

---

# Analisis Potensi Likuifaksi menggunakan Data Kecepatan Gelombang Geser (Vs)

(Studi Kasus Bencana Likuifaksi di Balaroa Palu akibat Gempabumi 28 September 2018)

Hendri Subakti<sup>1</sup>, Windy Renagustiarini<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Program Studi Geofisika, Sekolah Tinggi Meteorologi Klimatologi dan Geofisika

---

## ABSTRAK

---

Gempabumi Palu-Donggala 28 September 2018 membawa bencana ikutan salah satunya adalah likuifaksi atau pembuburan tanah di wilayah Balaroa, Palu. Selama ini, potensi likuifaksi banyak diperkirakan menggunakan data CPT dan SPT. Penggunaan data kecepatan gelombang geser (Vs) menjadi alternatif yang bisa dipergunakan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui potensi likuifaksi sebelum dan sesudah terjadinya gempabumi dengan menggunakan metode analisis Vp/Vs dan Software analisis likuifaksi (LiqsVs). Penelitian ini dilakukan di 30 titik di Balaroa Palu, yaitu 10 titik sebelum gempabumi dan 20 titik setelah gempabumi Palu-Donggala 28 September 2018. Potensi likuifaksi diperlukan dengan melakukan analisis Vp/Vs dan menggunakan software analisis potensi likuifaksi (LiqsVs). Analisis Vp dan Vs dilakukan menggunakan pendekatan inversi HVSR. Hasil pengolahan data sebelum kejadian gempabumi didapatkan nilai Vp/Vs yang sangat tinggi (>6) dan dari hasil pengolahan software LiqsVs juga menunjukkan potensi likuifaksi. Setelah terjadinya gempabumi, potensi untuk terjadinya likuifaksi semakin meluas dikarenakan tanah menjadi tidak stabil seperti sebelumnya. Hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi pertimbangan menata rencana tata ruang dan pembangunan kembali Kota Palu, khususnya di Balaroa.

**Kata Kunci:** likuifaksi, Balaroa, Vp/Vs, Gempabumi, Palu

Hendri Subakti

Program Studi Geofisika,

Sekolah Tinggi Meteorologi, Klimatologi dan Geofisika, Indonesia,

Jl. Perhubungan I No.5 Pondok Betung, Bintaro, Kec. Pd. Aren, Kota Tangerang Selatan, Banten 15221.

Email: hendri.subakti@stmkg.ac.id

---

## 1. PENDAHULUAN

Peristiwa gempabumi baik yang besar maupun kecil memang sudah terjadi sejak lama dan selalu menjadi ancaman karena banyak menimbulkan kerusakan. Kerusakan-kerusakan yang timbul akibat gempabumi dibagi menjadi 2 bagian pokok yaitu kerusakan pada bangunan serta fasilitas diatas tanah dan kerusakan fisik di permukaan ataupun di dalam tanah itu sendiri. Pemberitaan akibat gempabumi sering kali hanya membicarakan kerusakan bangunan atau kondisi diatas permukaan saja. Namun, pada kenyataannya gempabumi juga dapat menyebabkan kerusakan/kegagalan akibat hilangnya kestabilan tanah (kegagalan struktur bagian bawah). Dampak dari kegagalan struktur itu sendiri bermacam macam diantaranya adalah settlement atau penurunan tanah, tanah longsor dan likuifaksi.

Berdasarkan kondisi topografi, geologi dan seismologinya, Kota Palu memiliki potensi yang sangat besar mengalami kerusakan akibat gempabumi yang dapat menimbulkan bencana sekunder (tsunami, likuifaksi dan longsoran tebing) seperti pernah terjadi pada 20 Mei 1938 yaitu gempabumi dengan magnitudo 7.6 SR yang getarannya terasa di seluruh pulau Sulawesi. Berdasarkan Peta Zonasi Gempa Indonesia yang diterbitkan oleh Kementrian Pekerjaan Umum (2010), Kota Palu memiliki percepatan gempabumi permukaan sebesar 1 – 1,2 g di sepanjang daratan Teluk Palu yg ditunjukkan pada Gambar 1.1. Pada 28 September 2018 Kota Palu kembali dilanda gempabumi dengan magnitudo 7.4 yang menimbulkan bencana ikutan salah satunya adalah likuifaksi. Salah satu daerah dengan dampak likuifaksi terparah terdapat di wilayah Balaroa dengan kerusakan mencapai 43 Hektar [1].



likuifaksi di luar maupun dalam negeri. Namun kedua data tersebut sulit didapatkan karena membutuhkan dana yang cukup banyak dan waktu yang cukup panjang.

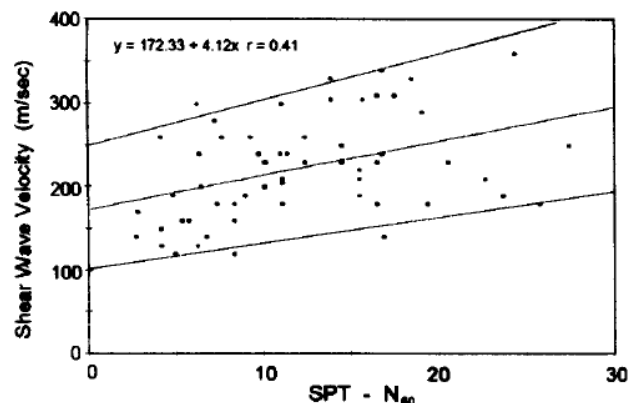
Penggunaan data SPT dan CPT sudah sangat umum digunakan sebagai metode untuk penentuan potensi likuifaksi di banyak kasus gempabumi dan likuifaksi di dunia, Penggunaan data kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) menjadi alternatif yang bisa dipergunakan untuk penilaian potensi likuifaksi. Terdapat banyak metode yang bisa digunakan untuk penentuan nilai  $V_s$ , diantaranya menggunakan borehole, MASW (*Multichannel Analysis of Surface Wave*) dan inversi HVSr. Pada penelitian kali ini penulis menggunakan inversi HVSr untuk mencari nilai  $V_s$ .

## 2. DASAR TEORI

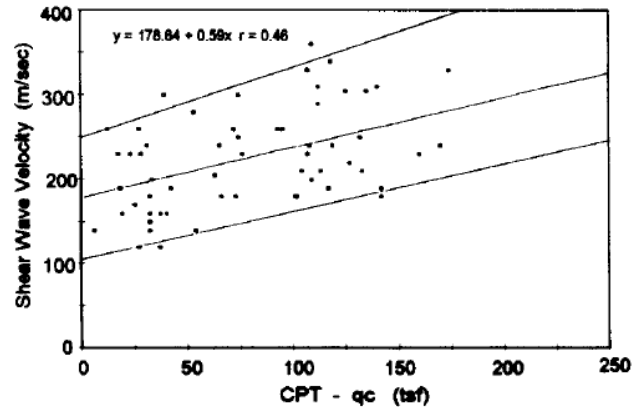
### 2.1. Tinjauan Pustaka

Penelitian likuifaksi menggunakan kecepatan gelombang geser telah dilakukan oleh beberapa peneliti diantaranya oleh Andrus dan Stokoe[6]. Untuk mengevaluasi resistensi likuifaksi, Andrus dan Stokoe mengembangkan metode penilaian potensi likuifaksi menggunakan  $V_s$  yang berdasar dari simplified procedure (prosedur penyederhanaan) yang diusulkan oleh Seed dan Idriss. Metode ini dikembangkan bekerja sama dengan industri, peneliti, praktisi, dan berevolusi dari workshop NCEER pada tahun 1996 dan 1998. Penelitian ini mengikuti format umum dari prosedur penyederhanaan Seed-Idriss berdasarkan pada hitungan uji pukulan penetrasi standar (SPT) dan dikembangkan menggunakan data riwayat kasus dari 26 gempabumi dan lebih dari 70 lokasi pengukuran, mulai dari tanah berpasir halus, kerikil berpasir dengan hingga lapisan tanah liat berlumpur. Kurva resistensi likuifaksi dibuat dengan menerapkan hubungan antara kecepatan gelombang-geser dan rasio tegangan siklik untuk tegangan geser siklik konstan rata-rata yang disarankan oleh R. Dobry [6]. Tegangan siklik merupakan tegangan dalam tanah yang terjadi akibat getaran yang berulang (siklik). Kurva ini dengan tepat memprediksi potensi likuifaksi sedang hingga tinggi untuk lebih dari 95% dari riwayat kasus likuifaksi dan konsisten terhadap kurva uji penetrasi standar di tanah berpasir. Namun diperlukan data tambahan, terutama dari endapan tanah padat yang diberikan getaran oleh gerakan tanah yang lebih kuat, untuk memvalidasi penilaian resistensi likuifaksi menggunakan  $V_s$  ini.

Kayabali [7] telah melakukan evaluasi likuifaksi menggunakan kecepatan gelombang geser. Pada penelitian, penulis membandingkan 3 metode penilaian likuifaksi yaitu (standard penetration test) SPT, (cone penetration test) CPT, dan (shear wave velocity) SWV. Data lapangan dari SPT, CPT, dan SWV yang dikumpulkan berasal dari endapan pasir berlumpur aluvial. Evaluasi dilakukan untuk mencari korelasi antara SWV dan berbagai tes penetrasi. Korelasi antara SWV dan SPT diplot pada Gambar 2.1. Meskipun ada sebaran yang cukup besar dalam grafik, hubungan yang cukup baik dapat diamati antara resistansi penetrasi standar dan kecepatan gelombang geser tanah yang diteliti. Hubungan serupa juga dicari antara resistensi penetrasi kerucut dan properti SWV dari tanah uji yang sama. Gambar 2.2 menunjukkan korelasi antara SWV dan CPT. Hamburan dalam grafik sangat mirip dengan yang ada di antara SWV dan SPT.



Gambar 2. 1 Grafik korelasi SWV dan SPT [7]



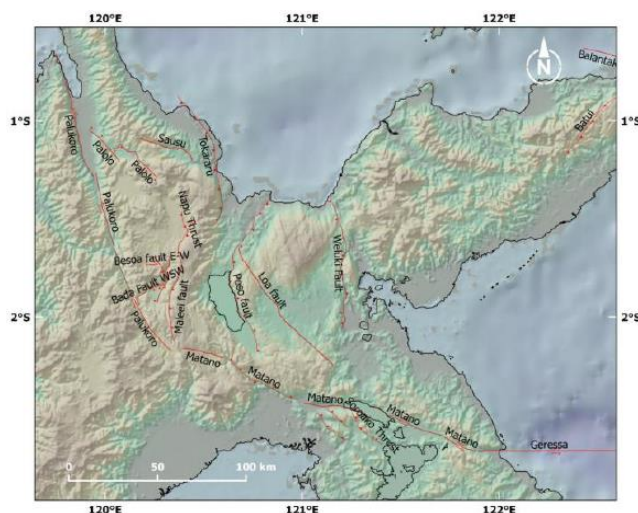
Gambar 2. 2 Grafik korelasi SWV dan CPT [7]

Hubungan antara resistensi SPT dan SWV tanah kohesi telah dilakukan penelitian oleh banyak peneliti salah satunya, Tonouchi dkk. [8] menunjukkan korelasi yang baik antara nilai SWV dan SPT-N berdasarkan lebih dari 1.600 pasangan data. SWV juga dipengaruhi oleh beberapa parameter tanah yang mempengaruhi likuifaksi di bawah guncangan gempabumi, seperti kerapatan relatif, tekanan lapisan penutup, sejarah tegangan, dan usia geologi

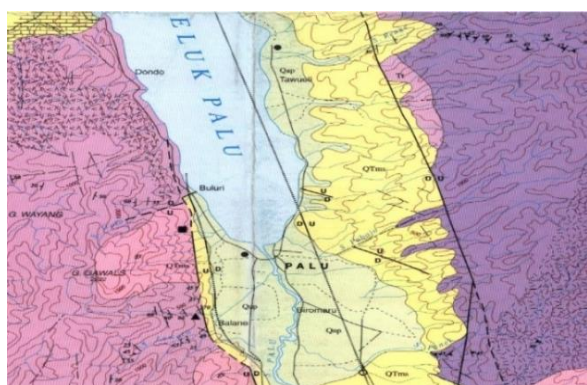
Hasil uji SWV dan SPT dari penelitian ini dan sebelumnya telah menunjukkan bahwa ada korelasi yang cukup baik antara kecepatan gelombang geser dan ketahanan penetrasi standar tanah granular. SWV juga berkorelasi dengan CPT dengan cukup baik. Hasil penelitian ini didasarkan pada informasi bahwa lapisan tanah yang diteliti memiliki kandungan fines sebagian besar kurang dari 15% dan  $D_{50}$  antara 0,1 dan 0,25 mm. Grafik prediksi likuifaksi tanah yang dikembangkan dalam penelitian ini tidak berlaku untuk tanah kohesif.

## 2.2. Tektonik dan Geologi Palu

Menurut Daryono [9], daerah Palu merupakan salah satu kawasan seismik aktif di Indonesia. Tingginya tingkat aktivitas kegempaan di kawasan ini tidak lepas dari lokasinya yang berada pada zona benturan tiga lempeng tektonik utama dunia, yaitu Indo-Australia, Eurasia dan Pasifik. Pertemuan ketiga lempeng ini bersifat konvergen dan ketiganya bertumbukan secara relatif mengakibatkan Daerah Sulawesi Tengah dan sekitarnya menjadi salah satu daerah yang memiliki tingkat kegempaan yang cukup tinggi di Indonesia berkaitan dengan aktifitas sesar aktif. Menurut Hamilton [10], ada beberapa segmentasi sesar yang sangat berpotensi membangkitkan gempabumi kuat di Sulawesi Tengah dan Sulawesi Selatan. Sesar-sesar tersebut adalah: (a) Sesar Palu-Koro yang memanjang dari Palu ke arah Selatan dan Tenggara melalui Sulawesi Selatan bagian Utara menuju ke selatan Bone sampai di laut Banda, (b) Sesar Saddang yang memanjang dari pesisir Pantai Mamuju memotong diagonal melintasi daerah Sulawesi Selatan bagian tengah, Sulawesi Selatan bagian selatan, Bulukumba menuju ke Pulau Selayar bagian Timur, dan (c) Sesar Parit-Parit di Laut Makassar Selatan dan Laut Bone, dan beberapa anak patahan baik yang berada di darat maupun di laut.



Gambar 2.3 Sesar aktif di Sulawesi bagian tengah [11]



Gambar 2.4 Peta geologi tinjau lembar Palu Sulawesi [12]

Berdasarkan Peta Geologi Tinjau Lembar Palu, Sulawesi Skala 1:250.000 [12] daerah penyelidikan terdiri dari 2 (dua) Formasi batuan, yaitu Aluvium dan endapan pantai (Qap) dan Molasa Celebes Serasin dan Serasin (QTms) seperti terlihat pada Gambar 2.4.

1. Aluvium dan endapan pantai (Qap)  
Terdiri dari kerikil, pasir, lumpur, dan batugamping koral. Terbentuk dalam lingkungan sungai, delta, dan laut dangkal merupakan sedimen termuda di daerah ini. Endapan itu boleh jadi seluruhnya berumur Holosen. Di daerah dekat Labea dan Tombo terumbu koral membentuk bukit-bukit rendah. Kondisi batuan pada Formasi ini umumnya berupa material yang belum mengalami kompaksi
2. Molasa Celebes Serasin dan Serasin (QTms)  
Batuan ini terdapat pada ketinggian lebih rendah pada sisi-sisi kedua pematang, menindih secara tidak selaras Formasi Tinombo dan Kompleks batuan metamorf, mengandung rombakan yang berasal dari formasi formasi lebih tua dan terdiri dari konglomerat, batu pasir, batu gamping koral, dan napal yang semuanya hanya mengeras lemah. Di dekat Kompleks batuan metamorf pada bagian barat pematang timur endapan itu terutama terdiri dari bongkah-bongkah kasar dan agaknya diendapkan di dekat sesar. Batuan-batuan itu ke arah laut beralih-alih jadi bebatuan klastika berbutir lebih halus.

### 2.3. Likuifaksi

Likuifaksi atau pembuburan tanah adalah fenomena dimana tanah yang jenuh air kehilangan kekakuan dan kekuatan saat terjadi getaran kuat seperti gempa bumi sehingga mengalami penurunan atau amblesan karena tidak mampu menopang beban (beban bangunan, batuan) di permukaan tanah. Dilihat dari skalanya, apabila likuifaksi terjadi dalam skala besar, kerusakan yang ditimbulkan

meliputi kerusakan struktur tanah dan bangunan. Sedangkan dalam skala kecil, likuifaksi dapat ditandai dengan munculnya pasir halus di permukaan tanah.

#### 2.4. Mekanisme Fisis Terjadinya Likuifaksi

Menurut Towhata [13] likuifaksi terjadi pada tanah yang berpasir lepas (tidak padat) dan jenuh air. Akibat getaran gempabumi, lapisan pasir akan berubah menjadi seperti cairan sehingga tidak mampu menopang beban bangunan di dalam atau di atasnya, yang disebabkan oleh tegangan siklik pada waktu terjadi gempa sehingga tekanan air pori meningkat mendekati atau melampaui tegangan vertikal. Meningkatnya tekanan air pori akan mempengaruhi tingkat kekuatan geser antar partikel pasir itu sendiri. Hal ini menyebabkan jarak antar partikel pasir menjadi semakin renggang, sehingga kekuatan totalnya berkurang drastis dan porositas meningkat. Kerugian terbanyak terjadi akibat dari besarnya getaran yang menyebabkan runtuhnya bangunan dengan struktur yang lemah. Seiring naiknya tekanan air yang diakibatkan oleh guncangan gempabumi, maka tegangan efektif ( $s'$ ) menjadi berkurang. Kondisi ini dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$s' = s - u \quad (2.1)$$

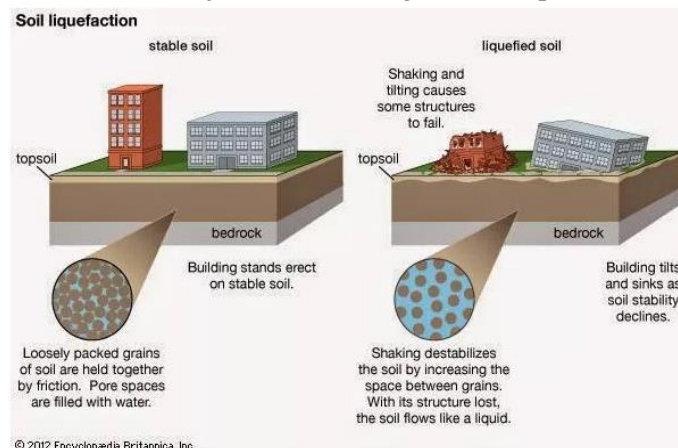
dengan,

$s'$  = tegangan efektif,

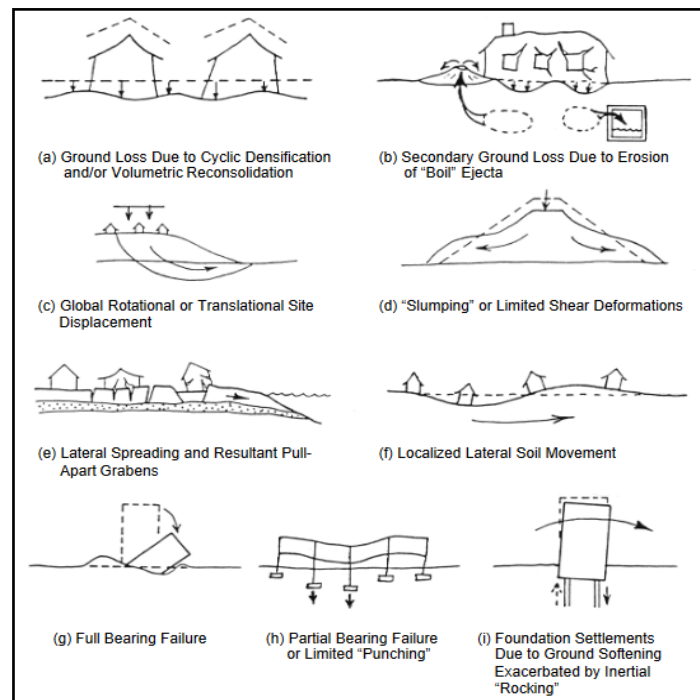
$s$  = tegangan total (berat permukaan tanah)

$u$  = tekanan air pori

Modulus geser pasir menurun bersamaan dengan turunnya tegangan efektif. Dengan begitu tanah berpasir menjadi melunak (mencair). Pada kasus yang ekstrim, tegangan efektif menjadi nol. Tegangan efektif adalah ketika terjadi adanya gaya kontak atau gaya gesek antar butiran pasir. Tegangan efektif nol menyatakan tidak adanya gaya kontak tersebut. Sehingga butiran pasir benar-benar mengapung bebas dalam air. Sehingga pasir pun menjadi seperti mencair. Oleh karenanya, ketika hal itu terjadi maka tanah tersebut tidak mampu menopang beban di atasnya dan menyebabkan amblesnya bangunan, miring ataupun longsor seperti pada Gambar 2.7. Selanjutnya butiran pasir yang telah kehilangan kekuatannya akan jatuh secara cepat dan mengendap disebabkan massa jenisnya yang lebih besar dibandingkan air. Kecepatan relatif butiran pasir terhadap air sebanding dengan besarnya gaya gesek antara butiran pasir dengan air. Proses likuifaksi akan selesai ketika seluruh butiran pasir telah mengendap dan mendapatkan kembali kekuatan gesernya. Perbedaan kondisi tanah sebelum dan sesudah terjadi likuifaksi digambarkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2. 5 perbedaan tanah stabil dan tanah terlikuifaksi [14]



Gambar 2. 6 Tipe penurunan akibat likuifaksi [15]

## 2.5. Faktor-Faktor yang Mempengaruhi Terjadinya Likuifaksi

Banyak faktor yang akan mempengaruhi terjadi atau tidaknya peristiwa likuifaksi, baik faktor-faktor yang sangat dominan maupun faktor yang kurang dominan. Faktor-faktor yang cukup dominan mempengaruhi terjadinya likuifaksi adalah sebagai berikut [16]:

### 1. Karakteristik Getaran

Peristiwa likuifaksi atau penurunan tanah dapat disebabkan oleh tipe getaran yang harmonik maupun getaran non-harmonik seperti getaran akibat gempa bumi. Kemungkinan terjadinya likuifaksi juga dipengaruhi oleh baik percepatan tanah dan durasi gempa [17]. Percepatan yang besar dan durasi gempa bumi yang lama berkorelasi dengan magnitudo yang besar.

### 2. Jenis Tanah

Jenis tanah memiliki keterkaitan dengan potensi likuifaksi di suatu wilayah. Jenis tanah yang memungkinkan terjadinya likuifaksi adalah pasir jenuh air atau tanah pasir lepas, butir pasir berdiameter halus sampai agak kasar maupun tanah pasir - *silt* terutama apabila sistem penyerapan (*drainase*) tidak baik. Kandungan *finer* atau butiran pasir halus yang relatif besar akan memperbaiki gradasi butiran dan akan meningkatkan kapasitas atau ketahanan tanah, sehingga akan menurunkan potensi likuifaksi.

Tanah berbutir halus, adalah tanah yang sebagian besar butir-butir tanahnya berupa lempung clay dan lanau (*silt*). Tanah berbutir halus disebut juga tanah kohesif, contoh tanah berbutir halus adalah lempung, lempung lanau dan lempung bercampur pasir dan kerikil. Jenis tanah ini memiliki keterkaitan dengan potensi likuifaksi yang tinggi dikarenakan sifatnya yang memiliki ketahanan geser rendah, plastis dan mudah dimampatkan, dapat kehilangan sebagian ketahanan gesernya akibat pembasahan dan akibat adanya gangguan (*gempabumi*), mudah mengalami deformasi secara plastis dibawah beban konstan, kembang-kerut: mengembang bila basah dan mengerut bila kering.

### 3. Muka Air Tanah (*Ground Water Table*)

Kedudukan muka air tanah dipengaruhi oleh beberapa hal diantaranya adalah curah hujan, elevasi tanah dan jenis tanah. Suatu kawasan tanah pasir didekat bantaran hilir

sungai, danau, persawahan atau ditepi laut dimana muka air relatif tinggi akan berpotensi terjadi likuifaksi. Muka air tanah yang tinggi akan mengakibatkan lapisan atas tanah pasir yang tekanan *overburden* total masih relatif kecil akan bersifat jenuh air. Tekanan *overburden* yang masih relatif kecil, butir-butir pasir halus yang seragam dan ditambah kondisi jenuh air maka akan memudahkan terjadinya likuifaksi.

#### 4. Distribusi Diameter Butir

Hasil tes laboratorium menunjukkan bahwa perilaku tanah pasir yang digetarkan akan dipengaruhi oleh distribusi diameter butir-butir. Prakash [18] dan Day [17] mengatakan bahwa butir-butir pasir yang halus dan seragam cenderung lebih bahaya terhadap likuifaksi dibanding dengan butir-butir yang relatif kasar. Sebaliknya distribusi butiran yang baik yaitu butir-butir yang lebih kecil (misalnya *finer*) mengisi dengan baik diantara butir-butir yang lebih besar akan mengakibatkan massa tanah pasir lebih tahan terhadap kemungkinan likuifaksi.

#### 5. Kepadatan Awal (*Initial Relative Density*)

Penurunan/*settlement* dan tegangan air pori selama terjadinya getaran akan berkurang pada tanah pasir yang relatif lebih padat. Hasil uji laboratorium menunjukkan bahwa tanah pasir yang relatif padat mempunyai modulus geser yang lebih besar dibanding pada tanah/pasir yang padat. Melalui alasan ini pulalah yang mengakibatkan pasir lepas dengan kepadatan relatif yang kecil akan lebih mudah terjadinya likuifaksi.

#### 6. Pengaruh-pengaruh lain

Hal lain yang akan mempengaruhi potensial likuifaksi adalah ada atau tidaknya udara yang terperangkap didalam tekanan air pori diantara butir-butir pasir. Adanya kandungan udara yang terperangkap akan mengurangi potensial likuifaksi[18]. Sementara itu Day[17] menyebutkan bahwa masih ada beberapa hal yang dapat mempengaruhi likuifaksi misalnya bentuk partikel/butiran atau ada atau tidaknya beban vertikal (misalnya beban akibat berat bangunan di atasnya) ataupun adanya gunung/gundukan pasir.

### 2.6. Analisis Potensi Likuifaksi dengan Shear Wave Velocity ( $V_s$ )

Salah satu pendekatan dalam analisis likuifaksi adalah dengan menggunakan parameter pokok kecepatan gelombang geser (*Shear Wave Velocity,  $V_s$* ). Andrus dan Stokoe II [6] mengatakan bahwa hubungan antara kecepatan gelombang geser dengan likuifaksi telah diteliti sejak tahun 1980 dan 1990'an, diantaranya oleh Stokoe dan Nazarian (1985), Robertson et al.(1992), Kayen et al.(1995), Andrus dan Stokoe (1997).

#### 1. Tegangan Geser Rata-Rata Akibat Gempabumi

Beban gempa merupakan beban siklik sehingga tegangan geser tanah pasir akibat gempa juga berubah-ubah menurut fluktuasi percepatan tanah. Pada percepatan tanah maksimum maka akan terjadi tegangan geser maksimum dan seterusnya. Menurut hasil uji tegangan geser rata-rata  $\tau_{av}$  dengan suatu hubungan:

$$\tau_{av} = 0,65 \sigma_{vo} \frac{a_{max}}{g} r_d \quad (2.2)$$

Keterangan:

- $a_{max}$  : percepatan tanah maksimum (g)
- $g$  : percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )
- $\sigma_{vo}$  : tegangan total dan efektif dari *overburden* (kPa)
- $r_d$  : koefisien reduksi tegangan

#### 2. *Cyclic Stress Ratio (CSR)*

Pengaruh gempa terhadap lapisan tanah dapat diartikan sebagai rasio tegangan siklik (*CSR*). Apabila tegangan geser rata-rata  $\tau_{av}$  akibat gempabumi dinormalisasikan dengan

tekanan efektif *overburden* ( $\sigma'_{vo}$ ) dan koefisien reduksi tegangan ( $r_d$ ) maka akan menjadi *Cyclic Stress Ratio*. CSR pada hakekatnya adalah normalisasi tegangan lapisan tanah yang diakibatkan oleh gempabumi dengan percepatan tanah ( $a_{max}$ ). Mengingat CSR merupakan fungsi langsung dari tegangan total *overburden* ( $\sigma_{vo}$ ) yang nilainya relatif kecil di lapis-lapis atas dan membesar di lapis-lapis bawah, maka kejadian likuifaksi cenderung dimulai dari lapis-lapis atas (di tempat  $\sigma_{vo}$  yang nilainya relatif kecil).

$$CSR = 0,65 r_d \frac{\sigma_{vo} a_{max}}{\sigma'_{vo} g} \quad (2.3)$$

Keterangan:

- $a_{max}$  : percepatan tanah maksimum (g)  
 $g$  : percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )  
 $\sigma_{vo}$  dan  $\sigma'_{vo}$  : tegangan total dan efektif dari *overburden* (kPa)  
 $r_d$  : koefisien reduksi tegangan.

### 3. *Cyclic Resistance Ratio* (CRR)

*Cyclic Resistance Ratio* (CRR) adalah salah satu parameter mendasar dalam prediksi likuifaksi, yang sering diamati selama banyak gempabumi sedang hingga kuat di endapan campuran pasir-lumpur. CRR singkatnya memiliki definisi kapasitas tanah untuk menahan likuifaksi. CRR berdasar pada kecepatan gelombang geser dan telah sedikit mengalami evolusi. Menurut Andrus dan Stokoe (2000), nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dapat ditentukan dengan memakai formulasi:

$$CRR_{7.5} = a \left( \frac{V_{s1}}{100} \right)^2 + b \left( \frac{1}{V^*_{s1} - V_{s1}} \right) - \left( \frac{1}{V^*_{s1}} \right) \quad (2.4)$$

Keterangan:

- $V_{s1}$  : kecepatan gelombang geser yang sudah terkoreksi oleh referensi *overburden pressure*  
 $V^*_{s1}$  : batas atas nilai kecepatan gelombang geser terkoreksi *overburden*  
 $a = 0.022$  dan  $b = 2.80$  adalah ketetapan parameter terkait dengan kemiringan kurva

Batas atas tersebut masih dipengaruhi oleh *finer content* (FC) atau partikel halus dinyatakan dalam % sehingga,

$$\begin{aligned} V^*_{s1} &: 215 \text{ m/dt,} & FC < 5\% \\ V^*_{s1} &: 215 - (FC-5) \text{ m/dt,} & 5\% < FC < 35\% \\ V^*_{s1} &: 200 \text{ m / dt} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Namun demikian pada (Andrus dkk, 2003), nilai CRR tersebut dimodifikasi dan ditentukan dengan,

$$CRR_{7.5} = a \cdot \left[ \frac{(V_{s1})_{csa1}}{100} \right]^2 + b \cdot \left( \frac{1}{V^*_{s1} - (V_{s1})_{csa1}} \right) - \left( \frac{1}{V^*_{s1}} \right) \quad (2.6)$$

Dengan  $(V_{s1})_{csa1}$  adalah koreksi kecepatan gelombang geser  $(V_{s1})_{csa1}$ . Koreksi ini berkaitan dengan usia lapisan tanah atau yg disebut sebagai koreksi *Age scaling factor* (ASF). Untuk gempabumi dengan magnitudo kurang atau lebih dari 7.5 harus menggunakan skala faktor nilai CRR, hal ini berfungsi untuk menormalisasi besar magnitudo gempabumi selain 7,5 yang kemudian dapat disesuaikan dengan perhitungan yang ada, Youd dkk. (2001) dalam Andrus dan Stokoe (2000) merekomendasikan faktor skala magnitudo (MSF) yang dihitung dari hubungan berikut

$$MSF = \left( \frac{M_w}{7.5} \right)^n \quad (2.7)$$

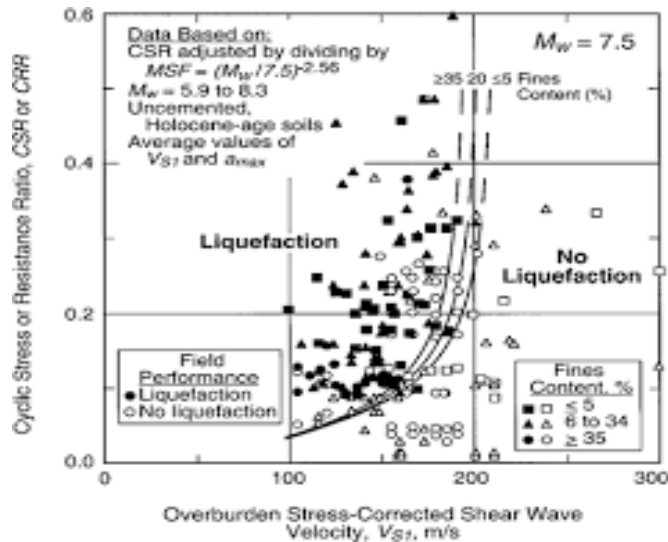
Keterangan:

- MSF : Faktor skala magnitudo  
 $M_w$  : Magnitudo gempa  
 $n$  : -2.9 (ketetapan)

Faktor skala magnitudo (MSF), diterapkan pada CRR, daripada CSR, dan bernilai sama dengan 1 untuk gempa bumi dengan magnitudo 7,5. Sehingga

$$CRR_{M_W} = CRR_{7.5} \cdot MSF \quad (2.8)$$

Dengan  $CRR_{M_W}$  adalah nilai CRR untuk magnitudo kurang atau lebih dari 7,5.



Gambar 2. 7 Hubungan  $V_{s1}$  dengan CRR [6]

#### 4. Factor of Safety

Dalam suatu analisis potensi likuifaksi dibutuhkan suatu nilai pegangan untuk mengetahui apakah likuifaksi terjadi atau tidak. Nilai pegangan ini disebut faktor keamanan. Dalam analisis faktor keamanan dibutuhkan nilai-nilai yang harus dievaluasi. Adapun nilai tersebut ialah nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) dan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR). *Factor of Safety* dinyatakan dalam perbandingan nilai CRR dan CSR. Pada metode ini nilai FS dirumuskan dalam:

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (2.9)$$

FS < 1, berpotensi likuifaksi

FS = 1, kondisi kritis ( bisa terjadi likuifaksi bisa tidak terjadi)

FS = >1, tidak terjadi likuifaksi

### 2.7. Penilaian Potensi Likuifaksi Menggunakan $V_p/V_s$

Salah satu metode untuk menentukan potensi likuifaksi yaitu menggunakan  $V_p/V_s$ . Nilai  $V_p/V_s$  bergantung pada porositas, banyaknya kandungan lempung dan kejenuhan air (Han dkk, 1986). Nilai  $V_p/V_s$  yang tinggi (>6) menunjukkan bahwa lapisan tersebut mengandung lempung yang cukup tinggi dan jenuh air, sedangkan nilai  $V_p/V_s$  antara 3-6 mengindikasikan lapisan pasir urai yang jenuh air. Lapisan-lapisan yang jenuh air di kedalaman dangkal/dekat dengan permukaan ini ditunjukkan oleh anomali  $V_p/V_s$  yang tinggi. Anomali  $V_p/V_s$  dapat mengindikasikan bahwa daerah dengan anomali tersebut diduga akan mengalami likuifaksi ketika terkena guncangan gempa bumi yang cukup besar.

### 3. Metode dan Data Penelitian

#### 3.1. Model Penelitian

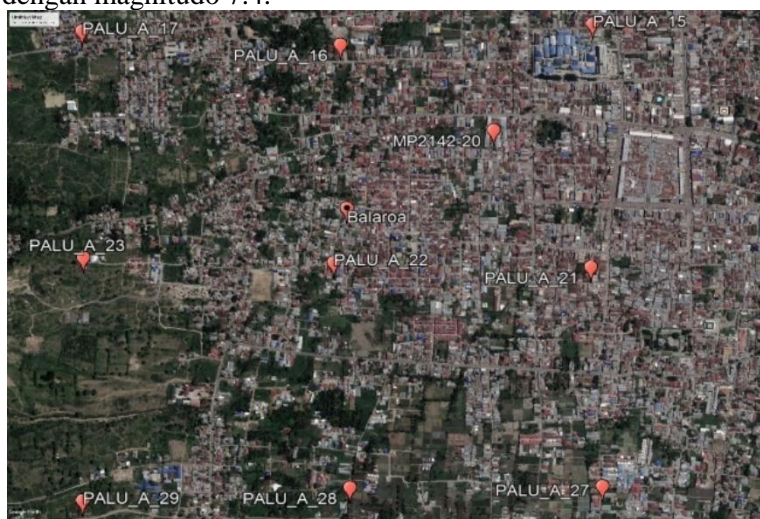
Model penelitian yang digunakan dalam penelitian ini yaitu dengan metode analitik yang dilakukan berdasarkan pengumpulan data mikrotremor hasil pengukuran langsung di daerah Balaroa dan sekitarnya yang kemudian dilakukan pengolahan data mikrotremor sehingga didapatkan kurva HVSR selanjutnya dilakukan inversi HVSR hingga mendapatkan kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) dan kecepatan gelombang P ( $V_p$ ). Nilai  $V_s$  digunakan untuk menganalisis potensi likuifaksi menggunakan metode  $V_p/V_s$  dan digunakan sebagai parameter pokok untuk penilaian potensi likuifaksi menggunakan *software LqsVs* yang didukung dengan nilai PGA juga kedalaman air tanah di wilayah penelitian.

Penelitian ini dilakukan secara sistematis dan penyelesaian masalahnya dilakukan melalui suatu perhitungan matematis menggunakan rumusan rumusan tertentu serta menggunakan pemodelan numerik sehingga termasuk dalam jenis penelitian kuantitatif. Selain itu, penelitian ini juga termasuk dalam jenis penelitian deskriptif karena pembahasannya disajikan dalam bentuk uraian kata-kata (deskripsi) sesuai dengan hasil yang diperoleh untuk menjelaskan peristiwa likuifaksi yang telah terjadi.

#### 3.2. Prosedur Penelitian

##### 3.2.1. Lokasi dan Waktu Penelitian

Lokasi yang menjadi tempat penelitian adalah wilayah Balaroa, Kecamatan Palu Barat, Provinsi Sulawesi Tengah (Gambar 3.1). Letak geografis penelitian pada wilayah ini berada pada Lintang  $00^{\circ} 53' 55''$  LS -  $00^{\circ} 54' 52''$  LS dan Bujur  $119^{\circ} 49' 54''$  BT - Bujur  $119^{\circ} 51' 2''$  BT. Untuk waktu penelitian yang dilakukan adalah sebelum gempabumi dan pasca gempabumi Palu 28 September 2018 dengan magnitudo 7.4.



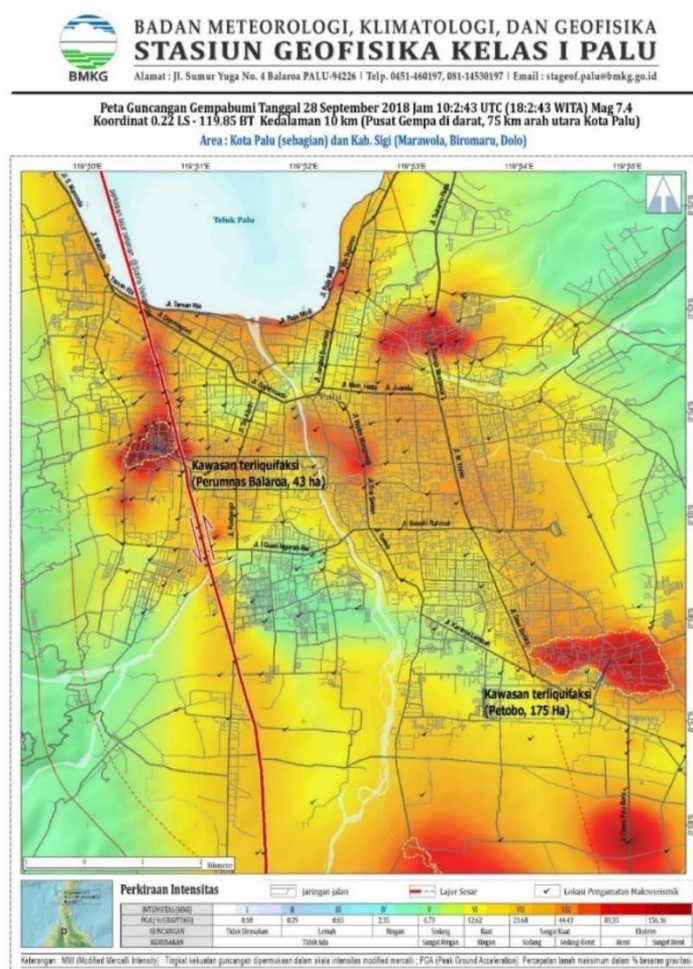
Gambar 3.1 Peta titik Pengukuran mikrotremor sebelum gempa 28 September 2018



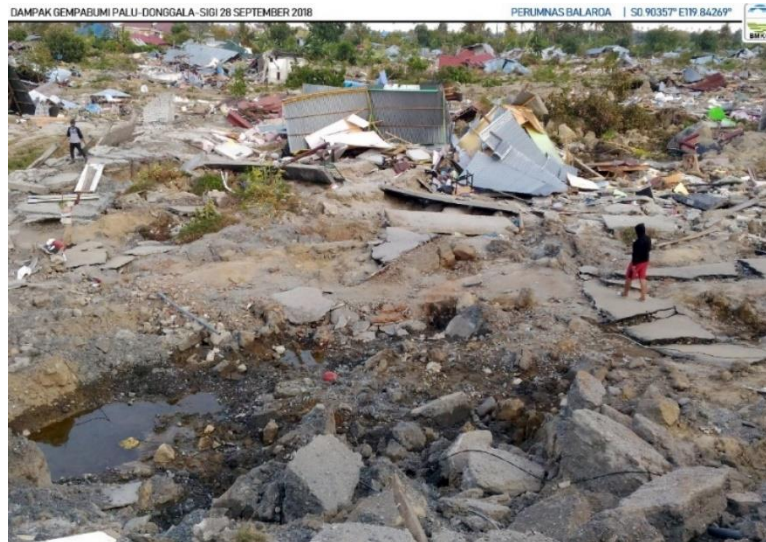
- e. Inputkan file dengan format .txt yang telah disimpan hasil pengolahan dari Geopsy lalu masukan model awal.
  - f. Model awal atau *Initial model* adalah nilai kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ) dan kedalaman yang digunakan untuk pemodelan Inversi HVSr.
  - g. Membandingkan Inversi spektrum *initial model* dan spektrum observasi.
  - h. Spektrum *initial model* terus diiterasi hingga mirip dengan spektrum observasi sehingga mendapatkan profiling  $V_s$  dan Nilai  $V_p/V_s$ .
2. Pengolahan data  $V_s$  Untuk Mendapatkan Potensi Likuifaksi
    - a. Buka *software* LiqVs.
    - b. Pilih test lapangan yang akan digunakan untuk perhitungan potensi likuifaksi, pilih  $V_s$ .
    - c. Inputkan data  $V_s$  yang telah berhasil didapatkan dari hasil inversi.
    - d. Lalu masukkan parameter berupa kedalaman muka air tanah dan nilai percepatan tanah maksimum (PGA).
    - e. Hasil akhir yang didapatkan dari software tersebut berupa beberapa grafik, salah satunya adalah grafik kedalaman terhadap nilai  $CRR_{7.5}$  dan grafik FS (*Factor of Safety*).
    - f. Setelah grafik tersebut dianalisis didapat potensi likuifaksi berdasarkan kedalaman.

### 3.3. Validasi Penelitian

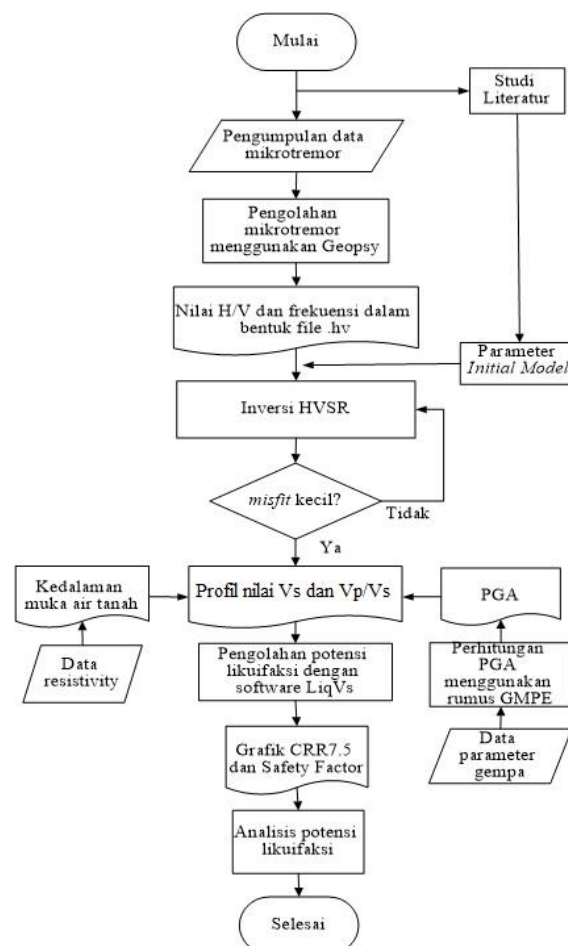
Validasi data untuk penelitian ini yaitu menggunakan peta shakemap BMKG dan data pengamatan makroseismik di Balaroa.



Gambar 3.3 Peta guncangan gempabumi Palu-Donggala 28 September 2018 [19]



Gambar 3. 4 Kerusakan akibat likuifaksi di Balaroa (Sumber: BMKG)



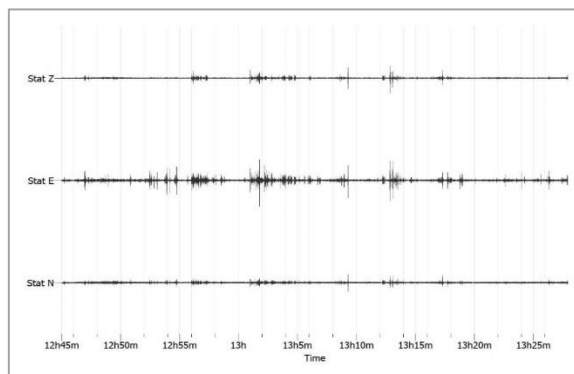
Gambar 3.5 Diagram alir penelitian

## 4. Hasil Pengolahan dan Analisis

### 4.1. Pengukuran

Pengambilan data mikrotremor dilakukan di Balaroa, Palu. Pengukuran dilakukan di 10 titik sebelum gempa dan 20 titik setelah gempa palu 28 September 2018 yang merupakan penyebab terjadinya fenomena likuifaksi. Proses pengambilan data dilakukan dengan menggunakan

seismometer TDL 303S mengarah ke utara. Pengukuran dilakukan minimal 30 menit untuk mendapatkan data yang cukup baik untuk analisis struktur bawah permukaan tanah dangkal. Selanjutnya, data waveform hasil perekaman mikrotremor diolah menggunakan *software Geopsy* untuk mendapatkan spektrum HVSR. Dibawah ini merupakan *waveform* hasil pengukuran mikrotremor di titik Palu\_A\_22 (Gambar 4.1) dan spektrum HVSR (Gambar 4.2)



Gambar 4. 1 Sinyal mikrotremor

## 4.2. Nilai Vs dan Vp hasil Inversi HVSR

### 4.2.1. Model awal atau Initial Model

Untuk mendapatkan nilai Vs dan Vp, dilakukan inversi HVSR menggunakan *software OpenHVSR*. Langkah awal yang perlu dilakukan yaitu menyiapkan model awal atau bisa disebut sebagai *initial model*. Model awal ini berfungsi sebagai inisialisasi awal pada proses inversi. Model awal berisi parameter model yang dijadikan inputan yaitu kecepatan gelombang P (Vp), kecepatan gelombang S (Vs), densitas ( $\rho$ ), ketebalan lapisan (h), redaman gelombang P (Qp) dan redaman gelombang S (Qs).

Dalam menentukan parameter model tersebut, penulis menggunakan data MASW untuk mendapatkan nilai Vs, Vp dan ketebalan lapisan. Selain MASW, dapat digunakan data log bor atau N-SPT yang ketelitiannya lebih tinggi namun karena pada penelitian ini data yang ada sangat terbatas sehingga digunakan data alternatif yaitu MASW. Untuk mencari Vp, penulis menggunakan rumusan  $V_p/V_s$ , dengan mengalikan Vs dikalikan 1.73. Sedangkan untuk parameter redaman gelombang P (Qp) dan redaman gelombang S (Qs) dibuat konstan. Berikut merupakan parameter yang penulis gunakan dalam proses inversi HVSR (Tabel 4.1).

Tabel 4. 1 Parameter Model Inversi HVSR

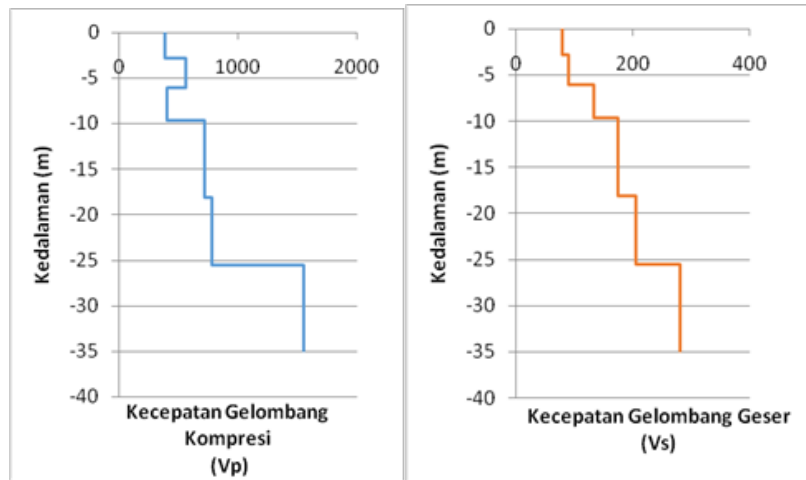
Vp	Vs	RHO	H	Qp	Qs
285.45	165	2.1	2.1	10	5
288.91	167	2.1	2.9	10	5
387.52	224	2.2	3.6	20	10
508.62	294	2.2	4.3	20	10
563.98	326	2.3	5	30	15
640.1	370	2.4	5.7	30	15
771.58	446	2.5	999	999	999

Model awal memiliki peranan penting dalam pengolahan inversi HVSR, semakin teliti nilai parameter yang ada didalamnya maka semakin baik pula hasil Inversi HVSR.

### 4.2.2. Nilai Vs dan Vp hasil Inversi HVSR

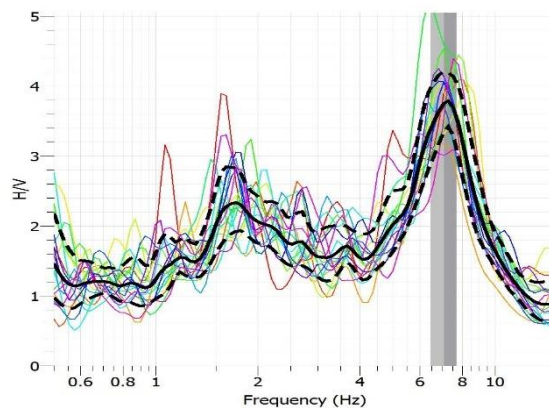
*Software* yang digunakan untuk pengolahan inversi HVSR yaitu Open HVSR [20]. Untuk menggunakan *software* ini membutuhkan *software* lain yaitu Matlab dengan minimum versi tahun 2010. Proses inversi dilakukan dengan memasukkan data observasi hasil pengolahan mikrotremor dan model awal. Hasil yang didapatkan dari inversi HVSR yaitu profile Vs dan Vp di titik

pengukuran HVSR. Berikut merupakan hasil inversi HVSR di titik Palu\_A\_22 penelitian sebelum gempabumi.



Gambar 4. 2 profil kecepatan gelombang P ( $V_p$ ) dan profil kecepatan gelombang geser ( $V_s$ )

Secara umum nilai  $V_s$  hingga kedalaman 30 meter berkisar antara 80 hingga 400 meter dan nilai  $V_p$  berkisar antara 300 hingga 1600.



**Gambar 4. 3 Spektrum HVSR**

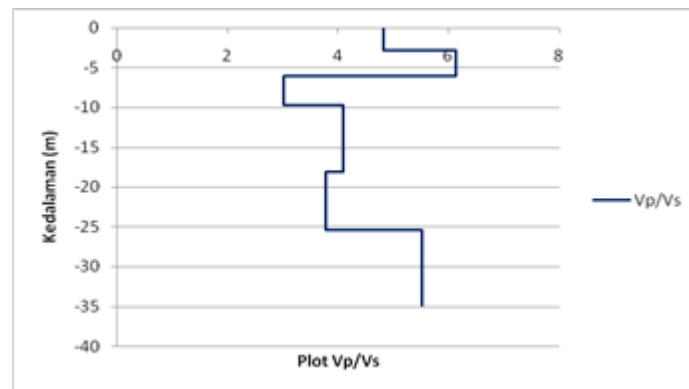
Hasil pengolahan spektrum ini disimpan dalam format .txt. Isi dari file tersebut yaitu nilai frekuensi dan H/V yang berfungsi sebagai model observasi untuk pengolahan inversi HVSR.

### 4.3. Penilaian Potensi Likuifaksi

#### 4.3.1. Penilaian Potensi Likuifaksi Berdasarkan $V_p/V_s$

Inversi kurva HVSR dilakukan terhadap data mikrotremor yang diambil sebelum kejadian gempabumi Palu 2018. Inversi kurva HVSR dipergunakan untuk mendapatkan nilai kecepatan gelombang geser ( $V_s$ ), kecepatan gelombang kompresi ( $V_p$ ) dan rasio  $V_p/V_s$ . Nilai  $V_p/V_s$  dapat dipergunakan salah satunya untuk analisis kerentanan suatu daerah terhadap bahaya likuifaksi.

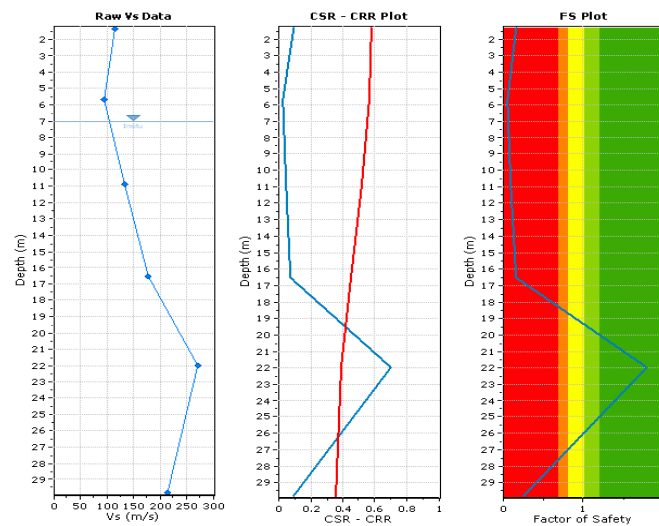
Hasil inversi HVSR di titik Palu\_A\_22 yang ditunjukkan pada Gambar. Profil kecepatan dari inversi HVSR menunjukkan  $V_p/V_s$  yang cukup tinggi pada lapisan atas mendekati permukaan. Dibawah lapisan tersebut nilai  $V_p/V_s$  mengalami penurunan. Nilai  $V_p/V_s$  bergantung pada porositas, kandungan lempung dan kejenuhan air [21], makin tinggi porositas dan kandungan lempung, makin tinggi nilai  $V_p/V_s$ .  $V_p/V_s$  lebih sensitif terhadap perubahan porositas [21][22]. Berdasarkan hal tersebut, dapat dianalisis bahwa lapisan dengan nilai  $V_p/V_s$  yang sangat tinggi ( $>6$ ) mengandung lempung yang cukup tinggi dan jenuh air, sedangkan pada lapisan dengan nilai  $V_p/V_s$  3 hingga 6 mengindikasikan lapisan pasir urai yang jenuh air. Lapisan-lapisan jenuh air di dekat permukaan yang berkorelasi dengan nilai  $V_p/V_s$  yang sangat tinggi ini berpotensi mengalami likuifaksi ketika terkena guncangan gempabumi yang cukup kuat.



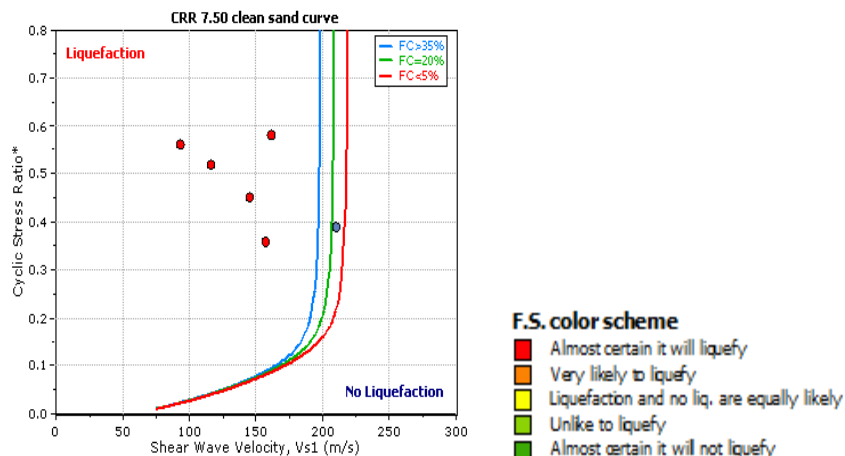
Gambar 4. 4 Plot  $V_p/V_s$  pada titik Palu\_A\_22

#### 4.3.2. Penilaian Potensi Likuifaksi Menggunakan Software LiqVs

Penilaian potensi likuifaksi dalam penelitian kali ini menggunakan *software* LiqVs. Parameter-parameter yang digunakan dalam pengolahan ini berupa kedalaman muka air tanah dengan kedalaman 7 meter [23], besar magnitudo gempa bumi 7.4 dan percepatan tanah maksimum yang telah dihitung menggunakan metode Chiou- Youngso [24] NGA didapatkan hasil 0.45 g. Contoh dari hasil pengolahan menggunakan *software* LiqVs ditunjukkan pada Gambar 4.5 – Gambar 4.7.



Gambar 4. 5 Plot grafik Vs, CSR-CRR dan FS



Gambar 4. 6 Plot grafik CRR

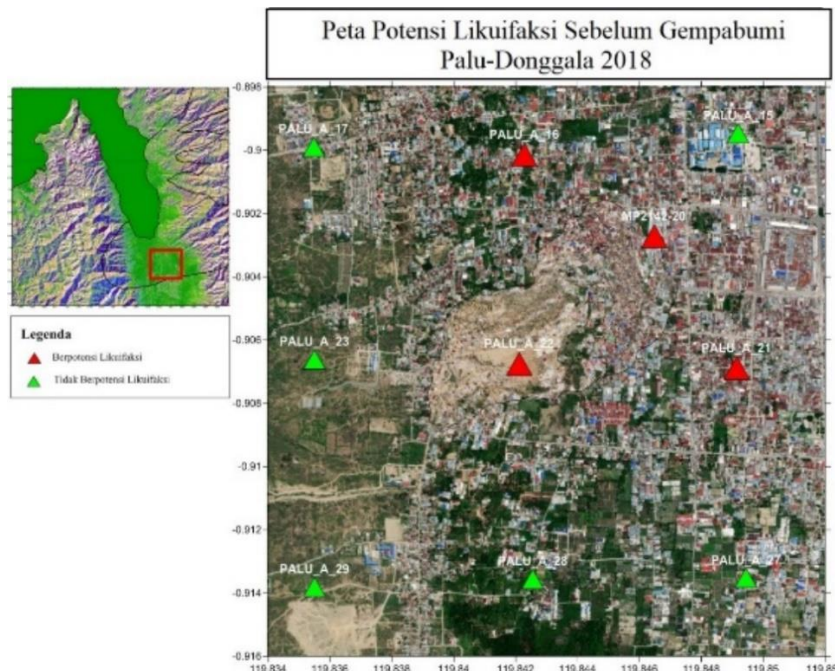
:: Cyclic Stress Ratio calculation (CSR fully adjusted and normalized) ::

Depth (m)	Unit Weight (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma_{v,eq}$ (kPa)	$U_{o,eq}$ (kPa)	$\sigma'_{vo,eq}$ (kPa)	$r_d$	$\alpha$	CSR	MSF	$CSR_{eq,M=7.5}$	$K_{sigma}$	CSR*	FS
1.33	19.00	25.27	13.05	12.22	0.99	1.00	0.600	1.03	0.580	1.00	0.580	0.168 ●
5.69	19.00	108.11	55.82	52.29	0.96	1.00	0.581	1.03	0.561	1.00	0.561	0.052 ●
10.88	19.00	206.72	106.73	99.99	0.89	1.00	0.536	1.03	0.518	1.00	0.518	0.088 ●
16.53	19.00	314.07	162.16	151.91	0.71	1.00	0.430	1.03	0.415	0.92	0.451	0.165 ●
22.00	19.00	418.00	215.82	202.18	0.58	1.00	0.351	1.03	0.339	0.87	0.390	1.788 ●
29.79	19.00	566.01	292.24	273.77	0.50	1.00	0.304	1.03	0.294	0.82	0.359	0.254 ●

Gambar 4. 7 Hasil perhitungan CSR

- $\sigma_{v,eq}$  : tekanan overburden total pada titik uji, selama gempabumi (Kpa)
- $U_{o,eq}$  : tekanan air di titik uji, saat gempa (Kpa)
- $\sigma'_{vo, eq}$  : tekanan efektif overburden, selama gempabumi (Kpa)
- $r_d$  : faktor nonlinier massa geser
- $\alpha$  : faktor peningkatan karena kolom batu
- CSR : Cyclic Stress Ratio
- MSF : Magnitude Scaling Factor
- $CSR_{EQ, M=7.5}$  : CSR menyesuaikan untuk M=7.5
- $K_{sigma}$  : faktor stress efektif overburden
- CSR\* : CSR yang disesuaikan (penerapan FS)
- FS : Faktor safety yang sudah terkalkulasi
- \*\*\* FS : 1.00

Hasil pengolahan menggunakan *software* LiqVs menunjukkan bahwa di titik Palu\_A\_22 wilayah Balaroa memiliki potensi likuifaksi. Dilihat dari grafik FS, potensi likuifaksi mencapai kedalaman 17 meter yang ditunjukkan dengan warna merah. Hasil pengolahan menggunakan *software* LiqVs ini berkorelasi dengan hasil perbandingan  $V_p/V_s$ . Keduanya sama sama menunjukkan bahwa titik Palu\_A\_22 memang berpotensi likuifaksi.

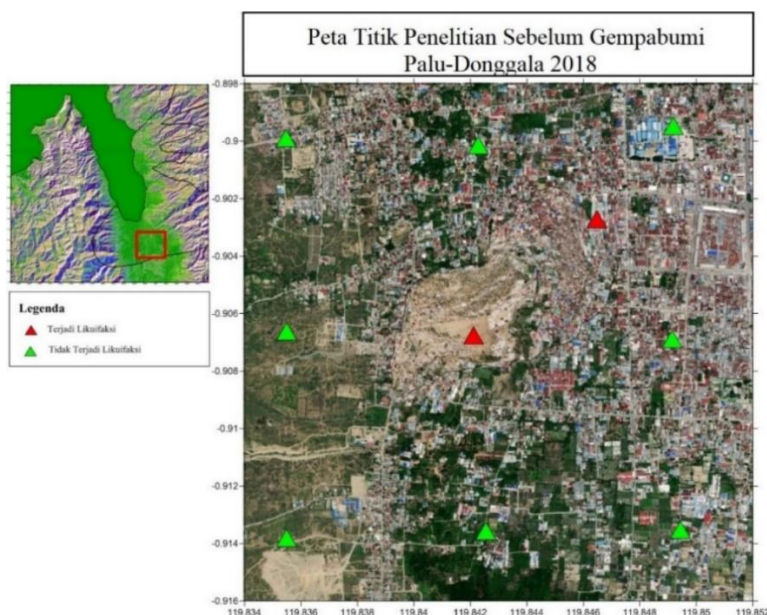


Gambar 4. 8 Peta potensi likuifaksi sebelum gempabumi Palu-Donggala 2018

Analisis gabungan menggunakan  $V_p/V_s$  dan *software* LiqVs selanjutnya ditunjukkan pada Gambar 4.8. Segitiga warna merah menunjukkan bahwa daerah tersebut berpotensi likuifaksi berdasarkan analisis gabungan  $V_p/V_s$  dan *software* LiqVs, sementara segitiga warna hijau menunjukkan area tersebut tidak berpotensi likuifaksi. Dari 10 titik yang dilakukan analisis, diketahui 4 titik yang berpotensi likuifaksi meliputi titik Palu\_A\_16, Palu\_A\_21, Palu\_A\_22 dan MP2142-20, sedangkan 6 lainnya tidak berpotensi mengalami likuifaksi.

#### 4.4. Verifikasi Hasil Analisis Dengan Fakta Lapangan

Hasil analisis gabungan menggunakan pendekatan  $V_p/V_s$  dan *software* LiqVs selanjutnya diverifikasi menggunakan fakta lapangan. Gambar 4.9 menunjukkan fakta lapangan terkait kejadian likuifaksi akibat gempa bumi Palu-Donggala 2018. Segitiga warna merah menunjukkan bahwa daerah tersebut mengalami likuifaksi, sementara segitiga warna hijau menunjukkan area tersebut tidak mengalami likuifaksi. Terdapat dua titik yang berpotensi terjadi likuifaksi namun dalam kejadian gempa bumi Palu-Donggala 2018 tidak mengalami likuifaksi yaitu titik Palu\_A\_16 dan Palu\_A\_21. Hal ini kemungkinan karena pada kedua titik ini memang benar berpotensi likuifaksi namun masih dalam tahap likuifaksi yang ringan. Misal, likuifaksinya hanya berupa semburan lumpur ke permukaan tanah ataupun pergeseran tanah [15].

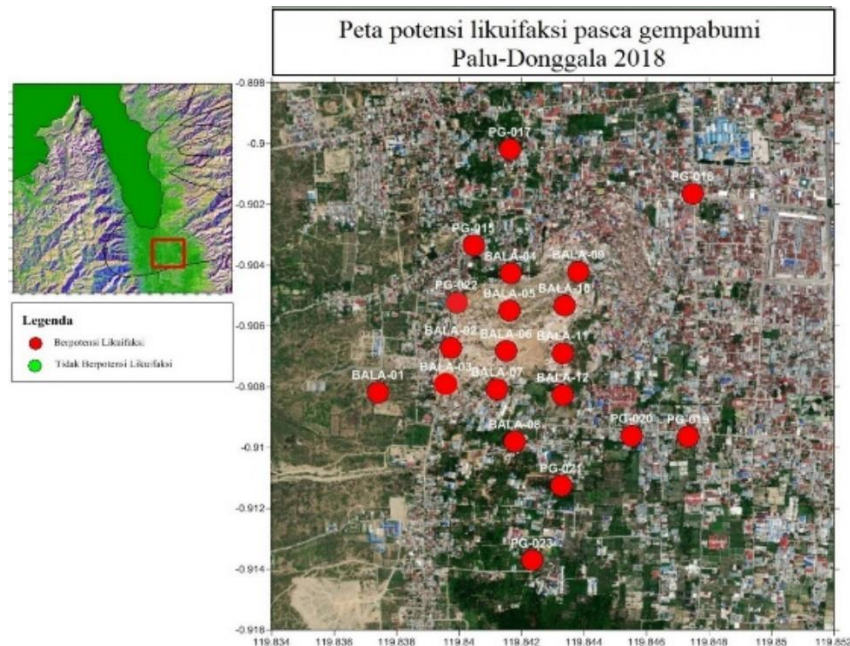


Gambar 4. 9 Peta kejadian likuifaksi saat gempabumi Palu-Donggala 2018

#### 4.5. Analisis Potensi Likuifaksi Pasca Kejadian Gempabumi Palu 2018

Pengukuran mikrotremor telah dilakukan pasca kejadian gempa bumi dan likuifaksi di Palu. Hasil analisis potensi likuifaksi menggunakan pendekatan  $V_p/V_s$  dan *software* LiqVs ditunjukkan pada Gambar 4.10. Titik warna merah menunjukkan berpotensi likuifaksi dan titik warna hijau menunjukkan tidak berpotensi likuifaksi. Dari 20 titik penelitian, terdapat titik yang tidak mengalami potensi likuifaksi pada titik PG-022. Hasil tersebut didasarkan pada nilai  $V_p/V_s$  yang rendah ( $<3$ ) dan plot FS menunjukkan bahwa titik tersebut tidak berpotensi likuifaksi.

Hasil analisis data pasca kejadian gempa bumi dan likuifaksi menunjukkan potensi likuifaksi meluas yaitu pada titik PG-15, PG-17, PG-18, PG-19, PG-20 PG-21, PG-22, PG-23, Bala-01 dan Bala-08. Hal ini dikarenakan kerusakan struktur tanah setelah likuifaksi. Kemungkinan tanah menjadi tidak stabil seperti sebelumnya karena terciptanya rongga-rongga tanah yang mudah terisi dengan air. Dengan begitu, apabila tanah yang tidak stabil tadi terkena guncangan gempa bumi dengan magnitudo yang besar memiliki kemungkinan untuk terulang kembalinya bencana likuifaksi. Tanah yang tidak stabil ini sudah sepatutnya untuk tidak kembali dijadikan sebagai pemukiman, pusat pemerintahan dan tidak dibangun infrastruktur yang sifatnya permanen.



Gambar 4. 10 Peta potensi likuifaksi pasca gempabumi Palu-Donggala 2018

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1. Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengolahan data, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

- Hasil pengolahan data sebelum gempabumi Palu-Donggala 28 September 2018 menggunakan metode  $V_p/V_s$  dan *software* analisis likuifaksi  $LiqsVs$ , dapat diketahui bahwa wilayah Balaroa memiliki potensi likuifaksi. Kedua metode ini dapat digunakan sebagai metode untuk penilaian potensi likuifaksi, ditinjau dari korelasi dan kesamaan hasil pengolahan data yang menunjukkan bahwa daerah Balaroa berpotensi likuifaksi. Dari 10 titik yang dilakukan analisis, terlihat 4 titik yang berpotensi likuifaksi meliputi titik Palu\_A\_16, Palu\_A\_21, Palu\_A\_22 dan MP2142-20.
- Hasil pengolahan data setelah terjadinya gempabumi dan likuifaksi tidak menyurutkan potensi terjadinya likuifaksi melainkan potensi terjadinya likuifaksi kembali mengalami perluasan yaitu di titik PG-15, PG-17, PG-18, PG-19, PG-20, PG-21, PG-22, PG-23, Bala-01 dan Bala-08. Penyebab meluasnya potensi likuifaksi disebabkan karena tanah yang terguncang gempabumi menjadi tidak stabil seperti sebelumnya karena terciptanya rongga antar partikel tanah sehingga mudah dimasuki oleh air.

### 5.2. Saran

- Tiap kota di Indonesia harus dipetakan tingkat kerawanan bencananya. Salah satu contohnya yaitu pemetaan daerah rawan bencana likuifaksi yang harus terus dilakukan dan diperbaharui, mengingat aktifitas seismik di Indonesia yang sangat aktif juga pembangunan infrastruktur yang semakin meningkat membuat struktur tanah akan berubah dan memungkinkan untuk terjadinya bencana likuifaksi.
- Setelah dilakukannya pemetaan, hindari pembangunan infrastruktur di daerah yang telah divonis berpotensi likuifaksi maupun yang memiliki sejarah bencana likuifaksi seperti Balaroa, Palu. Perlu juga dilakukan relokasi bagi daerah yang terlanjur mendirikan bangunan permanen di daerah berpotensi likuifaksi untuk meminimalisir kerugian akibat bencana.
- Masyarakat Indonesia perlu memahami dan menyadari bahaya dari bencana dengan menapak tilas sejarah bencana yang pernah terjadi juga memahami kerugian yang ditimbulkan. Hasil yang diharapkan dari penelitian ini dapat dijadikan untuk pertimbangan rencana tata ruang dan pembangunan kembali Balaroa, Palu.

## 6. PUSTAKA

- [1] Bidang Seismologi Teknik, “Ulasan Guncangan Tanah Akibat Gempabumi Utara Donggala,” 2018.
- [2] M. Irsyam *et al.*, “Ringkasan Hasil Studi Tim Revisi Peta Gempa Indonesia 2010,” 2010. Accessed:
- [3] I. M. Idriss, R. W. Boulanger, and Earthquake Engineering Research Institute, “Soil liquefaction during earthquakes,” p. 237.
- [4] W. . Marcuson, “Definition of Term Related to Liquefaction,” *J. Geotech. Eng.*, vol. III, pp. 1197–2000, 1978.
- [5] E. Soebowo, A. Tohari, and D. Sarah, “Potensi Likuifaksi Akibat Gempabumi Berdasarkan Data CPT dan N-SPT Di Daerah Patalan Bantul, Yogyakarta,” *J. Ris. Geol. dan Pertamb.*, vol. 19, no. 2, p. 85, Oct. 2009, doi: 10.14203/RISETGEOTAM2009.V19.25.
- [6] R. D. Andrus and K. H. Stokoe II, “Liquefaction Resistance of Soils from Shear-Wave Velocity,” *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 126, no. 11, pp. 1015–1025, Nov. 2000, doi: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2000)126:11(1015).
- [7] K. Kayabali, “Soil liquefaction evaluation using shear wave velocity,” *Eng. Geol.*, vol. 44, no. 1–4, pp. 121–127, Oct. 1996, doi: 10.1016/S0013-7952(96)00063-4.
- [8] T. Imai and K. Tonouchi, “Correlation of N value with S-wave velocity and shear modulus,” *Penetration testing. Proc. 2nd Eur. Symp. Amsterdam, 1982*, pp. 67–72, 1982, doi: 10.1201/9780203743959-11.
- [9] Daryono, “Tataan Tektonik Dan Sejarah Kegempaan Palu, Sulawesi Tengah,” 2011. Badan Meteorologi Klimatologi dan Geofisika.
- [10] W. B. Hamilton, “Tectonics of the Indonesian region,” *Prof. Pap.*, 1979, doi: 10.3133/PP1078.
- [11] M. Irsyam *et al.*, *Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017*. Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat, 2017.
- [12] R. Sukamto and *et. al.*, “Peta Geologi Tinjau Lembar Palu, Sulawesi 1:250,000 = Reconnaissance Geological Map of the Palu Quadrangle, Sulawesi.” Pusat Penelitian dan Pengembangan Geologi, Bandung, 1973.
- [13] I. Towhata, “Geotechnical Earthquake Engineering,” 2008, doi: 10.1007/978-3-540-35783-4.
- [14] J. P. Rafferty, “Soil Liquefaction,” *Encyclopedia Britannica*, 2021. [www.britannica.com/science/soil-liquefaction](http://www.britannica.com/science/soil-liquefaction) (accessed Feb. 20, 2019).
- [15] R. B. Seed, K. O. Cetin, R. E. S. Moss, A. M. Kammerer, and J. Wu, “Recent Advances in Soil Liquefaction Engineering and Seismic Site Response Evaluation ,” 2001.
- [16] W. Pawirodikromo, *Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan Pustaka Pelajar*. Yogyakarta: Pustaka Pelajar, 2012.
- [17] N. York *et al.*, *Geotechnical Earthquake Engineering Handbook*. McGraw-Hill Education, 2002.
- [18] S. Prakash, *Soil dynamics*. New York: McGraw-Hill, 1981.
- [19] Stasiun Geofisika Kelas I Palu, “Peta Guncangan Gempabumi Tanggal 28 September 2018.” 2018.
- [20] S. Bignardi, A. Mantovani, and N. Abu Zeid, “OpenHVSr: Imaging the subsurface 2D/3D elastic properties through multiple HVSr modeling and inversion,” *Comput. Geosci.*, vol. 93, pp. 103–113, Aug. 2016, doi: 10.1016/J.CAGEO.2016.05.009.
- [21] D. H. Han, A. Nur, and D. Morgan, “Effects of porosity and clay content on wave velocities in sandstones,” *Geophysics*, vol. 51, no. 11, pp. 2093–2107, 1986, doi: 10.1190/1.1442062.
- [22] J. P. Castagna, M. L. Batzle, and R. L. Eastwood, “Relationships between compressional-wave and shear-wave velocities in clastic silicate rocks,” *GEOPHYSICS*, vol. 50, no. 4, 1985,
- [23] Badan Geologi, *Di Balik Pesona Palu Bencana Melanda Geologi Menata*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2018.
- [24] B. S. J. Chiou and R. R. Youngs, “Update of the Chiou and Youngs NGA Model for the Average Horizontal Component of Peak Ground Motion and Response Spectra:,”

*<https://doi.org/10.1193/072813EQS219M>*, vol. 30, no. 3, pp. 1117–1153, Aug. 2014, doi:  
10.1193/072813EQS219M.