengenai metode mikrotremor. Tahap informasi litologi bertujuan untuk mengetahui kondisi litologi batuan di daerah penelitian.

##### 2. Tahap Akuisisi

Pada tahap akuisisi dilakukan pengambilan data di lokasi penelitian dengan metode mikrotremor. Adapun hal-hal yang dilakukan dalam proses akuisisi data dengan metode mikrotremor yaitu sebagai berikut :

- Menentukan lokasi pengukuran dan mengarahkan panah arah utara pada Amadu Seismometer Logic™ sesuai dengan arah utara geografis.
- Memasang perangkat pendukung Amadu Seismometer Logic™ seperti antena GPS, sementara itu menyambungkan kabel power negatif (hitam) dan positif (merah) ke sumber arus aki.
- Membuka pengunci pada ketiga sensor (Z, N, E) dengan memutar baut berlawanan arah jarum jam, yang ada di bagian atas dan samping alat ke arah kiri hingga baut tidak bisa diputar lagi.
- Melakukan *levelling* dengan memutar tiga baut yang ada di bagian bawah alat, hingga *bubble* pada indikator levelling berada di tengah.
- Meghubungkan kabel power yang sudah tersambung dengan sumber arus aki ke Amadu Seismometer Logic™.
- Tombol power tidak perlu ditekan, karena tombol ini berfungsi untuk mematikan saja.

##### 3. Tahap Pengolahan Data

Data yang diperoleh dari pengukuran lapangan, diolah menggunakan *software* Geopsy untuk mendapatkan nilai frekuensi dominan ( $f_0$ ) dan faktor amplifikasi

( $A_0$ ), nilai  $V_{s30}$  dan nilai indeks kerentanan seismik ( $K_g$ ) melalui proses analisis HVSr.

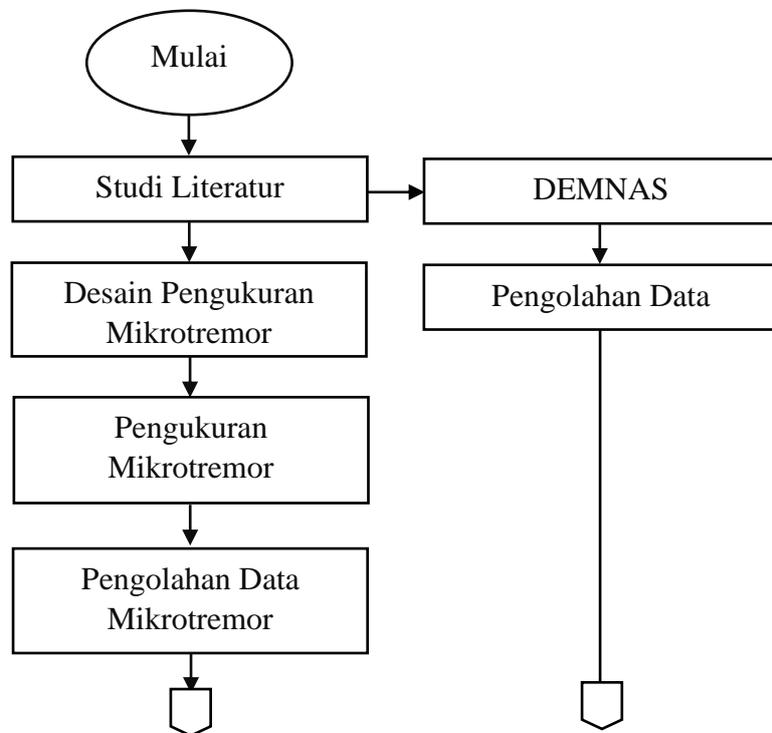
#### 4. Inversi HVSr

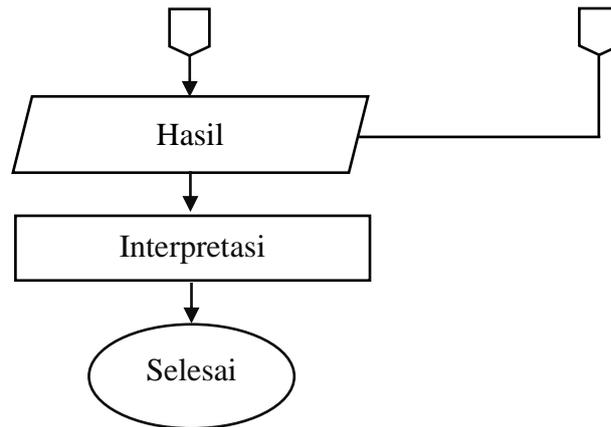
Pada proses inversi ini menghasilkan pencitraan bawah permukaan. Pencitraan didapatkan dari *crosssection* model kecepatan gelombang seismik, terutama gelombang geser ( $V_s$ ) di bawah permukaan masing-masing titik pengamatan. Nilai dari model kecepatan lapisan bawah permukaan menggambarkan pelapisan di bawah permukaan dan dikorelasikan dengan data elevasi hasil pengukuran.

#### 5. Interpretasi

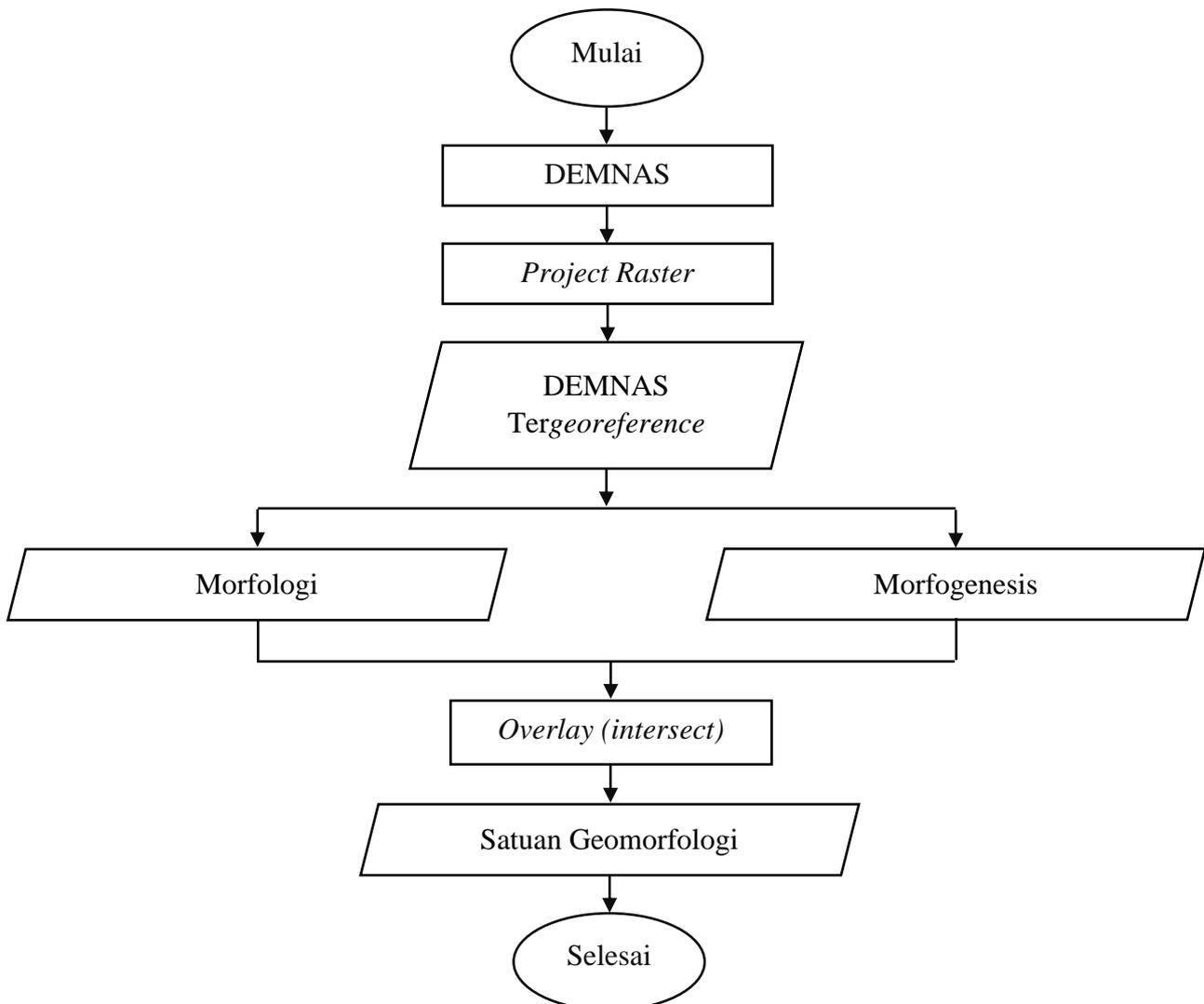
Hasil dari pemodelan inversi HVSr didapatkan nilai sebaran  $V_s$  yang dikorelasikan dengan hasil deliniasi DEMNAS dan geologi regional daerah penelitian, guna didapatkan kontras antara zona-zona pencari struktur kaldera purba.

#### 4.5. Diagram Alir

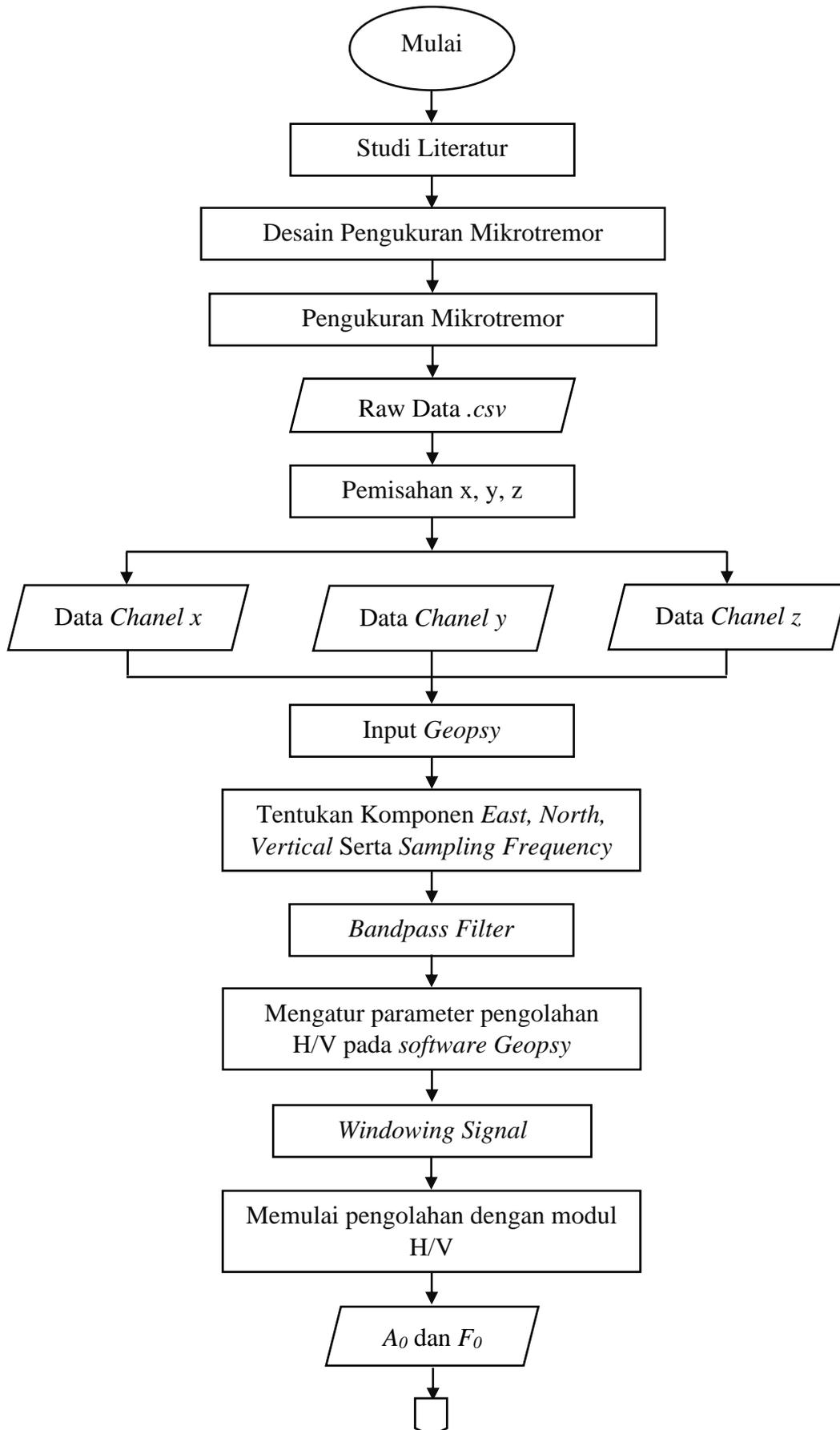


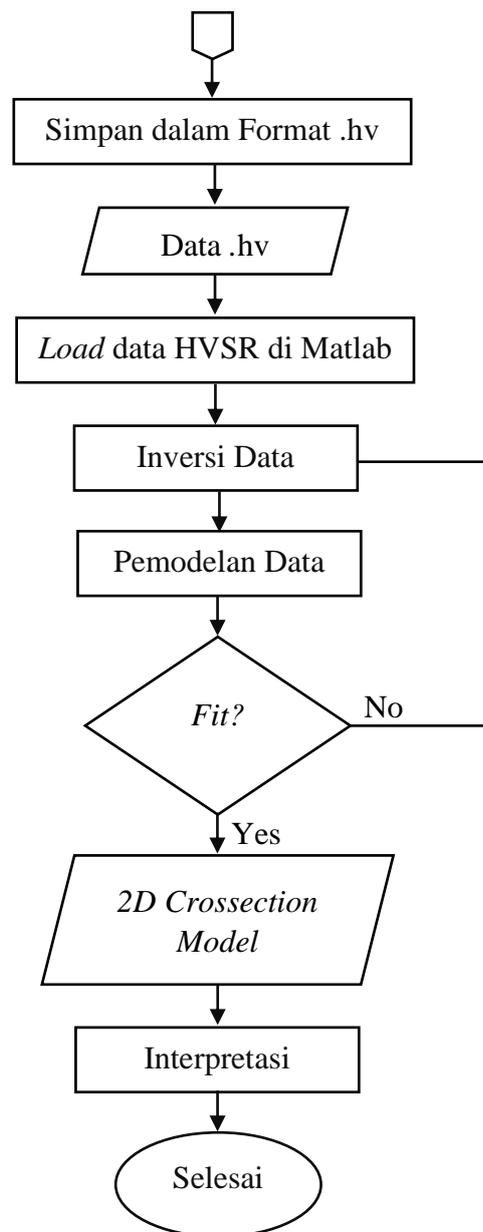


**Gambar 10.** Diagram alir umum.



**Gambar 11.** Diagram alir pengolahan data DEMNAS.





**Gambar 12.** Diagram alir pengolahan data Mikrotremor.

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.2. Kesimpulan

Adapun kesimpulan yang dapat diambil dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pengolahan DEMNAS menggunakan proses *hillshade* dan analisis geomorfologi menghasilkan keberadaan dan aktivitas vulkanik purba di Bakauheni dan sekitarnya.
2. Hasil perhitungan HVSR menghasilkan nilai  $f_0$  pada rentang  $<2,5$  Hz (lapisan sangat tebal),  $2,5 - 4$  Hz (lapisan sedimen permukaan ketebalan  $10 - 30$  meter) dan  $4 - 6,67$  Hz (lapisan sedimen permukaan ketebalan  $5 - 10$  meter). Nilai  $f_0$  tersebut menunjukkan adanya sedimen yang relatif tebal di kaldera.
3. Hasil inversi PSO HVSR, dapat di ekstraksi kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) yang menghasilkan klasifikasi tanah sangat lunak ( $0 - 175$  m/s), tanah lunak ( $175 - 350$  m/s), tanah sedang dan batuan lunak ( $350 - 750$  m/s), batuan sedang hingga keras ( $750 - 1500$  m/s) dan batuan sangat keras ( $>1500$  m/s). Hasil 2D *Crosssection*  $V_s$  menunjukkan bahwa didalam kaldera memiliki klasifikasi tanah sangat lunak hingga tanah lunak.

### 5.3. Saran

Saran dari penelitian ini yakni perlu dilakukan pengukuran metode Geofisika lainnya seperti metode geolistrik, metode gaya berat dan metode penelitian demi menunjang validitas hasil penelitian diatas yang menggunakan metode HVSR.

## DAFTAR PUSTAKA

- Ambarsari, D. 2017. Analisis Mikrotremor dengan Metode HVSR untuk Mikrozonasi Kabupaten Gunungkidul Yogyakarta. *Tugas akhir*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Mangga, A. S., Amiruddin, Suwarti, T., Gafoer, S. dan Sidarto. 1993. *Geologi Lembar Tanjungkarang, Sumatera*. Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung.
- Arifti, F.W. 2014. Identifikasi Potensi Bahaya Seismik Berdasarkan Faktor Amplifikasi Tanah dan Ketebalan Sedimen Menggunakan Mikrotremor di Kecamatan Pacitan, Kabupaten Pacitan, Jawa Timur. *Skripsi*. UIN Sunan Kalijaga. Yogyakarta.
- Bemmelen, R. W. 1949. *The Geology of Indonesia*. Martinus Nyhoff, Netherland: The Haque.
- Bronto, S., Asmoro, P., Hartono, G., dan Sulistiyono, S. 2012. Gunung Api Purba di Daerah Bakauheni – Pulau Sangiang, Selat Sunda, Kabupaten Lampung Selatan. *Jurnal Sumber Daya Geologi*.
- Bronto, S. dan Poedjoprajitno, S. 2010. Pengenalan gunung api purba di daerah Lampung berdasarkan analisis inderaja. *Prosiding Seminar Nasional PPGN-BATAN*, Jakarta, 20 Oktober 2010, 19 h.
- Hartono, U., Mangga, A, S., dan Achdan, A,. 1996. Geochemical Results of Permian Palepat and Silungkang Volcanics, Southern Sumatera. *Journal of Geology and Mineral Resources*, VI (56), 18-23.
- Haerudin, N., Alami, F., dan Rustadi. 2019. *Mikroseismik, Mikrotremor dan Microearthquake dalam Ilmu Kebumihan*. Pusaka Media. Bandar Lampung.
- Haerudin, N., Rustadi, Alami, F., dan Yogi, I. B. S. 2020. The effect-site analysis based on microtremor data using the Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR) method in the Bandar Lampung City. *In Journal of Physics: Conference Series* (Vol. 1572, No. 75, pp. 1-10). IOP Publishing.

- Hidayati, S. 2010. *Pengenalan Seismologi Gunungapi, Diklat Pelaksana Pemula Pengamat Gunungapi Baru*. Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi. Bandung.
- Julian, B.R. dan Foulger, G.R. 2009. Monitoring Geothermal Processes with Microearthquake Mechanism. *Proceedings of Thirty-Fourth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering, SGP-TR-187*.
- Kanai, K. 1983. *Seismology in Engineering*. Tokyo University. Japan.
- Laby, D.A., Santosa, J.B., dan Sungkono. 2016. Implementasi Algoritma Rr-Pso Untuk Inversi Dispersi Gelombang Rayleigh Dan Vertical Electrical Sounding. *Jurnal Pomits 1-7*.
- Lachet, C dan Brad, P.Y. 1994. Numerical and Theoretical Investigations on The Possibilities and Limitations of k mur 's Tec nique. *Jurnal Physics Earth*. 42. 377-397.
- Mukti, F.Z., Harintaka, dan Djurjani. 2018. Evaluasi Hasil Integrasi Berbagai Ketelitian Data Model Elevasi Digital Studi Kasus NLP 1316-61 dan 1316-63. *Geomatika* Volume 24 No. 1 Mei 2018: 39-48.
- Nakamura, Y. 1989. A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface. *Railway Technical Research Institute, Quarterly Reports*, 30(1).
- Nakamura, Y. 2000. Clear identification of fundamental idea of Nakamura's technique and its applications. *In Proceedings of the 12<sup>th</sup> world conference on earthquake engineering* (Vol. 2656). New Zealand.
- Nurrahmi, Efendi, R., dan Sandra. 2015. Analisis Kecepatan Gelombang Geser Vs30 Menggunakan Metode Refraksi Mikrotremor (Remi) di Kelurahan Talise. *Jurnal Gravitasi*. 14(1): 7-12.
- Pilouk, M. and Tempfli, K. 1991. *A Digital Image Processing Approach to Creating DTM From Digital Contours*. *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*. 956-96.
- Prabowo, U.N. 2015. Pemetaan Daerah Rawan Rekahhan Tanah Berdasarkan Analisis Mikrotremor Di Kotamadya Denpasar dan Kabupaten Badung, Bali. *Tesis*. Yogyakarta: Universitas Gajah Mada

- Rahayu, T.S., Utami, H.A., Muharoroh, E., Nuarini, D.A., dan Rasimeng, S. 2016. Analisis Resiko Gemabumi di Daerah Bandar Lampung berdasarkan Metode Horizontal to Vertical Spectrum Ratio Mikrotremor. *In: Prosiding Pertemuan Ilmiah Tahunan Riset Kebencanaan ke-3*, Bandung: 23-24 Mei 2016.
- Refrizon, Hadi, A.I., Lestari, K., dan Oktari, T. 2013. Analisis Percepatan Getaran Tanah Maksimum dan Tingkat Kerentanan Seismik Daerah Ratu Agung Kota Bengkulu. *Prosiding Semirata FMIPA Universitas Lampung*. Bandar Lampung. 2013.
- SESAME. 2004. *Guidelines for the Implementation of the H/V Spectral Ratio Technique on Ambient Vibration Measurement, Processing and Interpretation*. European Commission-Research General Directorate.
- Setiawan J.R. 2009. Mikrozonasi Seismitas Daerah Yogyakarta Dan Sekitarnya. Tesis. Bandung: Institut Teknologi Bandung. Syaifuddin F, Bahri A S, Lestari W and Pandu J 2016 Microtremor study of Gunung Anyar mud volcano, Surabaya, East Java AIP Conference Proceedings 1730 050004 2016.
- Sidarto, Sandjaya, I., Margono, U., dan Novita, D., 2017. *Peta Geologi Lembar Panengahan, skala 1:50.000*. Pusat Survei Geologi, Badan Geologi, Bandung.
- Sieh, K. dan Natawidjaja, D. 2000. Neotectonics of the Sumatran fault. *Indonesia. J. Geophys. Res.* 105(28), 295-28, 326.
- Sungkono dan Santosa, B.J. 2011. Karakterisasi Kurva Horizontal-To-Vertical Spectral Ratio: Kajian Literatur dan Pemodelan. *Jurnal Neutrino* 4(1).
- Sungkono dan Santosa, B.J. 2014. Differential evolution adaptive metropolis sampling method to provide model uncertainty and model selection criteria to determine optimal model for Rayleigh wave dispersion. *Arab. J. Geosci.*, pp. 1–21.
- Sungkowo, A. 2016. Studi Kerentanan Sesimik dan Karakteristik Dinamik Tanah di Kota Yogyakarta dari Data Mikrotremor. Yogyakarta: Tesis, Universitas Islam Indonesia.

- Suntoko, H., dan Sriyana. 2016. Penentuan Kedalaman Batuan Dasar Menggunakan Microtremor Array Di Tapak RDE Serpong. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 87-92.
- Supartoyo dan Surono. 2008. Katalog Gempabumi Merusak Indonesia Tahun 1629 – 2006. *Pusat Vulkanologi dan Mitigasi Bencana Geologi*. Badan Geologi.
- Susetyo, D.B., Lumban-gaol, Y.A., dan Sofian, I. 2018. Prototype of National Digital Elevation Model in Indonesia. *ISPRS Technical Commission IV Symposium 2018*.
- Sylvette, B.C., Cécile, C., Pierre-Yves, B., Fabrice, C., Peter, M., Jozef, K., dan Fäh, D. 2006. H/V ratio: a tool for site effects evaluation. Results from 1-D noise simulations. *Geophysical Journal International*, 167(2), 827-837.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., dan Keys, D.A. 1976. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press. London.
- Toiba, Y., Sili, P.D., dan Maskur, M. 2016. Analisis Mikrotremor Kawasan Palu Barat Berdasarkan Metode Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSR). *Gravitasi*, 15(1).
- Van Zuidam, R.A. dan Van Zuidam-Cancelado, F.I. 1979. Terrain analysis and classification using aerial photographs. A geomorphological approach. ITC Textbook of Photo-interpretation. ITC. Enschede.
- Zaenudin, A., Boy, I.G., Farduwin, H., dan Wibowo, R.C. 2022. RR-PSO Inversion of HVSR Curve to Estimate Shear Wave Velocity: An Experimental Study. *Turkish Journal of Earth Sciences*.