

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Secara geografis, Indonesia merupakan wilayah yang rawan akan bencana alam seperti gempa. Sulawesi Tengah adalah salah satu kawasan seismik aktif di Indonesia. Tingginya tingkat aktivitas kegempaan di Sulawesi Tengah tidak lepas dari ketiga lempeng tektonik yaitu Indo-Australia, Eurasia dan Pasifik. Pertemuan ketiga lempeng ini bersifat konvergen dan bertumbukan secara relatif mengakibatkan daerah Sulawesi Tengah dan sekitarnya memiliki Tingkat kegempaan yang cukup tinggi (Nasrullah et al., 2019).

Kota Palu adalah salah satu daerah yang terdapat patahan kerak bumi berdimensi cukup besar yaitu sesar Palu Koro. Sesar Palu Koro memanjang sekitar 500 Km mulai dari Selat Makassar – Pantai Utara Teluk Bone. Pergerakan sesar Palu Koro menyebabkan terjadinya gempa bumi, seperti yang terjadi di Kota Palu pada tanggal 28 September 2018 berkekuatan 7.5 SR berpusat di 26 Km utara Kabupaten Donggala dan 80 Km barat laut Kota Palu dengan kedalaman 10 Km (Indra Purnama, 2019). Pratama et al., (2022) menyatakan bahwa beberapa saat setelah guncangan gempa di Kota Palu mereda, terjadi fenomena pencairan tanah atau likuifaksi di daerah Petobo dan Balaroa. Likuifaksi yang terjadi membuat ratusan bangunan amblas dan terkubur masuk ke dalam tanah.

Menurut Kramer, (1996) likuifaksi terjadi apabila tegangan geser yang diperlukan untuk keseimbangan statis suatu massa tanah (tegangan geser statis) lebih besar daripada kuat geser tanah dalam keadaan cairan. Setelah dipicu, deformasi besar yang dihasilkan oleh likuifaksi sebenarnya didorong oleh tegangan geser statis. Subakti, H., & Renagustiarini, W., (2022) menyatakan bahwa likuifaksi adalah fenomena dimana tanah yang jenuh air kehilangan kekuatan dan kekakuan saat terjadi getaran kuat seperti gempa sehingga mengalami penurunan karena tidak mampu menopang beban di permukaan tanah, 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.

Mengidentifikasi area yang berpotensi mengalami likuifaksi adalah salah satu upaya mitigasi bencana yang dapat dilakukan untuk mengurangi efek likuifaksi. Metode geofisika yang dapat digunakan untuk melakukan ini adalah mikrotremor. Mikrotremor merupakan getaran konstan pada permukaan tanah yang diakibatkan oleh aktivitas makhluk hidup maupun fenomena alam seperti aliran sungai, angin, hujan, dan lain sebagainya. Pengukuran mikrotremor digunakan untuk mengetahui kondisi geologi dan ketebalan lapisan sedimen pada suatu wilayah (Hermawan et al., 2022)

Beberapa penelitian telah melakukan penelitian yang berkaitan dengan potensi likuifaksi salah satunya oleh (Jalil et al., 2021) tentang pengaruh *Pore Water Pressure* terhadap likuifaksi di Kota Palu dengan menggunakan data bor. Penelitian terhadap potensi likuifaksi dengan menggunakan mikrotremor di Daerah Balaroa belum pernah dilakukan. Oleh karena itu, penulis membuat satu penelitian tentang analisis potensi likuifaksi berdasarkan nilai *Pore Water Pressure* dengan menggunakan mikrotremor di Daerah Balaroa untuk mengetahui potensi likuifaksi pada saat terjadi gempa bumi.

1.2 Ruang Lingkup

Adapun ruang lingkup yang membatasi penelitian ini yaitu pada pengambilan data primer berupa data pengukuran mikrotremor di 4 (empat) titik yang tersebar di kecamatan Palu Barat. Penelitian ini mengelola data mikrotremor dengan menggunakan *software Geopsy* untuk memperoleh eliptisitas gelombang *Rayleigh* yang diekstraksi dari spektrum *ambient noise* dan *software Deepsoil* untuk memperoleh nilai rasio tekanan air pori (*Pore Water Pressure*).

1.3 Tujuan dan Manfaat

1.3.1 Tujuan

1. Mengestimasi profil v_s berdasarkan kurva eliptisitas gelombang *Rayleigh*
2. Menganalisis potensi likuifaksi per lapisan dengan berdasarkan nilai rasio tekanan air pori

1.3.2 Manfaat

Hasil dari penelitian yang dilakukan diharapkan dapat memberikan manfaat berupa informasi bagi akademisi yang tertarik mempelajari potensi likuifaksi berdasarkan nilai tekanan air pori yang diperoleh dari lapangan. Diharapkan juga dapat menambah pengetahuan mengenai penyebab terjadinya likuifaksi. Selain itu, penelitian ini juga diharapkan dapat digunakan sebagai data mitigasi dan sumber informasi mengenai potensi bencana likuifaksi di daerah Balaroa.

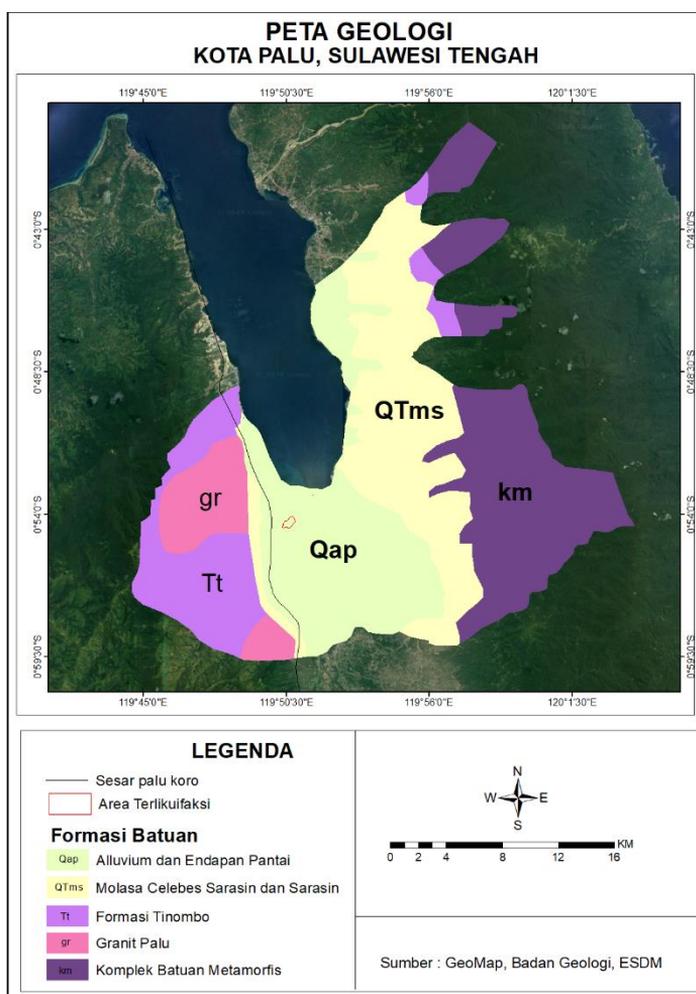
1.4 Landasan Teori

1.4.1 Kondisi Geologi Kota Palu

Berdasarkan **Gambar 1** peta geologi daerah penelitian terdiri dari 5 formasi batuan, yaitu alluvium dan endapan pantai (Qap), Molasa Celebes Serasin dan Serasin (QTms), Tinombo (Tt), Granit Palu (gr) dan Kompleks Batuan Metamorf (Km). Aluvium dan endapan Pantai (Qap) yaitu terdiri dari kerikil, pasir, lumpur dan batu gamping koral. Terbentuk dalam lingkungan sungai, delta dan laut dangkal. Material ini merupakan penyusun utama wilayah Lembah Palu. Kondisi batuan pada formasi ini umumnya berupa material yang belum mengalami kompaksi. Molasa Celebes Serasin dan Serasin (QTms) yaitu mengandung rombakan yang berasal dari formasi lebih tua dan terdiri dari konglomerat, batu pasir, batu gamping koral dan napal. Batuan ini merupakan penyusun utama material di wilayah pinggiran Kota Palu (Subakti, H., & Renagustiari, W., 2022). Formasi Tinombo terdapat di wilayah Kab.

Donggala, disusun oleh litologi berupa serpih, batu pasir, batu lanau, konglomerat, batuan vulkanik, batu gamping dan rijang. Granit Palu (gr) berasal dari formasi batu gamping dan batuan beku terdiri dari Kuarsa, Feldspar, dan Mika. Formasi Kompleks Batuan Metamorf terdapat di sekitar perbatasan timur Kota Palu dengan Kab. Parimo, batuan ini tersusun dari sekis dan genes (Sukanto, 1973).

Menurut klasifikasi zona gempa Indonesia, gempa yang terjadi di daerah Palu termasuk dalam tipe zona perubahan yang berarti bahwa dua lempeng tektonik bergerak sejajar tetapi berlawanan arah. Sesar Palu-Koro dan sesar Matano menyebabkan gempa pada kerak dangkal, yang terjadi di wilayah penelitian. Menurut USGS episentrum gempa di Kota Palu memiliki kedalaman kurang dari 150 Km, menjadikannya Lokasi gempa aktif di seluruh wilayah (Widyaningrum, 2012).



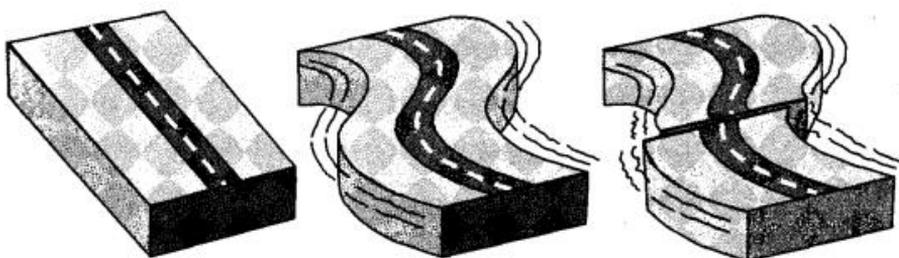
Gambar 1 Peta Geologi Kota Palu (Widyaningrum, 2012)

1.4.2 Gelombang Seismik

Gelombang seismik merupakan gelombang-gelombang yang merambat baik di dalam maupun di permukaan bumi yang berasal dari sumber seismik seperti gempa, ledakan, longsor, dan sebagainya. Gelombang seismik akan merambatkan energi dari sumber ke seluruh bagian bumi tentang sumber seismik maupun medium yang dilewatinya (Afnimar, 2009). Gelombang energi akibat gempa bumi dikelompokkan menjadi dua yaitu gelombang bodi dan gelombang permukaan. Gelombang bodi dibedakan lagi menjadi dua yaitu gelombang P dan gelombang S. Sedangkan gelombang permukaan dibedakan menjadi dua yaitu gelombang *Rayleigh* dan gelombang *love*. Gelombang permukaan mempunyai efek geser yang menyebabkan permukaan tanah bergerak secara horizontal baik yang sejajar maupun yang tegak lurus dengan arah rambatan. Gelombang permukaan inilah yang paling mengakibatkan kerusakan.

Penelitian ini menggunakan gelombang permukaan yaitu gelombang *Rayleigh* untuk mendapatkan kecepatan gelombang geser (v_s) terhadap kedalaman. Nilai kecepatan gelombang geser (v_s) dapat disajikan acuan untuk mengetahui sifat struktur bawah permukaan. Hal ini disebabkan karena gelombang *Rayleigh* akan mengalami dispersi pada setiap perambatan gelombang yang mengalami batas lapisan material bumi. Sehingga kecepatan gelombang geser dapat digunakan untuk menentukan kekuatan guncangan gempa, amplifikasi tanah, likuifaksi dan pemetaan kondisi bawah permukaan untuk bidang rekayasa. Semakin besar nilai kecepatan gelombang geser suatu lapisan, berarti kekakuan geser tanahnya semakin besar atau lapisan tersebut semakin keras dan padat (Talumepa et al., 2019).

Gelombang *Rayleigh* yang merambat di permukaan sebenarnya lebih kompleks karena sudah bercampur antara gelombang permukaan maupun pantulan gelombang primer dan gelombang sekunder. Mengingat gerakan partikel ini adalah kombinasi antara horizontal dan vertikal, gelombang ini dapat merambat pada medium cair. Sehingga amplifikasi gelombang sering terjadi maka hal ini akan semakin menambah kerusakan bangunan akibat gempa. Pada **Gambar 2** gelombang *Rayleigh* mempunyai pengaruh gerakan tanah secara horizontal sehingga dapat mengakibatkan deformasi permanen tanah arah horizontal yang sangat besar (Pawirodikromo, 2012).



Gambar 2 Pemodelan Pengaruh Gelombang *Rayleigh* (Pawirodikromo, 2012)

1.4.3 Mikrotremor dan Horizontal Vertical Time Frequency Analysis (HVTFA)

Mikrotremor juga dikenal sebagai *ambient noise*, yaitu getaran tanah dengan amplitudo tertentu yang diakibatkan oleh aktivitas makhluk hidup maupun fenomena alam dan dapat digunakan untuk mengetahui kondisi geologi dan ketebalan lapisan sedimen pada suatu wilayah (Hermawan et al., 2022). Permukaan bumi selalu bergerak pada frekuensi seismik setiap saat. Getaran konstan dari permukaan bumi ini dikenal sebagai mikroseismik atau mikrotremor. Amplitudo mikrotremor ini, umumnya sangat kecil dengan kisaran 10^{-4} hingga 10^{-2} mm. Aktivitas mikrotremor ini bervariasi dari waktu ke waktu (Ipmawan et al., 2019).

Salah satu metode yang dapat digunakan untuk menganalisis data hasil pengukuran mikrotremor yaitu metode *Horizontal Vertical Time Frequency Analysis* (HVTFA). Kurva elastisitas gelombang *Rayleigh* didapatkan dari data mikrotremor menggunakan HVTFA. Metode ini diterapkan untuk mengekstrak kurva eliptisitas gelombang *Rayleigh* dari data mikrotremor sekaligus mengurangi efek gelombang *love*, karena gelombang *love* hanya mempengaruhi komponen horizontal. Kurva *ellipticity* dapat digunakan untuk mendapatkan parameter kecepatan gelombang geser (v_s) pada titik penelitian melalui proses inversi. Penyelesaian proses inversi tergantung pada kemampuan untuk menentukan parameter dengan melakukan iterasi. Ketepatan proses ini dapat dilihat dari nilai misfit. Semakin rendah nilai misfit dari proses iterasi, maka profil kecepatan gelombang akan semakin baik (Syafitri et al., 2022). Representasi metode HVTFA dihitung menggunakan CWT (*Continuous Wavelet Transform*) untuk fungsi nyata $x(t)$ sehubungan dengan analisis *wavelet* $\psi(t)$ (Atashband, S., & Esfahanizadeh, M. 2013).

$$CWT_{\{x\}(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) \cdot dt \quad (1)$$

dimana parameter a merupakan parameter dilatasi dan b merupakan parameter translasi. Jika t adalah waktu, maka skala a berbanding terbalik dengan frekuensi dan b adalah parameter translasi dalam fungsi waktu. $x(t)$ adalah sinyal asli yang dianalisis sebagai fungsi waktu t . ψ^* adalah konjugat kompleks dari fungsi wavelet. $\frac{1}{\sqrt{|a|}}$ adalah faktor normalisasi agar transformasi bersifat energi invarian terhadap perubahan skala a . Fungsi $\psi(t)_{(a,b)}$ didefinisikan sebagai persamaan (2) dan dihasilkan dengan menskalakan dan mentranslasikan wavelet $\psi(t)$, membentuk sekumpulan wavelet, sedangkan lebar wavelet dalam domain waktu atau spektral adalah sebanding dengan a (Atashband, S., & Esfahanizadeh, M. 2013).

$$\psi(t)_{(a,b)} = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \psi \left(\frac{t-b}{a} \right), (a, b \in \mathfrak{R}, a \neq 0) \quad (2)$$

Selanjutnya representasi wavelet dari kedua komponen horizontal tersebut digabung menjadi satu (CWT_H) dengan persamaan sebagai berikut:

$$|CWT_H| = \sqrt{CWT_{NS}^2 + CWT_{EW}^2} \quad (3)$$

dimana CWT_{NS} dan CWT_{EW} adalah representasi kompleks dari CWT untuk semua komponen horizontal (Atashband, S., & Esfahanizadeh, M. 2013).

Algoritma yang terbentuk berupaya untuk meminimalkan misfit antara puncak frekuensi kurva pengukuran eliptisitas dan salah satu mode fundamental teoretis RWE (*Rayleigh Wave Ellipticity*) untuk setiap model yang dihasilkan, didapatkan variasi V_p , V_s , dan p terhadap kedalaman. Misfit antara puncak frekuensi observasi dan yang dimodelkan didefinisikan sebagai berikut (Layadi et al., 2018).

$$Misfit = \frac{(f)_{observed} - (f)_{modelled}}{(df)_{observed}} \quad (4)$$

dimana $(f)_{observed}$ adalah puncak frekuensi observasi, $(df)_{observed}$ adalah standar deviasi yang sesuai, dan $(f)_{modelled}$ adalah puncak frekuensi dari model fundamental *Rayleigh wave ellipticity*.

Parameter model awal mencerminkan karakteristik dinamis suatu tempat, seperti v_p , v_s , *poisson's ratio*, dan massa jenis batuan. Parameter input tersebut mempengaruhi proses iterasi pencocokan kurva atau pendekatan model dengan kondisi aktual. Semakin dekat nilai inialisasi dengan kondisi lapangan di wilayah studi, semakin baik model yang dihasilkan untuk mencari misfit minimum. Dari model awal ini, perhitungan misfit yang sesuai dilakukan menggunakan persamaan:

$$Misfit = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \left(\frac{D_i - M_i}{\sigma_i} \right)^2} \quad (5)$$

dimana N sebagai jumlah titik data, D_i adalah data hasil inversi, M_i adalah model struktur tanah, dan σ_i adalah standar deviasi dari data hasil inversi dengan $1 \leq i \leq N$. Jika nilai misfit yang dihasilkan masih tinggi (>1) maka perlu dilakukan perubahan pada parameter model awal. Hingga akhirnya, misfit dengan nilai terendah ($0 \leq misfit < 1$) akan dipilih sebagai model terbaik (Sunardi et al., 2018)

1.4.4 Likuifaksi dan *Pore Water Pressure* (Tekanan Air Pori)

Likuifaksi adalah proses kehilangan kekuatan tanah karena tegangan air pori meningkat dan tekanan efektif turun dari lapisan tanah akibat gempa. Parameter gempa termasuk magnitudo gempa, energi yang dilepas pada fokus gempa tektonik karena deformasi lempeng, durasi atau lama gempa, dan percepatan permukaan tanah. Semua parameter ini mempengaruhi likuifaksi, dimana likuifaksi terjadi pada pasir jenuh air yang berdiameter halus. Kekuatan likuifaksi dipengaruhi oleh kekuatan gempa, faktor air tanah, dan jarak antara lokasi yang berpotensi mengalami likuifaksi dan sumber gempa (Artati et al., 2020).

Ratode et al., (2021) menyatakan bahwa likuifaksi yang disebabkan oleh gempa bumi terdapat empat jenis kegagalan tanah, yaitu pertama, hilangnya daya dukung tanah; kedua pergerakan osilasi permukaan tanah dimana kemiringan permukaan tanah; ketiga penyebaran lateral dimana kemiringan permukaan tanah; empat gerakan tanah tipe aliran dimana kemiringan tanah.

Tekanan air pori (*Pore Water Pressure*) adalah tekanan air tanah yang berada di antara tanah atau batuan dalam celah (pori-pori) di antara partikel-partikel. Tekanan air pori dipengaruhi oleh jenis tanah, kondisi aliran air, dan ketinggian permukaan air. Tekanan air pori penting dalam rekayasa geoteknik karena mempengaruhi perilaku tanah, termasuk kekuatannya. Ketika tekanan air pori meningkat, kecepatan gelombang geser (v_s) cenderung menurun karena tanah menjadi lebih lemah dan kurang kaku. Ini karena tekanan air pori yang tinggi mengurangi kontak efektif antara partikel-partikel tanah. Likuifaksi terjadi pada tanah yang berpasir lepas dan jenuh air. Disebabkan oleh tegangan siklik yang terjadi selama gempa bumi, lapisan pasir akan berubah menjadi cairan dan tidak mampu menopang beban bangunan di dalam atau di atasnya (Subakti, H., & Renagustiari, W., 2022). Ketika tekanan air pori naik selama guncangan maka tegangan efektif akan berkurang seiring waktu. Kondisi ini dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\sigma'_v = \sigma_v - u \quad (6)$$

Dengan,

σ' = tegangan vertikal efektif (kPa)

σ = tegangan total vertical (kPa)

u = tekanan air pori (kPa)

Apabila tegangan total sama dengan tegangan air pori maka tegangan efektif menjadi nol. Karena tegangan efektif nol menunjukkan bahwa tidak ada kontak efektif antar butir. Sehingga keadaan butiran pasir benar-benar mengapung bebas dalam air, maka pasir pun menjadi seperti cair. Oleh karena itu, tanah tersebut tidak mampu menopang beban di atasnya dan menyebabkan bangunan amblas, miring bahkan runtuh. Selain itu, setelah butiran pasir yang kehilangan kekuatannya akan mengendap secara cepat karena massa jenisnya yang lebih besar dibandingkan air (Towhata, 2008).

1.4.5 Analisis Respons Situs *Nonlinear*

Deepsoil merupakan program analisis respons situs satu dimensi yang dapat melakukan analisis dominan waktu nonlinear 1-D dan tanpa pembangkitan tekanan air pori. *Deepsoil* adalah perangkat lunak yang mampu melakukan simulasi respon dinamis tanah berdasarkan input parameter yang diperoleh dari hasil inversi. Melalui simulasi ini, dapat diprediksi bagaimana perilaku tanah saat mengalami getaran akibat gempa, termasuk kemungkinan terjadinya peningkatan tekanan air pori yang dapat memicu likuifaksi (Hashash, 2020).

Analisis respon situs nonlinear menggunakan *Deepsoil* untuk menilai potensi likuifaksi dengan melibatkan perilaku tanah di bawah pengaruh gempa. Analisis *nonlinear* dipilih untuk profil lokasi dengan menggunakan model *Generalized/Hyperbolic* (GQ/H+PWP). Pemilihan model tanah GQ/H karena memiliki beberapa keunggulan yaitu dapat memberikan nilai modulus geser maksimum pada

regangan geser nol, tegangan geser maksimum saat regangan geser mendekati tak terhingga, serta dapat mengatur perilaku nonlinear pada kondisi batas. Model GQ/H memiliki kapasitas untuk menangkap perilaku tegangan geser regangan besar dari tanah untuk secara akurat memperkirakan Gerakan tanah permukaan pada regangan besar (Oktarina et al., 2023).

Model tekanan air pori mensimulasikan pembangkitan dan pembuangan tekanan air pori berlebihan selama pembebanan siklik. Untuk melakukan analisis tegangan efektif non-linear pada *software DeepSoil V7* menggunakan model PWP Vucetic/Dobry (Mei et al., 2018).

Tabel 1. Model dan Parameter Tekanan Air Pori (PWP) (Hashash, 2020)

PWP Model	Soil Type	Abb rev.	Model No:	Input						
				1	2	3	4	5	6	7
Vucetic/Dobry	Sand	S-M/D	1	f	p	F	s	γ_{tvf}	v	-
Matasovic	Clay	C-M	2	s	r	A	B	C	D	γ_{tvp}
GMP	Cohesiveless	GM P	3	α	D_r (%)	FC (%)	-	-	v	-
Park & ahn	Sand	P/A	4	α	β	D_{ru} =1.0	CSR _t	-	v	-
Generalized	any	G	5	α	β	-	-	-	V	-

Berdasarkan tanah pada lokasi penelitian, dipilih model PWP Vucetic/Dobry karena merupakan tanah berpasir. Model Vucetic dan Dobry yang diimplementasikan di *DeepSoil* yang awalnya dikembangkan oleh Dobry et al. dan dimodifikasi oleh Vucetic dan Dobry digunakan untuk memperkirakan pembangkitan tekanan air pori dan disipasi tanah yang digunakan dalam model seperti yang dinyatakan dalam Persamaan (7) (Hashash, 2020) :

$$r_u = \frac{p \cdot fN_c \cdot F \cdot (\gamma_c - \gamma_{tvp})^s}{1 + fN_c \cdot F \cdot (\gamma_c - \gamma_{tvp})^s} \quad (7)$$

dimana r_u adalah rasio tekanan air pori, p adalah parameter pemasangan dalam model PWP Vucetic/Dobry, fN_c adalah pembebanan siklik dalam model PWP Vucetic/Dobry, F adalah parameter pemasangan dalam model PWP Vucetic/Dobry, s adalah parameter pemasangan dalam model PWP Vucetic/Dobry, γ_{tvp} adalah regangan geser ambang batas.

Salah satu metode untuk menentukan potensi likuifaksi yaitu menggunakan Rasio tekanan air pori (*pore water pressure*). Nilai $r_u < 0.6$ menunjukkan bahwa

lapisan tersebut mengindikasikan bahwa tidak berpotensi likuifaksi, nilai r_u antara 0.6 - 0.7 mengindikasikan bahwa potensi likuifaksinya sedang, sedangkan nilai $r_u > 0.7$ mengindikasikan bahwa potensi likuifaksinya sangat tinggi (El Takch et al., 2016).

BAB II METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi Penelitian

Lokasi penelitian terletak di daerah Balaroo, Kota Palu, Sulawesi Tengah dengan koordinat $119^{\circ}49'50''$ E - $119^{\circ}51'10''$ E dan $0^{\circ}54'0''$ S - $0^{\circ}54'40''$ S. Kelurahan Balaroo adalah daerah terdampak likuifaksi yang dulunya merupakan daerah padat penduduk dengan kerapatan bangunan yang tinggi.



Gambar 3 Peta Lokasi Penelitian

2.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan dalam penelitian adalah sebagai berikut.

2.2.1 Alat

Alat yang digunakan dalam penelitian ini berupa perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*) sebagai berikut.

a. Perangkat Keras (*hardware*)

1. *Digital Portable Seismograph* tipe Q8
2. MBB-2 (*Miniature BroadBand Seismometer*)
3. Aki
4. *Global Positioning System* (GPS) yang terhubung dengan digitizer
5. *Global Positioning System* (GPS) tipe Garmin
6. Kompas

7. Laptop
 8. Lembar catatan akuisisi data mikrotremor
- b. Perangkat Lunak (*software*)
1. Q8
 2. *Geopsy 3.4* dan *Geopsy 3.2*
 3. *ArcGIS 10.8*
 4. *Microsoft Office 2021*
 5. *Deepsoil V.7*

2.2.2 Bahan

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini yaitu sebagai berikut.

1. Data primer berupa data mikrotremor sebanyak 4 titik di area Balaroa. Pengukuran dilakukan dengan durasi 80 menit.
2. Data sekunder berupa 3 data rekaman gempa (sumber gempa) mirip dengan gempa palu (Stasiun Amberley Tahun 2006)

2.3 Tahapan Penelitian

Prosedur kerja dalam penelitian ini dibagi menjadi beberapa tahapan yaitu tahap persiapan, tahap pengumpulan data, tahap pengolahan data, dan tahap interpretasi data.

2.3.1 Tahap Persiapan

Tahap persiapan meliputi studi literatur yang dilakukan untuk memahami teori yang mendukung penelitian ini dengan membaca berbagai referensi, penentuan titik pengukuran serta *software* pengolahan data yang akan digunakan.

2.3.2 Tahap Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan dengan melakukan pengukuran di lapangan (Data Primer). Jumlah titik yang digunakan yaitu sebanyak 4 titik yang tersebar di area penelitian. Data yang didapatkan tercatat pada 3 komponen seismogram, yaitu dua komponen horizontal (*North – South* dan *East-West*) dan satu komponen vertikal (*Up – Down*). Dalam melakukan pengukuran penting memperhatikan kondisi lingkungan sekitar untuk menghindari adanya gangguan dari aktivitas manusia maupun yang berasal dari alam. Dilakukan pengambilan data selama 80 menit setiap titik, dan format file yang didapatkan yaitu dalam bentuk format *trace*. Dari hasil pengukuran di lapangan didapatkan data getaran tanah dalam fungsi waktu (time domain).

2.3.3 Tahap Pengolahan Data

Pengolahan data mikrotremor dalam penelitian ini menggunakan metode *Horizontal Vertical Time Frequency Analysis* (HVTFA) pada *software Geopsy*. Tujuan dari metode ini adalah untuk mendapatkan kurva eliptisitas gelombang *Rayleigh*, yang menggambarkan hubungan antara gerakan partikel *horizontal* dan *vertical*. Kurva eliptisitas ini merupakan parameter penting dalam karakterisasi bawah permukaan tanah karena mencerminkan sifat dinamis tanah berdasarkan propagasi gelombang *Rayleigh*.

Setelah data mikrotremor diolah dengan *software Geopsy*, tahap selanjutnya dilakukan pengolahan data menggunakan *software max2curve*. *Software* ini digunakan untuk mengubah hasil analisis HVTFA menjadi kurva eliptisitas gelombang *Rayleigh* untuk proses inversi. Setelah kurva eliptisitas diperoleh, maka selanjutnya adalah inversi untuk mendapatkan profil kecepatan gelombang geser (v_s). Parameter model awal mencerminkan karakteristik dinamis pada suatu tempat seperti v_p , v_s , *passion ratio*, dan densitas batuan. Dalam penelitian ini, dilakukan iterasi untuk memperoleh kurva eliptisitas dengan nilai misfit terkecil. Setelah diperoleh hasil inversi kurva eliptisitas, maka didapatkan profil v_s permukaan untuk masing-masing titik. Nilai v_s digunakan sebagai parameter untuk menghitung tekanan air pori.

1. Perhitungan Kekuatan Geser Tanah

Kecepatan gelombang geser (v_s) digunakan sebagai parameter untuk menghitung tekanan air pori serta kekuatan geser tanah per lapisan. Perhitungan kekuatan geser tanah dilakukan secara empiris untuk mendapatkan kuat geser tanah per lapisan. Dengan menggunakan persamaan di bawah (Long, 2013) :

$$s_u(\text{kPa}) = 0.001 \cdot v_s^2(\text{m/s}) + 0.016 \cdot v_s(\text{m/s}) + 60.8 \quad (8)$$

Hasil perhitungan ini memberikan gambaran kekuatan geser tanah pada setiap lapisan tanah. Nilai kekuatan geser tanah ini penting untuk memahami bagaimana respon tanah terhadap beban dinamis.

2. Analisis Respon Situs Nonlinear Menggunakan Software Deepsoil V.7

Berdasarkan data profil kecepatan gelombang geser (v_s) dan kekuatan geser tanah yang diperoleh dari penelitian, data tersebut kemudian dimasukkan ke dalam *software Deepsoil V.7* yang dapat didownload melalui link <https://deepsoil.cce.illinois.edu/> untuk melakukan analisis respons situs nonlinear. Analisis ini menggunakan model *Generalized Quadratic/Hiperbolic (GQ/H+PWP)* yang dirancang untuk memodelkan karakteristik tanah saat terjadi gempa serta menghitung rasio tekanan air pori (r_u). Model ini memungkinkan simulasi perilaku tanah di bawah pengaruh gempa, dengan mempertimbangkan efek nonlinear. Selain itu, model ini juga menghitung rasio tekanan air pori, apabila nilai r_u yang lebih besar dari 0.6 menunjukkan adanya potensi likuifaksi.

Setelah memasukkan model GQ/H, langkah selanjutnya adalah memasukkan nilai PWP model sesuai dengan parameter yang tercantum dalam lampiran 1. Parameter PWP model yang digunakan adalah Vucetic/Dobry, yang sesuai dengan jenis tanah berpasir di wilayah penelitian.

Reduksi modulus dan kurva redaman tanah ditentukan dengan menggunakan model Darendeli untuk setiap lapisan pada kolom tanah. Prosedur MRDF (Modulus Reduction and Damping Factor) dengan alat pemasangan faktor reduksi Darandeli digunakan untuk mencocokkan kurva nonlinier empiris yang diperoleh dari model

tersebut. Perhitungan tekanan air pori ini dilakukan untuk setiap lapisan tanah dengan mempertimbangkan parameter tanah dan pengaruh getaran gempa. Hasil simulasi menghasilkan distribusi tekanan air pori terhadap waktu, yang kemudian digunakan untuk mengevaluasi potensi likuifaksi serta dampaknya terhadap stabilitas tanah selama gempa.

Sebagai langkah akhir, analisis dilakukan menggunakan data gempa dari Stasiun Amberley tahun 2006 dengan magnitudo 7.8 Mw. Data ini dipilih karena tidak terdapat data *waveform* percepatan gempa Palu 28 September 2018, maka digunakan data *waveform* percepatan gempa yang memiliki kesamaan karakteristik dengan dua gempa besar yang terjadi di Sulawesi Tengah dalam 30 tahun terakhir. Proses meminimalisir error dilakukan dengan menggunakan minimal 3 data gempa yang mendekati magnitudo gempa Palu 28 September 2018 dan memiliki kondisi geologi yang hampir mirip dengan Daerah Palu. Dari *software Deepsoil* didapatkan profil rasio tekanan air pori (PWP) pada masing-masing titik pengukuran.

2.3.4 Tahap Interpretasi Data

Interpretasi hasil pengolahan data mikrotremor pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui persebaran data dengan melihat hubungan antara hasil pengolahan data lapangan, seperti v_s , densitas bawah permukaan, dan kekuatan geser pada *software deepsoil*. Kemudian menganalisis nilai rasio tekanan air pori (PWP) untuk mengetahui potensi likuifaksi.

2.4 Bagan Alir Penelitian



Gambar 4 Bagan Alir Penelitian