

Skripsi Geofisika

**ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI PADA PANAS BUMI BORA
MENGUNAKAN MIKROZONASI *GROUND SHEAR STRAIN* DAN
AKUIFER BAWAH PERMUKAAN**



OLEH:

DEDE MUHAIMIN AZIZ

H061181324

**DEPARTEMEN GEOFISIKA
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR**

2024



Optimized using
trial version
www.balesio.com

HALAMAN JUDUL

**Analisis Potensi Likuifaksi pada Panas Bumi Bora Menggunakan
Mikrozonasi *Ground Shear Strain* dan Akuifer Bawah Permukaan**

SKRIPSI

Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains

Pada Departemen Geofisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Hasanuddin

OLEH:

DEDE MUHAIMIN AZIZ

H061181324

DEPARTEMEN GEOFISIKA

FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM

UNIVERSITAS HASANUDDIN

MAKASSAR

2024



HALAMAN PENGESAHAN

**Analisis Potensi Likulfaksi pada Panas Bumi Bora Menggunakan
Mikrozonasi *Ground Shear Strain* dan Akulfer Bawah Permukaan**

Disusun dan Diajukan Oleh:

DEDE MUHAIMIN AZIZ

H061181324

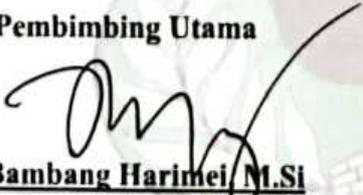
Telah dipertahankan dan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka
Penyelesaian Program Sarjana Program Studi Geofisika Fakultas Matematika dan
Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin

Pada 26 April 2024

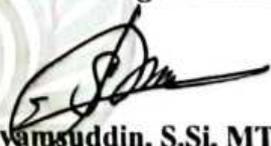
Dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui

Pembimbing Utama


Ir. Bambang Harimej, M.Si
NIP. 196105011991031003

Pembimbing Pertama


Swamsuddin, S.Si, MT
NIP. 197401152002121001

Ketua Departemen Geofisika

Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Universitas Hasanuddin


Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng
NIP. 196709291993031003



PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertandatangan di bawah ini:

Nama : Dede Muhaimin Aziz

NIM : H061181324

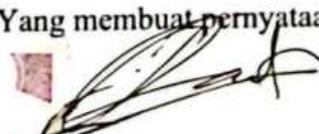
Departemen : Geofisika

Judul Skripsi : Analisis Potensi Likuifaksi pada Panas Bumi Bora Menggunakan Mikrozonasi *Ground Shear Strain* dan Akuifer Bawah Permukaan

Menyatakan bahwa skripsi ini benar-benar hasil karya sendiri dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar sarjana di Universitas Hasanuddin atau Lembaga Penelitian lain kecuali kutipan dengan mengikuti tata penulisan karya ilmiah yang sudah lazim digunakan, karya tulis ini merupakan murni dari gagasan penelitian saya sendiri, kecuali arahan dari Tim Pembimbing dan masukan Tim Penguji.

Makassar, 26 April 2024

Yang membuat pernyataan


METERAI
TEMPÉL Dede Muhaimin Aziz
B7ALX138064009



Optimized using
trial version
www.balesio.com

ABSTRAK

Indonesia merupakan salah satu negara yang kaya akan sumber energi panas bumi, dengan potensi mencapai 40% cadangan panas bumi dunia. Dalam rangka memenuhi kebutuhan energi yang terus meningkat, pemerintah daerah Provinsi Sulawesi Tengah berupaya mengembangkan potensi panas bumi di daerah Bora-Palu yang memiliki cadangan terduga sebesar 93 MWe. Namun, daerah ini berada di dekat Sesar Palu Koro yang masih aktif dengan pergerakan mencapai 6,3 cm/tahun sehingga berpotensi mengalami bencana gempa bumi dan likuifaksi. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi likuifaksi pada daerah panas bumi Bora saat terjadi gempa bumi dengan menganalisis hasil Ground Shear Strain dan sebaran akuifer bawah permukaan. Metode yang digunakan adalah mikrotremor HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) untuk mendapatkan parameter frekuensi dominan, faktor amplifikasi, dan ground shear strain yang mengindikasikan potensi likuifaksi. Pengukuran dilakukan di 25 titik di area WKP Bora dengan durasi 60 menit per titik. Hasil penelitian menunjukkan titik-titik yang berpotensi mengalami likuifaksi seperti GTB_21, GTB_16, GTB_22, GTB_13, dan GTB_02 yang ditandai dengan adanya rekahan tanah, dampak pada bangunan, dan munculnya air permukaan setelah gempa Palu 2018. Sebaran titik dengan potensi likuifaksi tinggi memiliki nilai ground shear strain 0,00432 - 0,00648. Kemudian, dilakukan Pembobotan untuk penarikan kesimpulan pada Eksploitasi panas bumi Bora. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa peluang terjadinya likuifaksi cukup besar di WKP Bora. Penelitian ini diharapkan dapat dijadikan acuan bagi pemerintah setempat dalam upaya mitigasi bencana kerentanan tanah kedepannya.

Kata Kunci: Mikrotremor, HVSR, Ground Shear Strain, Akuifer



ABSTRACT

Indonesia is one of the countries rich in geothermal energy resources, with the potential to reach 40% of the world's geothermal reserves. In order to meet the increasing energy demand, the local government of Central Sulawesi Province is trying to develop geothermal potential in the Bora-Palu area, which has 93 MWe of estimated reserves. However, this area is located near the active Palu Koro Fault with a movement of up to 6.3 cm/year, which has the potential to experience earthquakes and liquefaction disasters. This study aims to determine the potential for liquefaction in the Bora geothermal area during an earthquake by analyzing the results of Ground Shear Strain and the distribution of subsurface aquifers. The method used is HVSR (Horizontal to Vertical Spectral Ratio) microtremor to obtain dominant frequency parameters, amplification factors, and ground shear strains that indicate liquefaction potential. Measurements were conducted at 25 points in the WKP Bora area with a duration of 60 minutes per point. The results showed that points with liquefaction potential such as GTB_21, GTB_16, GTB_22, GTB_13, and GTB_02 were characterized by ground fractures, impacts on buildings, and the emergence of surface water after the 2018 Palu earthquake. The distribution of points with high liquefaction potential has a ground shear strain value of 0.00432 - 0.00648. Then, weighting was carried out to draw conclusions on Bora geothermal exploitation. The results obtained show that the chance of liquefaction is quite large in WKP Bora. This research is expected to be used as a reference for the local government in future soil vulnerability disaster mitigation efforts.

Keywords: *Microtremor, HVSR, Ground Shear Strain, Aquifer*



KATA PENGANTAR

Alhamdulillah puji syukur penulis panjatkan kepada **Allah SWT**, karena atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir yang berjudul “**Analisis Potensi Likuifaksi pada Panas Bumi Bora Menggunakan Mikrozonasi *Ground Shear Strain* dan Akuifer Bawah Permukaan**”, sebagai salah satu syarat untuk menyelesaikan studi pada Program Studi Geofisika Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam Universitas Hasanuddin. Sholawat serta salam tak lupa penulis curahkan kepada **Nabi Muhammad SAW**. Kepada sahabat dan pengikutnya yang senantiasa mengikuti sunnah beliau hingga akhir zaman. Selesainya proses penyusunan tugas akhir ini pun didukung oleh berbagai pihak yang memberikan semangat, ide, dukungan, dan doa tentunya. Dengan segala kerendahan hati, penulis ingin menyampaikan salam hormat dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Kepada orang tua tercinta, Ibu **Masitha** dan Bapak **Abdul Azis** yang selalu memberikan doa dan dukungan, sehingga penulis dapat menyelesaikan Pendidikan strata satu ini. Terima kasih juga untuk kakak saya **Nur Fajr Azzahra** dan adik saya **Abdi Azhar Azis** serta **Adelia Ainun Zahra**, yang telah memberikan semangat disaat penulis menyelesaikan tugas akhir ini.
2. Bapak **Ir. Bambang Harimei, M.Si** dan Bapak **Syamsuddin, S.Si., MT.** selaku pembimbing utama dan pembimbing pertama penulis. Terima kasih telah membimbing dan memotivasi penulis dengan penuh tanggung jawab da penulis hingga selesainya tugas akhir ini.



3. Bapak **Sofian, S.Si.** selaku pembimbing lapangan penulis di BMKG Stasiun Geofisika Kelas I Palu, terima kasih telah meluangkan waktu untuk membimbing penulis, serta Bapak **Hendrik Leopatty, S.Si** selaku Koordinator Bidang Data dan Informasi BMKG Stasiun Geofisika Kelas I Palu.
4. Ibu **Makhrani, S.Si., M.Si.** dan Bapak **Andi Muhammad Pramatadie, S.T., M.Eng., Ph.D.** selaku tim penguji dalam pelaksanaan seminar proposal penelitian, seminar hasil penelitian, dan ujian sidang skripsi geofisika, terima kasih atas segala masukan serta saran kepada penulis.
5. Bapak **Dr. Eng. Amiruddin, S.Si., M.Si.** selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin
6. Bapak **Dr. Muh. Alimuddin Hamzah, M.Eng.** selaku Ketua Departemen Geofisika FMIPA Universitas Hasanuddin
7. Bapak **Dr. Erfan, M.Si.** selaku Dosen Penasihat Akademik yang banyak memberikan masukan kepada penulis.
8. Seluruh **Dosen-dosen Departemen Geofisika** yang telah memberikan ilmunya kepada penulis selama perkuliahan.
9. Seluruh **Kawan-kawan Mahasiswa Unhas** yang memiliki satu kesamaan, saudara **FISIKA 2018** dan **MIPA 2018**, serta senior dan junior saya yang telah berjasa selama saya berkuliah.
10. Teman seperjuangan Tugas Akhir dan Kerja Praktek, **Sarwan Hendrick** dan



la **Wahyu Rahmadani**, terima kasih untuk tetap selalu berjuang bersama
 lis hingga terselesaikannya tugas akhir ini. Teman seperjuangan KP

BMKG Palu, terima kasih telah kebersamai penulis selama berada di tempat KP.

11. Kantin Jasmip yang telah menjadi tempat mendapatkan ilmu diluar kelas serta membangun ide-ide yang didampingi **Kak Surl** dan **Mace**.

Makassar, 26 April 2024

PENULIS



Dede Muhaimin Aziz



Optimized using
trial version
www.balesio.com

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
PERNYATAAN KEASLIAN.....	iv
ABSTRAK	v
KATA PENGANTAR.....	vii
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
BAB I.....	1
PENDAHULUAN.....	1
I.1. Latar Belakang	1
I.2. Rumusan Masalah	4
I.3. Ruang Lingkup	4
I.4. Tujuan Penelitian.....	4
BAB II	5
TINJAUAN PUSTAKA	5
II.1. Geologi Regional.....	5
II.2. Gelombang Seismik	10
II.3. Gempabumi	12
II.4. Mikrozonasi.....	13
II.4.1. <i>Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVS)</i>	13
II.4.2. <i>Peak Ground Acceleration (PGA)</i>	19
II.4.3. <i>Ground Shear Strain (GSS)</i>	21
II.5. Likuifaksi.....	23
II.6. Sebaran Akuifer.....	25
BAB III.....	32
METODOLOGI PENELITIAN	32
III 1. Peta Lokasi Penelitian.....	32
Alat dan Bahan.....	32
1. Alat	32
2. Bahan.....	33



III.3.	Prosedur Akuisisi Data	33
III.4.	Prosedur Pengolahan Data	34
III.5.	Bagan Alir.....	37
BAB IV	.....	38
HASIL DAN PEMBAHASAN	.....	38
IV.1.	Hasil HVSR Panas Bumi Bora.....	38
IV.2.	Hasil Ground Shear Strain	49
IV.3.	Hasil Akuifer sebagai Faktor Likuifaksi Panas Bumi Bora	51
IV.4.	Potensi Likuifaksi.....	52
BAB V	.....	57
PENUTUP	.....	57
V.1.	Kesimpulan.....	57
V.2	Saran	57
DAFTAR PUSTAKA	.....	59
LAMPIRAN	.....	63
Lampiran 1.	Proses Windowing Data.....	63
Lampiran 2.	Kurva HVSR Setiap titik Pengukuran	75
Lampiran 3.	Perhitungan PGA	81
Lampiran 4.	Perhitungan Keseluruhan Data	82
Lampiran 5.	Lembar Akuisisi Data Mikrotremor	83
Lampiran 6.	Dokumentasi Lapangan	108



DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Klasifikasi Nilai Frekuensi Dominan dan Periode Dominan oleh Kanai (BMKG,1998)	16
Tabel 2. 2 Klasifikasi Nilai Amplifikasi (Sitorus dkk, 2017).....	18
Tabel 2. 3 Klasifikasi Nilai Indeks Kerentanan Tanah (K_g) (Akkaya, 2020).....	18
Tabel 2. 4 Klasifikasi Tingkat Resiko Bahaya Gempa Bumi (Fauzi, 2001)	20
Tabel 2. 5 Ukuran Regangan dan Sifat Dinamika Tanah (Nakamura, 1997).....	23
Tabel 4. 1 Nilai frekuensi dominan, periode dominan dan faktor amplifikasi setiap site pengukuran	39
Tabel 4. 2 Klasifikasi Nilai Frekuensi Dominan Dan Periode Dominan	42
Tabel 4. 3 Klasifikasi Nilai Amplifikasi	44
Tabel 4. 4 Nilai Indeks Kerentanan Tanah (K_g) dan Peak Ground Acceleration (α) dari setiap site pengukuran	45
Tabel 4. 5 Klasifikasi nilai Indeks Kerentanan Tanah	46
Tabel 4. 6 Klasifikasi nilai <i>Peak Ground Acceleration</i> Titik Pengukuran.....	48
Tabel 4. 7 Nilai <i>ground shear strain</i> dan klasifikasinya	50
Tabel 4. 8 Pembobotan Parameter-parameter Potensi Likuifaksi.....	50
Tabel 4. 9 Hasil Pembobotan Dari Keseluruhan Parameter.....	51



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Peta Geologi Daerah Panas Bumi Bora Kabupaten Sigi Provinsi Sulawesi Tengah (Wibowo, dkk., 2011).....	6
Gambar 2. 2 Peta Hidrogeologi Palu (Arief & Hidayat, 1993).....	28
Gambar 2. 3 Peta Hidrogeologi Palu, Penampang G-H (Arief & Hidayat, 1993).....	28
Gambar 2. 4 Penampang hambatan jenis AB (desa Bora)	28
Gambar 2. 5 Genangan/mata air baru Balaroa (Widodo, dkk., 2019).....	31
Gambar 2. 6 Penampang Geolistrik Biromaru	31
Gambar 3. 1 Peta lokasi titik pengukuran mikrotremor panas bumi	32
Gambar 3. 2 Bagan Alir Penelitian.....	37
Gambar 4. 1 Kurva HVSR GTB_01.....	38
Gambar 4. 2 Peta Nilai Frekuensi Dominan.....	41
Gambar 4. 3 Peta Sebaran Nilai Amplifikasi	43
Gambar 4. 4 Peta Sebaran Nilai Indeks Kerentanan Tanah	46
Gambar 4. 5 Peta Sebaran <i>Peak Ground Acceleration</i>	47
Gambar 4. 6 Peta sebaran nilai GSS.....	50
Gambar 4. 7 Peta Potensi Bencana Likuifaksi	55
Gambar 4. 8 Grafik Bobot Total Potensi Likuifaksi	56



BAB I

PENDAHULUAN

I.1. Latar Belakang

Indonesia merupakan salah satu negara yang kaya akan sumber energi panas bumi, karena berada pada daerah terdepan di zona tektonik aktif. Energi panas bumi adalah energi panas yang tersimpan dalam batuan di bawah permukaan bumi dan fluida yang terkandung di dalamnya. Potensi panas bumi di Indonesia mencapai 40% cadangan panas bumi dunia. Hal ini ditunjukkan Indonesia memiliki 129 gunung api yang berpotensi sebagai daerah pengembangan panas bumi. Dapat ditinjau pada Wilayah kerja Panas Bumi (WKP) Bora yang berada di Sigi, Sulawesi Tengah merupakan salah satu potensi energi terbarukan yang dapat menunjang kebutuhan energi listrik daerah Sigi. Energi panas bumi ini dapat dimanfaatkan sebagai sumber daya energi yang ramah lingkungan dan minim polusi. Hal ini dikarenakan energi panas bumi memiliki tingkat emisi yang sangat rendah dibandingkan dengan energi lainnya, serta merupakan salah satu solusi terbaik untuk mengatasi keterbatasan energi saat ini yang umumnya menggunakan energi tak terbarukan (DEN, 2022).

Berdasarkan hal tersebut, data inventarisasi yang dimiliki oleh Dinas Energi dan Sumber Daya Mineral Provinsi Sulawesi Tengah (2009) menyampaikan bahwa daerah Bora memiliki cadangan terduga panas bumi sebesar 93 Mwe yang dapat



di kebutuhan energi listrik Kabupaten Sigi dan beberapa daerah di Kota Sigi, Sulawesi Tengah hingga dapat menjadi Solusi dari kebutuhan energi daerah Provinsi Sulawesi Tengah.

Sulawesi Tengah yang pada umumnya masih harus dipasok bahan bakar dari daerah lain, karena daerah Sulawesi Tengah tidak memiliki sumber energi fosil seperti minyak bumi, gas dan batu bara. Hal ini menimbulkan biaya tinggi dalam memenuhi kebutuhan energi. Dalam rangka memenuhi kebutuhan energi yang semakin meningkat melalui pemerintah daerah berupaya mencari sumber energi lain untuk memenuhi kebutuhan tersebut. (Bakrun, dkk., 2003).

Panas bumi Bora – Palu secara geologi berada di depresi Palu yang memanjang arah hampir utara-selatan. Pembentukan depresi ini berkaitan dengan aktivitas pergerakan sesar Palu Koro yang bergerak mengiri. Dari hasil pengukuran geodetik yang terpasang di kedua sisi blok yang bergerak diketahui bahwa sesar ini masih aktif dengan pergerakan mencapai 6,3 cm/tahun (PSDMBP, 2017).

Aktivitas tektonik diatas perlu analisis terhadap potensi bencana yang dapat diakibatkan, agar pengembangan energi panas bumi berjalan dengan baik. Gempa bumi dapat menghasilkan berbagai bencana alam yakni salah satunya likuifaksi pada daerah Sesar Palu Koro. Peristiwa likuifaksi saat gempa dapat ditandai dengan adanya pergerakan tanah dalam arah horizontal, rembesan air keluar dari rekahan tanah, bergesernya bangunan miring atau turun, penurunan muka tanah, longsornya tanggul dan lereng. Pada bangunan yang berada pada daerah terlikuifaksi dapat berakibat terjadinya amblas, miring atau bergerak ke samping atau bahkan mengakibatkan keruntuhan bangunan (Hakam dan Darjanto, 2013).



likuifaksi dapat dianalisis menggunakan metode mikrotremor yang getaran oleh aktivitas bumi ataupun aktivitas manusia, biasanya metode

ini digunakan untuk memperkirakan tingkat kerusakan yang timbul akibat gempa bumi dan juga dapat digunakan untuk mengetahui kondisi struktur bawah permukaan berdasarkan frekuensi dominannya dan faktor amplifikasinya. Dalam analisis mikrotremor spektrum komponen horizontal dibandingkan terhadap komponen vertikal atau dikenal dengan metode HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*). Parameter penting yang dihasilkan dari metode HVSR yaitu frekuensi dominan (f_0) dan faktor amplifikasi (A_0) (Arinalofa, dkk., 2020).

Menurut Warnana dkk. (2011) metode HVSR sangat cocok untuk menentukan nilai frekuensi natural dan amplifikasi yang dimiliki suatu daerah. Nilai tersebut akan menentukan nilai percepatan tanah maksimum dan ketebalan lapisan sedimen di daerah penelitian yang kemudian digunakan untuk menghitung nilai *ground shear strain* atau regang geser tanah. Nilai *ground shear strain* dapat digunakan untuk mengkarakterisasi dampak yang terjadi saat gempa bumi, seperti likuifaksi, tanah retak, penurunan tanah, tanah longsor dan bergetarnya tanah. Pada likuifaksi, selain nilai *ground shear strain* dapat juga menggunakan sebaran akuifer bawah permukaan sebagai salah satu faktor penyebab likuifaksi. Karena, pada sebuah kondisi tertentu akuifer dapat menjadi salah satu faktor yang mendukung terjadinya likuifaksi karena mendapat energi (gempa) sehingga dapat bergerak dan merubah sebuah struktur tanah.

Berdasarkan penjelasan di atas, perlu dilakukan penelitian untuk mengetahui



likuifaksi pada daerah panas bumi Bora ketika terjadinya gempa bumi vitas Sesar Palu Koro. Potensi likuifaksi diketahui dengan menganalisis

hasil *Ground Shear Strain* serta sebaran akuifer bawah permukaan sebagai data pendukung utama.

I.2. Rumusan Masalah

Adapun rumusan masalah dalam penelitian ini, sebagai berikut;

1. Bagaimana potensi likuifaksi di daerah panas bumi Bora dengan mikrozonasi *Ground Shear Strain* dan sebaran akuifer bawah permukaan?
2. Bagaimana pengaruh potensi likuifaksi terhadap status WKP (Wilayah Kerja Panas Bumi) Bora, Sulawesi Tengah?

I.3. Ruang Lingkup

Penelitian ini dibatasi pada daerah panas bumi Bora dengan koordinat $119^{\circ}56'18''E-119^{\circ}56'32''E$ dan $1^{\circ}3'5''S-1^{\circ}3'19''S$. Data penelitian yang digunakan berupa data primer mikrotremor dan data sekunder akuifer bawah permukaan. Pada penelitian ini menggunakan analisis hasil *Ground Shear Strain* (GSS) serta sebaran akuifer bawah permukaan. Keluaran dari penelitian ini berupa peta sebaran potensi likuifaksi terhadap pengembangan panas bumi Bora.

I.4. Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini, sebagai berikut:

1. Mengetahui potensi likuifaksi di daerah panas bumi Bora dengan mikrozonasi *Ground Shear Strain* dan sebaran akuifer bawah permukaan.
2. Mengetahui pengaruh potensi likuifaksi terhadap status WKP (Wilayah Kerja Panas Bumi) Bora, Sulawesi Tengah.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

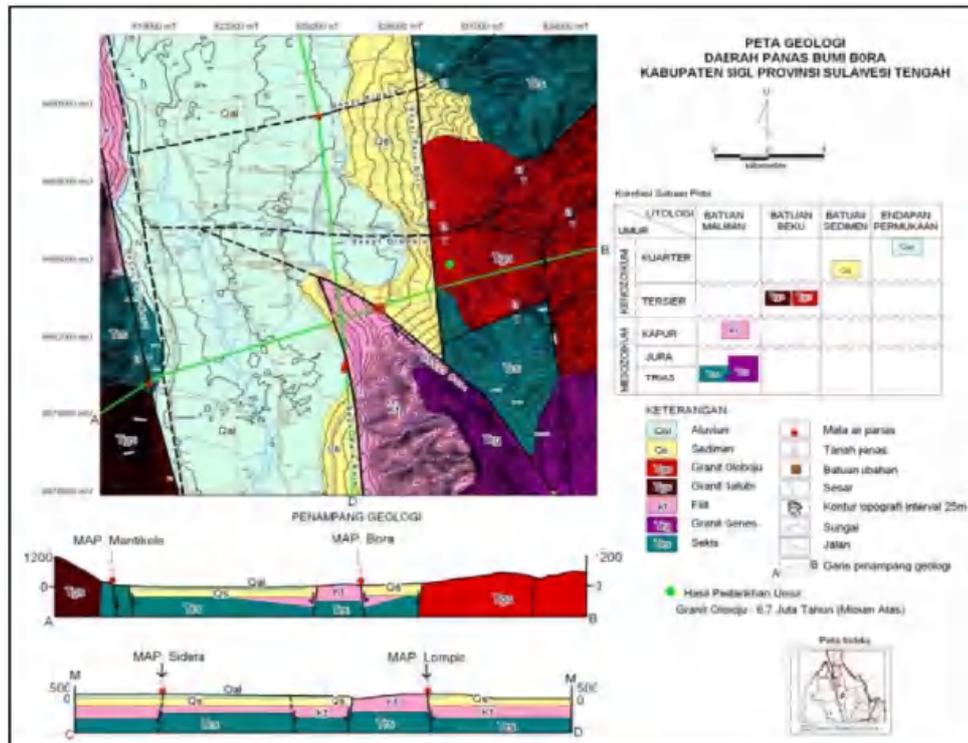
II.1. Geologi Regional

Secara umum geomorfologi daerah Panas bumi Bora dapat dikelompokkan menjadi tiga satuan geomorfologi, yaitu: satuan perbukitan terjal, perbukitan bergelombang, dan satuan pedataran. Litologi penyusun daerah Bora terdiri dari batuan sedimen, beku intrusi dan metamorf berumur Pra-Tersier hingga Resen, terbagi menjadi tujuh satuan batuan (Simanjuntak, dkk., 1991). Pada Gambar 2.1 menunjukkan susunan stratigrafi batuan dari mulai yang tertua hingga termuda terdiri dari adalah satuan Sekis (Trs), Granit Geneis (Trg), Filit (Kf), Granit Salubi (Tgs), Granit Oloboju (Tgo), Sedimen (Qs), dan Aluvium (Qal).

Satuan batuan Sekis Hijau (Trs)

Satuan batuan Sekis hijau (metamorf) merupakan satuan batuan tertua sebagai *basement* yang berumur Trias (TrS). Batuan Sekis hijau ini tersingkap pada penorehan struktur sesar dijumpai pada bagian tebing sungai Binangga hingga ke bagian selatan di daerah Desa Pakuli dan Desa Simoro. Satuan ini tersingkap sebagai Sekis hijau, berwarna hijau tua, berlapis sebagai bidang foliasi, kompak, berbutir halus, lanau sampai lempung dan setempat rekahan terisi oleh urat-urat kwarsa maupun kalsit. Berdasarkan referensi, umur satuan Sekis setara dengan Formasi Wana berumur Trias (Simanjuntak, dkk., 1991).





Gambar 2. 1 Peta Geologi Daerah Panas Bumi Bora Kabupaten Sigi Provinsi Sulawesi Tengah (Wibowo, dkk., 2011)

Satuan Granit Geneis (Trgn)

Batuan granit geneis ini diperkirakan merupakan bagian dari tubuh instruksi granitoid regional yang berumur Trias (Trgn). Sebagian dari granit ini terlihat telah berubah menjadi batuan metamorf akibat proses tektonik regional yang telah berlangsung berulang kali di daerah ini. Kondisi batuanannya kompak, berwarna abu-abu tua berbintik-bintik hitam, kehijauan, bertekstur porpiritik sampai phaneritik tersebar disebelah timur Desa Pandere, Sibalaya yang membentuk jalur perbukitan yang memanjang hingga ke utara di luar daerah penyelidikan. Satuan

ini masih memperlihatkan rekahan-rekahan, kekar kolom, yang diisi mineral baru seperti kwarsa, kalsit dan juga mineral pirit. Satuan ini terdiri dari plagiokals, kwarsa, orthoklas, mika dan mineral opak.



Satuan Batuan Sabak-Filit (Km)

Satuan batuan filit, batu sabak, dan batu tanduk yang tersingkap di selatan baratdaya daerah penyelidikan yang mencirikan adanya perlapisan dan kontak dengan batuan granit di bagian utara yang merupakan tipe khas satuan batuan formasi Latimojong berumur Kapur Atas. Kondisi batuan ini agak lapuk, berbutir halus sekali, berwarna abu-abu kecoklatan, berlapis baik, retas. Komposisinya mineral lempung, mika-biotit dan mineral opak.

Satuan Batuan Granit (Tgr)

Satuan batuan granit ini mempunyai penyebaran paling luas. Granit ini masih kompak dan pada bagian permukaan mulai lapuk, berwarna putih-kelabu berbintik-bintik hitam, dengan komposisi mineral terdiri kwarsa, plagioklas, orthoklas, serta mineral gelap lainnya, bertekstur porfiritik-phaneritik dengan bentuknya euhedral-subhedral. Satuan granit (batholith) mengintrusi batuan yang telah ada seperti batuan metamorf yang merupakan instruksi besar secara regional yang berumur Miosen. Pada tubuh batuan granit ini terlihat adanya instruksi kecil-kecil berupa apilit atau rhyolite, yang tebalnya 2 – 50 cm. Seluruh puncak-puncak gunung yang tinggi sampai yang terendah dibangun oleh tubuh instruksi batuan granit ini berumur Miosen tengah – akhir.

Satuan Coluvial (Qcl)

Satuan ini terdiri dari konglomerat, batu pasir, setempat-setempat berselingan atau lempung karbonatan dan terlihat jelas dengan baik. Penyebarannya as diperkirakan menempati sekitar 15% yang membentuk bukit-bukit



rendah serta daratan. Konglomerat berwarna coklat kemerahan hingga kekuningan, terdiri dari kepingan granit, diorite, andesit dan bauan malihan, berukuran pasir hingga kerakal, terpilah buruk dengan masa dasar pasir. Dari referensi menyebutkan bahwa satuan ini dikelompokkan ke dalam formasi Pakuli berumur Pleistosen Akhir. Pada umumnya Satuan Coluvial ini masih *unconsolidated* (kurang padat). Bagian barat dicirikan dengan batuan malihan, berupa filit, batu sabak dan batu tanduk yang mendominasinya. Sedangkan pada bagian timur ditempati oleh batuan granit dan sekis.

Aluvial (Qa)

Satuan Aluvium dijumpai daerah dataran rendah di bagian tengah daerah penyelidikan yaitu sepanjang aliran sungai besar Palu dan cabang-cabang yang alirannya menyatu dengan sungai besar. Satuan ini berasal dari hasil rombakan berbagai macam jenis batuan dari tua sampai termuda, baik itu batuan beku, sedimen maupun metamorf, kemudian terendapkan di daerah rendah seperti di sepanjang aliran sungai, lembah-lembah pegunungan berupa lumpur, pasir, kerikil, kerakal dan bongkah yang belum padu, berukuran sangat halus sampai terkasar (lempung-bongkah). Daerah alluvial ini secara umum telah menjadi areal persawahan masyarakat setempat (Bakrun, dkk., 2003).

Batuan tertua yang ada di daerah penyelidikan adalah batuan malihan yang terdiri dari sekis dan granit genes berumur Trias-Jura yang telah mengalami pemalihan

ali. Dua satuan ini tertindih tidak selaras oleh batuan malihan (filit) Kapur Akhir. Pada Kala Miosen-Pliosen terjadi terobosan batuan beku



yang membentuk batuan beku yang membentuk satuan granit Slaubi dan granit Oloboju. Satuan ini diperkirakan merupakan tubuh batolit besar yang menerobos satuan lain yang lebih tua. Dari hasil pentarikan umur (*dating*) menunjukkan bahwa umur satuan ini adalah $6,7 \pm 0,2$ juta tahun atau pada Kala Miosen Atas. Pada Kala Plistosen terjadi pengendapan batuan sedimen yang mengisi zona depresi di bagian tengah daerah penyelidikan. Batuan sedimen ini kemudian sebagian ditutupi oleh endapan permukaan berupa alluvium yang proses pengendapannya masih berlangsung hingga sekarang.

Pola umum tektonik yang terbentuk di daerah penyelidikan terdiri dari struktur sesar-sesar normal, sesar obliq, dan sesar mendatar yang umumnya berarah relatif utara-selatan dan barat-timur. Terdapat 4 sturktur sesar yang berkembang di daerah penyelidikan yaitu Sesar Palu-Koro berarah utara-selatan, Sesar Sidera berarah barat-timur, Sesar Oloboju berarah barat-timur, dan Sesar bora berarah baratlaut-tenggara. Struktur sesar Palu-Koro diperkirakan mengontrol pemunculan mata air panas Mantikole dan Lompio, sesar Sidera mengontrol pemunculan mata air panas Sidera dan Sesar Bora yang mengontrol pemunculan mata air panas Bora. Batuan ubahan (*alterasi*) ditemukan di sekitar manifestasi tanah panas Bora. Hasil analisis dan interpretasi PIMA menunjukkan batuan telah mengalami ubahan hidrotermal menjadi kelomok alunit dan mineral lempung (*montmorilonit*) serta hallosyit sehingga dapat dikelompokkan ke dalam tipe ubahan *argillic-argillic*. Diperkirakan bahwa batuan ubahan berada pada lingkungan dan fli fluida bersifat asam dengan temperature rendah sampai tinggi (50°C - Wibowo, dkk, 2011).



II.2. Gelombang Seismik

Gelombang seismik adalah gelombang yang merambat didalam atau diluar permukaan bumi yang berasal dari sumber seismic, seperti gempa, ledakan, erupsi gunung api, longsor, badai, dentuman pesawat supersonik (Afnimar, 2009). Penjalaran energi gelombang seismik disebabkan karena adanya gangguan pada kerak bumi, misalnya adanya patahan atau adanya ledakan. Energi ini akan merambat ke seluruh bagian bumi dan dapat terekam oleh seismometer. Akibat yang ditimbulkan oleh adanya gelombang seismik dari gangguan alami, pergerakan lempeng (tektonik), bergeraknya patahan, aktivitas gunung api (vulkanik), dan sebagainya adalah apa yang kita kenal sebagai fenomena gempa bumi.

Gelombang seismik disebut juga gelombang elastik yang membawa energi kemudian menjalar ke segala arah di seluruh bagian bumi. Disebut gelombang elastik karena osilasi partikel-partikel medium terjadi akibat dari interaksi antara gradien stress melawan gaya-gaya elastik. Gelombang seismik dibedakan menjadi dua jenis, yaitu gelombang badan (*body wave*) dan gelombang permukaan (*surface wave*). Gelombang badan adalah gelombang yang menjalar dalam media elastik dan arah perambatannya ke seluruh bagian di dalam bumi. Berdasarkan gerak partikel pada media dan arah penjarannya, gelombang ini dapat dibedakan menjadi gelombang P dan gelombang S (Arinalofa dkk., 2020).



1) Gelombang Primer (P)

gelombang P merupakan gelombang longitudinal, karena simpangannya sejajar dengan arah penjarannya. Gelombang P dapat melewati semua

medium dengan arah getarnya ke depan dan ke belakang sehingga materi yang dilaluinya mengalami tekanan dan peregangan. Gelombang P dapat menjalar pada semua medium baik padat, cair, maupun gas. Kecepatan penjalaran gelombang P yang dituliskan sebagai berikut (Haerudin dkk., 2019):

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

dengan V_p merupakan kecepatan gelombang P (m/s), κ merupakan modulus Bulk (Pa), μ merupakan rigiditas atau modulus geser (N/m²), dan ρ merupakan densitas (kg/m³).

2) Gelombang Sekunder (S)

Gelombang S atau gelombang transversal (shear wave) adalah salah satu gelombang badan (body wave) yang memiliki simpangan tegak lurus terhadap arah rambatnya. Kecepatan penjalaran gelombang S yang dituliskan sebagai berikut (Haeruddin dkk., 2019):

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

Gelombang ini waktu tibanya setelah gelombang P, sehingga gelombang tercatat setelah gelombang P pada seismograph. Gelombang ini hanya merambat pada medium padat dan tidak dapat merambat pada fluida sehingga pada inti bumi bagian luar tidak dapat terdeteksi sedangkan pada ti bagian dalam mampu dilewati.



II.3. Gempabumi

Gempa bumi adalah getaran bumi yang dihasilkan oleh percepatan energi yang dilepaskan, energi ini menyebar ke segala arah dari pusat sumbernya. Gempa bumi dapat disebabkan oleh beberapa hal yaitu jatuhnya meteor, aktivitas vulkanik (gempa vulkanik), longsor, runtuh-timbunan batuan di pertambangan, ledakan nuklir bawah tanah, pergerakan lempeng tektonik (gempa tektonik) dan lain-lain. Gempa tektonik adalah gempa yang perlu mendapat perhatian lebih karena mempunyai dampak destruktif yang besar, terlebih pada aktivitas pengembangan energi yang menggunakan sumber dari adanya pertemuan lempeng (Boen, 1985).

Energi yang dimaksud berupa pelepasan tegangan (*stress*) secara tiba-tiba dari dalam permukaan bumi. Energi tersebut bergerak secara tidak tetap (*transient*), kemudian akan menyebar ke segala arah hingga merambat ke permukaan bumi, yang diikuti oleh bencana-bencana pengikut gempabumi lainnya, contohnya likuifaksi pada gempabumi Palu 2019. Penyebab gempabumi seperti ini termasuk ke dalam gempabumi tektonik, dimana terjadi pergerakan lempeng bumi yang saling bertabrakan (konvergen), saling berjauhan (divergen), dan bersinggungan (*transform*). Gempabumi tektonik terjadi bila adanya penekanan pada batas-batas pertemuan lempeng, sehingga lempeng saling bertumbukan. Pertemuan lempeng dapat terjadi antara lempeng benua–lempeng benua, lempeng samudera – lempeng samudera, dan lempeng benua–lempeng samudera atau hal tersebut sering disebut zona subduksi (Simanjuntak dan Olymphina, 2017).



Secara geografis Indonesia terletak di daerah katulistiwa dengan morfologi yang beragam dari daratan sampai pegunungan tinggi. Keragaman morfologi ini banyak dipengaruhi oleh faktor geologi terutama dengan adanya aktivitas pergerakan lempeng tektonik aktif di sekitar perairan Indonesia diantaranya adalah lempeng Eurasia, Australia dan lempeng Dasar Samudera Pasifik. Pergerakan lempeng-lempeng tektonik tersebut menyebabkan terbentuknya jalur gempa bumi, rangkaian gunung api aktif serta patahan-patahan yang dapat berpotensi menjadi sumber gempa. Sejumlah peristiwa bencana gempa bumi dengan magnitudo besar akhir-akhir ini sering terjadi di beberapa wilayah Indonesia (Rais dan Somantri, 2021).

II.4. Mikrozonasi

II.4.1. *Horizontal to Vertical Spectral Ratio (HVSr)*

Analisis dengan HVSr dikenalkan oleh Nogoshi dan Igarashi (1971) yang selanjutnya dikembangkan oleh Nakamura (1989). Konsep dasar metode HVSr adalah adanya kesamaan antara rasio spektra horizontal ke vertikal dengan transfer gelombang dari batuan dasar ke permukaan (Nakamura, 1989). Parameter penting yang dihasilkan dari metode HVSr ialah frekuensi dominan dan amplifikasi tanah yang merupakan nilai puncak kurva HVSr, berkaitan dengan geologi setempat dan parameter fisik bawah permukaan (Sungkono dan Santosa, 2011). Frekuensi dominan adalah nilai frekuensi yang kerap muncul sehingga



sebagai nilai frekuensi dari suatu lapisan batuan yang tersusun di suatu
ngan kata lain frekuensi dominan dapat menunjukkan jenis dan
stik batuan di satu area. Amplifikasi merupakan perbesaran gelombang

seismik yang terjadi akibat adanya perbedaan yang signifikan antar lapisan, dengan kata lain gelombang seismik akan mengalami perbesaran jika merambat pada suatu medium yang lebih lunak dibandingkan medium awal yang dilaluinya. Nakamura (1989) menghitung rasio antara spektrum horizontal dan vertikal ($\frac{H}{V}(f)$) pada getaran *ambient* yang direkam dengan sensor seismik stasiun tunggal tiga komponen, dari setiap komponen merupakan sinyal dalam domain waktu, untuk itu dilakukan transformasi Fourier untuk mengubah sinyal dari domain waktu ke domain frekuensi. Proses transformasi Fourier dalam survey mikrotremor adalah mengubah gelombang seismik yang berdomain waktu menjadi domain frekuensi. Transformasi Fourier ini merupakan metode untuk mendekomposisi suatu gelombang seismik menjadi beberapa gelombang harmonik sinusoidal dengan frekuensi yang berbeda-beda. Sejumlah gelombang sinusoidal tersebut disebut sebagai Deret Fourier. Persamaan transformasi Fourier dalam kasus ini ditunjukkan pada persamaan 2.4 berdasarkan 2.3 sebagai berikut (Park, 2010):

$$\begin{aligned}
 X(f) &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-j2\pi ft} dt \\
 &= \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\cos(2\pi ft)dt - j \int_{-\infty}^{\infty} x(t)\sin(2\pi ft)dt \quad (2.3)
 \end{aligned}$$

dengan:

$X(f)$ = fungsi dalam domain frekuensi

$e^{-j2\pi ft}$ = fungsi Kernel



fungsi dalam domain waktu

frekuensi

in 2.3 tersebut yang digunakan untuk mengubah sinyal dari domain

waktu menjadi domain frekuensi. Setelah itu, persamaan tersebut didekati dengan persamaan yang ditunjukkan oleh 2.4 berikut, dengan m dan n adalah bilangan bulat.

$$\begin{aligned} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \cos(2\pi ft) dt &\rightarrow \sum_n x(n\Delta t) \cos(2\pi fn\Delta t) \Delta t \\ &= \sum_n x(n\Delta t) \cos(2\pi nm\Delta t \Delta f) \Delta t \\ &= \sum_n x(n\Delta t) \cos\left(2\pi \frac{nm}{N}\right) \Delta t \end{aligned} \quad (2.4)$$

Dalam domain waktu, periode suatu sinyal dinyatakan sebagai $T = N\Delta t$, sedangkan pada domain frekuensi $\Delta f = \frac{f_s}{N}$ dengan Δf menyatakan interval antar frekuensi dan $f_s = \frac{1}{\Delta t} = N\Delta f$. Dengan demikian, pada persamaan 2.4 $\Delta t \Delta f = \frac{1}{N}$, yang merupakan penghubung antara domain waktu dan domain frekuensi. Proses yang digunakan dalam penelitian ini yaitu FFT (*Fast Fourier Transform*). Prinsip kerja dari FFT adalah membagi sinyal hasil penyamplingan menjadi beberapa bagian yang kemudian masing-masing bagian diselesaikan dengan algoritma yang sama dan hasilnya dikumpulkan Kembali (Riyanto, dkk, 2009).

$$\frac{H}{V}(f) = \frac{\sqrt{|E(f)|^2 + |N(f)|^2}}{\sqrt{2}|Z(f)|^2} \quad (2.5)$$

dimana:

$\frac{H}{V}(f)$ = nilai perbandingan spektrum komponen horizontal dan komponen vertikal

$E(f)$ = nilai amplitudo spektrum komponen timur-barat

nilai amplitudo spektrum komponen utara-selatan

nilai amplitudo spektrum komponen vertikal



dengan $E(f)$ adalah spektrum pada horizontal *East-West*, $N(f)$ adalah spektrum pada *North-south*, dan $Z(f)$ adalah spektrum vertikal. Hasil yang diperoleh dari metode HVSR adalah kurva HVSR, dari kurva ini diperoleh parameter-parameter HVSR yaitu frekuensi dominan dan amplifikasi.

Tabel 2. 1 Klasifikasi Nilai Frekuensi Dominan dan Periode Dominan oleh Kanai (BMKG,1998)

Klasifikasi Tanah	Frekuensi Dominan (Hz)	Periode Dominan (Hz)	Klasifikasi	Deskripsi
Jenis I	10-20	0,05-0,15	Batuan tersier atau lebih tua. Terdiri dari batuan <i>Hard sandy gravel</i> , dll	Ketebalan sedimen permukaannya sangat tipis, didominasi oleh batuan keras
Jenis II	4-10	0,10-0,25	Batuan alluvial, dengan ketebalan 5 m. Terdiri dari dari <i>sandy-gravel</i> , <i>sandy hard clay</i> , <i>loam</i> , dll	Ketebalan sedimen permukaannya masuk dalam kategori menengah 5-10 meter
Jenis III	2,5-4	0,25-0,40	Batuan alluvial, dengan ketebalan >5m. Terdiri dari dari <i>sandy-gravel</i> , <i>sandy hard clay</i> , <i>loam</i> , dll	Ketebalan sedimen permukaan masuk dalam kategori tebal, sekitar 10-30 meter
Jenis IV	<2,5	>0,40	Batuan alluvial, yang terbentuk dari sedimentasi delta, top soil, lumpur,dll	Ketebalan sedimen permukaannya sangatlah tebal dengan kedalaman 30 meter atau lebih



Menurut Nakamura (2000), amplifikasi dapat terjadi akibat dari adanya perbesaran gelombang seismik karena perbedaan yang mencolok antar lapisan. Artinya gelombang seismik akan mengalami perbesaran jika melalui medium yang lebih lunak dari pada medium awal yang dilaluinya. Jika semakin besar perbedaan itu maka perbesaran gelombang juga semakin besar pula. Nilai penguatan amplifikasi tanah berkaitan dengan kontras impedansi lapisan dipermukaan dan lapisan dibawahnya. Apabila kontras impedansi kedua lapisan tersebut tinggi maka terjadi faktor penguatan yang tinggi pula, begitupun sebaliknya. Sehingga dikaitkan antara fungsi perbandingan kontras impedansi sebagai berikut:

$$A_0 = \frac{\rho_b V_b}{\rho_s V_s} \quad (2.6)$$

Di mana untuk A_0 adalah faktor amplifikasi, ρ_b adalah densitas batuan dasar (m/s), V_b adalah kecepatan rambat gelombang batuan dasar (m/s), ρ_s adalah Densitas batuan lunak (m/s), V_s adalah kecepatan rambat gelombang batuan lunak (m/s). Jika densitas basement dan lapisan permukaan sama, Nakamura (2000) merumuskan faktor amplifikasi sebagai berikut:

$$A_0 = V_b/V_s \quad (2.7)$$

dimana A_0 faktor amplifikasi, V_b kecepatan gelombang geser pada batuan dasar (basement), dan V_s kecepatan gelombang geser pada lapisan sedimen. Klasifikasi

lifikasi tanah bisa dilihat pada Tabel 2.2.



Tabel 2. 2 Klasifikasi Nilai Amplifikasi (Sitorus dkk, 2017)

Zona	Klasifikasi	Nilai Faktor Amplikasi
1	Rendah	$A_0 < 3$
2	Sedang	$3 \leq A_0 < 6$
3	Tinggi	$6 \leq A_0 < 9$
4	Sangat Tinggi	$A_0 \geq 9$

Salah satu parameter yang dinilai dalam pengukuran mikroseismik pada mikrozonasi gempa adalah indeks kerentanan tanah (K_g). Nakamura (1989) menyatakan, Indeks Kerentanan tanah (K_g) suatu wilayah mengidentifikasi tingkat kerentanan suatu lapisan tanah yang mengalami deformasi akibat gempa bumi. Nilai indeks kerentanan tanah (K_g) dapat dicari dengan persamaan:

$$K_g = \frac{A_0^2}{f_0} \quad (2.8)$$

dengan A_0 adalah amplifikasi dan f_0 adalah frekuensi dominan. Nilai K_g yang tinggi umumnya ditemukan pada tanah dengan litologi batuan sedimen yang lunak. Nilai yang tinggi tersebut mendeskripsikan bahwa daerah tersebut rentan terhadap gempa. Sebaliknya, nilai K_g yang kecil umumnya ditemukan pada tanah dengan batuan penyusun yang kuat dan stabil sehingga saat terjadi gempa, daerah tersebut hanya mengalami guncangan yang kecil. Klasifikasi nilai K_g dapat dilihat pada Tabel 2.3

Tabel 2. 3 Klasifikasi Nilai Indeks Kerentanan Tanah (K_g) (Akkaya, 2020)

Zona	Klasifikasi	Nilai Indeks Kerentanan Tanah
1	Rendah	$K_g \leq 3$
2	Sedang	$3 < K_g \leq 5$
3	Tinggi	$5 < K_g \leq 10$
4	Sangat Tinggi	$K_g \geq 10$



II.4.2. *Peak Ground Acceleration (PGA)*

Peak Ground Acceleration (PGA) Percepatan gelombang seismik atau biasa disebut percepatan tanah adalah salah satu parameter yang penting dalam seismologi teknik. Faktor sumber kerusakan dinyatakan dalam parameter percepatan tanah, sehingga untuk menggambarkan tingkat risiko gempa bumi di suatu lokasi tertentu diperlukan adanya data PGA akibat getaran gempa bumi. Besar risiko gempa bumi yang mungkin terjadi disebabkan semakin besar nilai PGA yang pernah terjadi di suatu tempat. Nilai percepatan tanah maksimum merupakan percepatan tanah yang diperhitungkan pada perencanaan bangunan. Terdapat dua jenis nilai percepatan tanah yaitu percepatan tanah sesaat dan percepatan tanah maksimum. Percepatan tanah maksimum merupakan nilai yang dihitung pada titik amat atau titik penelitian di permukaan bumi dari sejarah gempa bumi dengan dipilih nilai yang terbesar pada perhitungan, sedangkan untuk nilai percepatan tanah sesaat adalah nilai percepatan tanah pada saat terjadinya gempa bumi. Percepatan tanah max berbanding terbalik dengan periode getaran tanah dan berbanding lurus dengan amplitudo getaran tanah di permukaan bumi (Haerudin, dkk., 2019).

Ketika nilai periode getaran seismik (T) dan periode natural tanah (T_0) sama maka akan terjadi resonansi, sehingga percepatan tanah akan mengalami penguatan yang disebut dengan percepatan tanah maksimum (Ozaki, 1977). Berdasarkan hal



Kanai (1966) memformulasikan persamaan empiris percepatan tanah m dalam Douglas (2011) yang dirumuskan sebagai berikut.

$$a_{max} = G(T)a_0 \quad (2.9)$$

$$a_0 = \frac{1}{T} 10^{(0,61M) - (1,66 + \frac{3,6}{R}) \log R + (0,167 - \frac{1,83}{R})} \quad (2.10)$$

$$G(T) = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \left(\frac{T}{T_0}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{0,2T}{T_0}\right)^2}} \quad (2.11)$$

dengan a_0 merupakan percepatan tanah (gal), a_{max} merupakan percepatan tanah maksimum titik pengamatan (gal), T_0 merupakan periode predominan titik pengamatan (s), M merupakan magnitudo gempa (Skala Richter), R merupakan jarak hiposenter (km), $G(T)$ merupakan faktor perbesaran.

Persamaan yang dapat digunakan untuk menghitung nilai PGA yaitu persamaan empiris oleh Fukushima dan Tanaka (1990):

$$\log a_{\ddot{x}} = 0.41Ms + \log(R + 0.032 \times 100.41Ms) - 0.0034R + 1.30 \quad (2.12)$$

dimana $a_{\ddot{x}}$ adalah PGA (gal), Ms adalah magnitudo gelombang permukaan (SR) dan R adalah jarak hiposenter ke titik pengukuran. Untuk menghitung nilai R sendiri digunakan teorema Pythagoras:

$$R = \sqrt{\Delta^2 + h^2} \quad (2.13)$$

dengan Δ adalah jarak episenter ke titik pengukuran dan h adalah hiposenter. Klasifikasi tingkat resiko bahaya gempa bumi berdasarkan nilai PGA dapat dilihat pada Tabel 2.4



4 Klasifikasi Tingkat Resiko Bahaya Gempa Bumi (Fauzi, 2001)

Tingkat Resiko	Nilai PGA (gal)
Sangat Kecil	0 – 25

Kecil	25 – 50
Sedang	50 – 125
Besar	125 – 300
Sangat Besar	> 300

II.4.3. *Ground Shear Strain (GSS)*

Menurut Nakamura (1997), *Ground Shear Strain (GSS)* atau kerentanan geser tanah dapat mempresentasikan kemampuan material lapisan tanah untuk bergeser ketika terjadi gempa bumi. Nilai dari *shear strain* dapat dihitung melalui persamaan Nakamura (2000) dengan pendekatan empiris, yaitu dengan melakukan perkalian antara indeks kerentanan tanah berdasarkan data mikrotremor dengan percepatan maksimum di batuan dasar, sebagai berikut:

$$\gamma = K_g \times (10^{-6}) a_{\text{max}} \quad (2.14)$$

γ merupakan nilai dari *ground shear strain*, K_g merupakan indeks kerentanan tanah, 10^{-6} adalah ketetapan nilai *strain* pada satuan 10^{-6} di lapisan tanah permukaan, dan a_{max} adalah percepatan gelombang seismik di batuan dasar (PGA).

Ground Shear Strain (GSS) pada lapisan tanah permukaan menggambarkan kemampuan material lapisan tanah untuk meregang atau bergeser saat terjadi gempa bumi. Semakin besar nilai GSS akan menyebabkan lapisan tanah mengalami deformasi, seperti likuifaksi, rekahan tanah, longsor, dan gerakan tanah lainnya. Untuk mencari nilai GSS di permukaan tanah, dapat pula menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\gamma = A_0 \frac{\delta}{h} \quad (2.15)$$



A_0 merupakan amplifikasi, δ merupakan deformasi lapisan permukaan tanah akibat gempa, dan h merupakan ketebalan lapisan sedimen. Nilai dari deformasi lapisan permukaan tanah (δ) dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut:

$$\delta = \left(\frac{a}{((2\pi f_0)^2)} \right) \quad (2.16)$$

Jika disubstitusikan persamaan (2.16) ke persamaan (2.15) akan menghasilkan persamaan (2.17) sebagai berikut:

$$\gamma = \frac{A_0}{h} \left(\frac{a}{((2\pi f_0)^2)} \right) \quad (2.17)$$

Hasil dari perhitungan nilai GSS diharapkan dapat menghasilkan nilai maksimum, oleh karenanya percepatan tanah yang digunakan juga bernilai maksimum. Sehingga, akan menjadi seperti pada persamaan berikut:

$$\gamma = \frac{A_0}{h} \left(\frac{a_{max}}{((2\pi f_0)^2)} \right) \quad (2.18)$$

$$\gamma = \frac{A_0}{h} \frac{a_{max}}{4\pi^2 f_0^2} \quad (2.19)$$

Pada umumnya, permukaan tanah memiliki nilai GSS lebih dari 10^{-3} akan mengalami deformasi non-linear, sedangkan untuk nilai GSS lebih dari 10^{-2} lapisan tanah akan mengalami deformasi runtuh (Nakamura, 1997). Nilai yang dihasilkan GSS menjelaskan fenomena-fenomena yang terjadi, seperti pada Tabel 2.5 yang menunjukkan fenomena tanah berdasarkan nilai regangan gesernya.



Tabel 2. 5 Ukuran Regangan dan Sifat Dinamika Tanah (Nakamura, 1997)

Nilai Regangan Geser	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}
Fenomena	Gelombang, getaran		Rekahan, penurunan tanah		Longsor, tanah kompaksi, likuifaksi	
Sifat Dinamis	Elastis		Elasto-plastis		Runtuhan	

II.5. Likuifaksi

Pencairan tanah atau likuifaksi merupakan fenomena dimana pasir dan lanau jenuh kehilangan kekuatannya akibat guncangan secara intens. Pemicu likuifaksi yang terjadi di Sulawesi Tengah salah satunya adalah gempa bumi akibat aktivitas sesar Palu-Koro hasil deformasi dengan pergerakan struktur sesar yang mendatar (*strike-slip*). Sesar Palu-Koro adalah sesar aktif utama di Pulau Sulawesi, pergerakan sesar Palu Koro merupakan pergerakan sesar terbesar kedua di Indonesia setelah sesar Yapen, Papua Barat. Menurut penelitian Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia (LIPI), sesar Palu-Koro mengalami pergeseran membelah Pulau Sulawesi dengan kecepatan sekitar 30 hingga 40 milimeter pertahunnya. Pergerakan likuifaksi mengikuti jalur sesar dengan pergerakan mengiri (sinistral) (Anidhea dan Suliyanah, 2021).

Likuifaksi tanah (*soil liquefaction*) atau juga disebut likuifaksi gempa bumi (*earthquake liquefaction*) didefinisikan sebagai keruntuhan tanah (*soil failure*)



langan kekuatan (*loss of strength*) dalam hal ini kuat geser tanah tersebut menyebabkan tanah yang tadinya padat berperilaku sementara sebagai cairan (*viscous fluid*). Fenomena ini terjadi umumnya pada tanah lepas

(*unconsolidated*) yang jenuh air akibat terkena gelombang seismik S (gelombang sekunder), yang menyebabkan vibrasi/getaran tanah selama gempa bumi (perhimpunan ahli tanah, 2019). Secara geologis, pulau Sulawesi terbentuk dari proses tektonik yang cukup rumit. Pulau Sulawesi merupakan perpaduan dua rangkaian orogen, yakni busur kepulauan Asia Timur dengan pegunungan Sunda. Hal inilah yang menyebabkan hampir seluruh bagian pulau Sulawesi terdiri dari pegunungan sekaligus menjadi daerah paling berpegunungan di antara pulau lain yang ada di Indonesia (Boen, 1985).

Pada fenomena likuifaksi beberapa daerah di Sulawesi Tengah, tanah yang semula padat berubah menjadi fluida dengan pergerakan mengalir sehingga tanah tidak mampu menopang beban yang berada di atasnya dan menyebabkan amblesnya bangunan-bangunan, hingga dalam posisi miring ataupun longsor (Muntohar, 2012). Selama kurun waktu 20 tahun, beberapa kejadian likuifaksi telah terjadi pada wilayah Indonesia diantaranya likuifaksi yang terjadi akibat gempa bumi di Aceh pada tahun 2004 (MW 9,1), gempa bumi yang terjadi di Nias pada tahun 2005 (MW 8,7). Selain itu, likuifaksi juga terjadi akibat gempa bumi di wilayah Bantul pada tahun 2006 (MW 6,3), pada gempa bumi di Bengkulu tahun 2007 (MW 8,4), pada gempa bumi kota Padang tahun 2009 (MW 7,6), dan likuifaksi yang terjadi di Palu akibat gempa bumi pada tahun 2018 (MW 7,4) yang menyebabkan korban jiwa dan kerugian ekonomi yang besar.



yang begitu besar akibat likuifaksi mengharuskan adanya analisis potensi pada wilayah yang mempunyai faktor-faktor penyebab likuifaksi.

Menganalisis potensi terjadinya likuifaksi diasumsikan selama berlangsungnya getaran gempa belum terjadi disipasi yang berarti di lapisan tanah, dengan kata lain belum terjadi redistribusi tekanan air pori pada massa tanah. Akibat beban siklik (beban gempa), tanah mengalami tekanan sebelum proses disipasi terjadi sehingga itu mengakibatkan tekanan air pori meningkat. muka air tanah sangat menentukan potensi terjadinya likuifaksi (Tijow, dkk., 2018)

II.6. Sebaran Akuifer

Akuifer merupakan tubuh batuan atau regolith tempat air tanah berada. Aliran air tanah sering kali melewati suatu lapisan akuifer yang di atasnya memiliki lapisan penutup yang bersifat kedap air (*impermeable*). Sedangkan, air tanah adalah air yang berada dan bergerak dalam tanah. Air yang terdapat dalam ruang antara butir-butir tanah disebut air lapisan dan air yang di celah-celah tanah atau dalam retakan disebut dengan air celah (Wahyuni, dkk., 2018).

Berdasarkan litologi, akuifer dapat dibagi beberapa macam, yakni akuifer bebas, akuifer setengah bebas, akuifer setengah tertekan, dan akuifer tertekan. Akuifer bebas (*unconfined aquifer*), adalah lapisan lolos air yang hanya Sebagian terisi oleh air dan berada diatas lapisan kedap air. Akuifer setengah bebas (*semi unconfined aquifer*), adalah peralihan antara akuifer setengah tertekan dengan akuifer bebas. Akuifer setengah tertekan (*semi confined aquifer*), adalah akuifer yang lapisan di atas atau di bawahnya masih mampu meloloskan air meskipun



sempit, akuifer tertekan (*confined aquifer*) adalah akuifer yang lapisan atasnya dibatasi oleh lapisan yang kedap air (Riskawati dan Abdullah, 2021).

Kondisi tertentu akuifer dapat menjadi salah satu faktor yang mendukung terjadinya likuifaksi karena mendapat energi (gempa) sehingga dapat bergerak dan merubah sebuah struktur tanah. Menurut Towhata (2008), likuifaksi dapat terjadi pada tanah yang berpasir lepas dan jenuh air, seiring dengan adanya kenaikan tekanan air pori saat terjadinya gempa bumi maka tekanan efektifnya akan berkurang seiring waktu. Kedudukan muka air tanah akan mengontrol potensi terjadinya likuifaksi. Likuifaksi umumnya terjadi pada daerah yang memiliki muka air tanah dangkal. Menurut Youd dkk. (1979), potensi likuifaksi dapat terjadi pada wilayah yang memiliki kedalaman muka air tanah hingga 15,2 m dengan tingkat kerentanan terhadap likuifaksi yang bervariasi. Kerentanan likuifaksi akan menurun dengan bertambahnya kedalaman muka air tanah.

Pengaruh akuifer terhadap likuifaksi dapat divalidasi dengan kasus likuifaksi pada daerah Sulawesi tengah yakni Petobo dan Balaroa pada tanggal 28 september 2018. Beberapa penelitian telah dilakukan dan publikasi telah diterbitkan baik dari dalam dan luar negeri, diantaranya oleh Bradley, et al. (2019) dan Watkinson & Hall (2019) yang keduanya menyatakan, bahwa likufaksi-longsor di Palu sangat terkait dengan sistem saluran dan irigasi yang ada di lokasi. Namun Watkinson & Hall (2019) tidak sepakat dengan Bradley, et al. (2019) dalam hal mekanisme likuifaksi-longsor di Balaroa, tetapi sepakat, bahwa airtanah dangkal merupakan faktor kunci dalam likuifaksi-longsor (Eko, dkk., 2019).



topografi Palu yang berupa lembah yang dibatasi oleh dua tinggian di
di Timur, maka aliran airtanah secara umum akan berarah Barat–Timur

menuju dasar lembah Palu yang memanjang arah Baratlaut (Utara)–Tenggara (Selatan), yaitu Sungai Palu yang dapat dianggap sebagai luaran bagi sistem akuifer bebas dan muara utama aliran permukaan di lembah Palu. Demikian juga aliran airtanah dan aliran air permukaan akan mengarah dari Selatan ke Utara seperti ditunjukkan oleh aliran air Sungai Palu. Selanjutnya dengan kondisi topografi seperti itu, maka dapat diduga, bahwa imbuhan airtanah utama akan terjadi di daerah tinggian dan lerengnya di kedua tinggian (Eko, dkk., 2019).

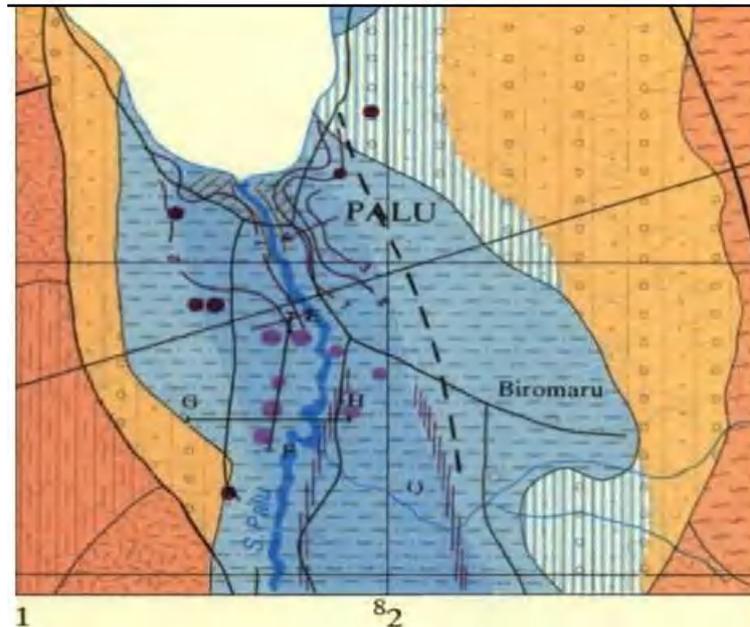
Saluran irigasi Gumbasa dianggap berkontribusi pada likuifaksi-longsor dalam bentuk aliran infiltrasi dari dasar saluran yang tidak di-lining ke dalam sistem akuifer bebas di sebelah Barat saluran. Daerah di kiri dan kanan Sungai Palu dapat diduga menjadi zona airtanah produktif tinggi baik dalam sistem akuifer bebas maupun sistem akuifer tertekan.

Pada Gbr. 1a, Peta Hidrogeologi Lembar Palu dan Parigi (Arief & Hidayat, 1993) zona ini digambar dengan warna biru muda dan biru tua. Pada paper ini, diduga sistem akuifer bebas mempunyai tebal kira-kira 40-50 meter di bawah muka tanah dengan muka air tanah (MAT) berada di kedalaman 1-5 meter, sebaran digambar dengan warna biru muda (Gambar 2.2) di bawahnya terdapat lapisan semi-permeabel dengan tebal kira-kira 10 meter dan berikutnya sistem akuifer semi-tertekan (tertekan) dijumpai di kedalaman mulai 60 meter (Gambar 2.3) dengan MAT di atas muka tanah, sebaran digambar dengan warna biru tua (Gambar 2.2)

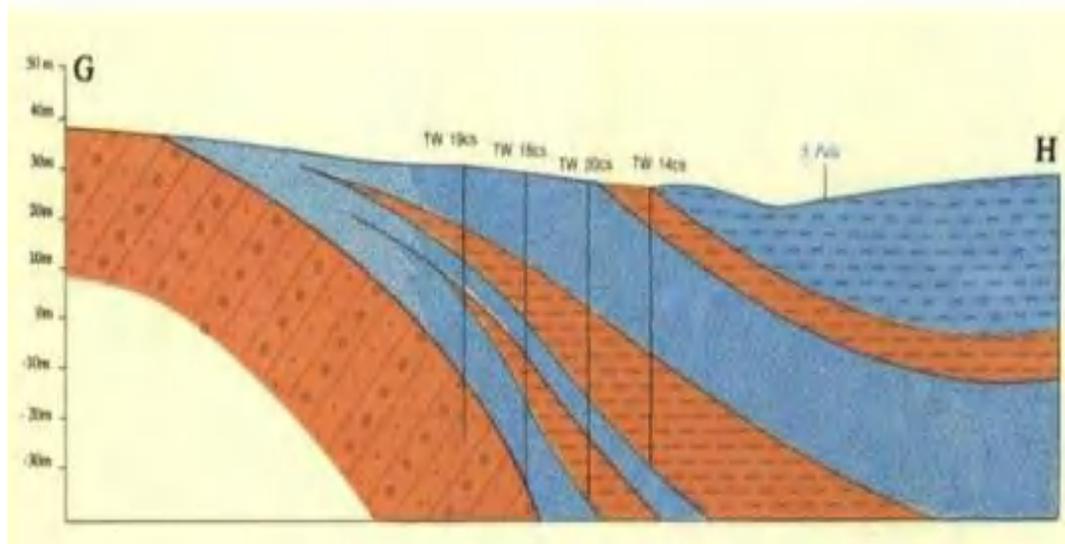


uh dari dasar lembah ke arah Barat maupun Timur, sistem akuifer semi-
(tertekan) dapat dijumpai semakin dangkal namun dengan tekanan yang

berkurang dan sebaliknya (Eko, dkk., 2019).



Gambar 2. 2 Peta Hidrogeologi Palu (Arief & Hidayat, 1993)

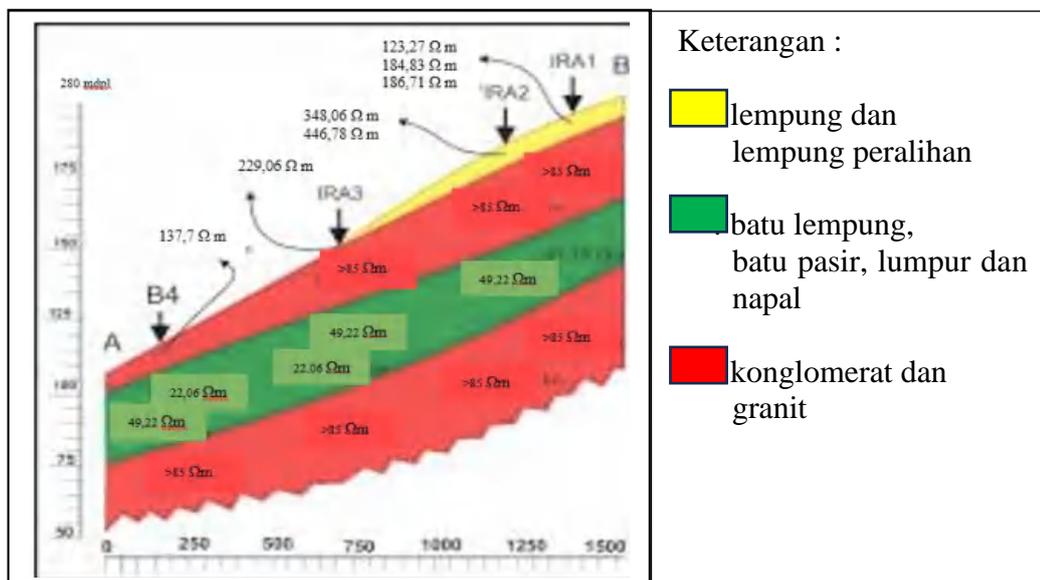


Gambar 2. 3 Peta Hidrogeologi Palu, Penampang G-H (Arief & Hidayat, 1993)



in sebaran akuifer juga dapat menggunakan metode geolistrik yang akan sifat resistivitas air tanah dalam peninjauannya. Metode geolistrik jenis merupakan salah satu metode geofisika yang dapat

menginterpretasikan jenis batuan atau mineral di bawah permukaan. Selain itu metode ini juga dapat mengetahui sifat kelistrikan medium batuan di bawah permukaan yang berhubungan dengan kemampuannya untuk menghantarkan listrik atau resistivitas. Pada metode geolistrik hambatan jenis ini, arus listrik diinjeksikan ke dalam bumi melalui 2 elektroda arus, dan mengukur beda potensial melalui 2 elektroda potensial. Dari hasil pengukuran arus dan beda potensial untuk setiap jarak elektroda yang berbeda diperoleh variasi harga hambatan jenis masing-masing lapisan di bawah permukaan. Berdasarkan nilai hambatan jenis bawah permukaan, dapat diinterpretasikan lapisan-lapisan tanah atau batuan yang mengandung air tanah (Irawati, dkk., 2016).



Gambar 2.4 Penampang hambatan jenis AB (Desa Bora)

Berdasarkan penampang pada gambar 2.4 terlihat 4 susunan lapisan dengan nilai resistivitas jenis yang bervariasi berkisar antara 22,06 Ω m – 1176,71 Ω m pada kedalaman 150 m bmt (Bawah Muka Tanah). Terlihat susunan lapisan serta lapisan yang diduga sebagai lapisan *aquifer* (warna hijau) yang tersebar



hampir merata dari arah tenggara ke barat laut, lapisan ini memiliki nilai hambatan jenis berkisar $22,06 \Omega\text{m} - 49,22 \Omega\text{m}$. Lapisan ini diduga sebagai lapisan batu lempung, batu pasir, lumpur dan napal dengan kedalaman maksimum batas atas kurang lebih 40 m bmt dan kedalaman minimum batas atasnya ialah 9 m bmt. Sedangkan kedalaman batas bawah maksimum sebesar 125 m bmt dengan ketebalan 40 m bmt.

Berdasarkan hasil penelitian di Desa Bora Kecamatan Sigi Biromaru Kabupaten Sigi maka dapat disimpulkan bahwa sebaran lapisan *aquifer* terdapat pada satuan batuan Molasa Celebes dan terdeteksi menyebar dekat permukaan hingga kedalaman 70 m bmt yang memanjang dan melebar ke arah tenggara hingga barat laut. Lapisan ini bernilai hambatan jenis lebih kecil dari $85 \Omega\text{m}$ yang diduga merupakan batupasir dan batulempung, lumpur dan napal. Untuk potensi akumulasi *aquifer* terbesar dapat dijumpai pada lintasan 3 hingga kedalaman ± 62 m bmt (Irawati, dkk., 2016).

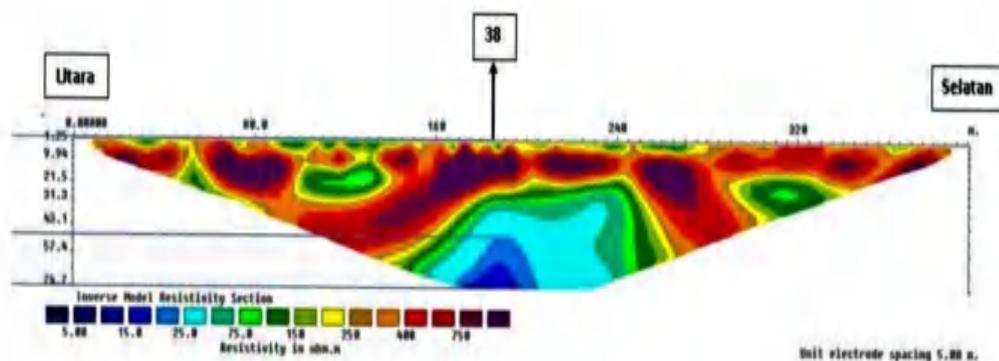
Sistem akuifer pasca gempa bumi berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Widodo, dkk., (2019) setelah terjadi bencana gempa bumi, Palu mengalami perubahan kondisi akuifer permukaan yaitu terdapat mata air baru dan terdapat koneksi hidrolik antara akuifer bebas dan akuifer semi tertekan/akuifer tertekan membuat muka air tanah naik ke permukaan sehingga timbul mata air baru.





Gambar 2. 5 Genangan/mata air baru Balaroa (Widodo, dkk., 2019)

Daerah Sigi Biromaru memiliki dua jenis lapisan akuifer yakni akuitar dan akuifer semi tertekan berdasarkan interpretasi data geolistrik dan didukung oleh data *Log Bor* yang dapat dilihat pada gambar 2.5 (Santosa, dkk., 2021).



Gambar 2. 6 Penampang Geolistrik Biromaru

Akuifer semi tertekan yang terdapat di Biromaru pada elektrode 38 berdasarkan hasil pendugaan geolistrik terdapat pada kedalaman 50,25 -74,7 mdpt (Meter dari tanah) yang memiliki nilai resistivity 0 - 25 Ω m dan di atasnya terdapat akuitar pada kedalaman 0 - 50,25 mdpt dengan nilai resistivity 25 - 75 Ω m (Santosa, dkk., 2021).

