

**ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI MENGGUNAKAN DATA CPT  
(*CONE PENETRATION TEST*) DI KOTA GORONTALO DENGAN  
METODE PERCEPATAN GEMPA *MC. GUIRE***

**SKRIPSI  
TEKNIK SIPIL**

**Ditujukan untuk memenuhi persyaratan  
Memperoleh gelar Sarjana Teknik**



**ARDYA PERDANI IKA SARI  
NIM. 155060101111026**

**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
MALANG**

**2020**





**LEMBAR PENGESAHAN**  
**ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI MENGGUNAKAN DATA CPT**  
**(CONE PENETRATION TEST) DI KOTA GORONTALO DENGAN**  
**METODE PERCEPATAN GEMPA MC. GUIRE**

**SKRIPSI**

**TEKNIK SIPIL**

Ditujukan untuk memenuhi persyaratan memperoleh gelar  
Sarjana Teknik



**ARDYA PERDANI IKA SARI**  
**155060101111026**

Skripsi ini telah di revisi dan disetujui oleh dosen  
pembimbing pada tanggal 6 Agustus 2020

Dosen Pembimbing I

Dr. Ir. Harimurti MT  
NIP. 19600926 198802 1 001

Dosen Pembimbing II

Dr. Eng. Ir. Yulvi Zaika, MT  
NIP. 19680210 199203 1 001



Mengetahui  
Ketua Program Studi

Dr. Eng. Ir. Indradi W., ST., M.Eng. (Pract)  
NIP. 19810220 200604 1 002



## PERNYATAAN ORISINALITAS SKRIPSI

Saya menyatakan dengan sebenar-benarnya bahwa sepanjang pengetahuan saya dan berdasarkan hasil penelusuran berbagai karya ilmiah, gagasan dan masalah ilmiah yang diteliti dan diulas di dalam Naskah Skripsi ini adalah asli dari pemikiran saya, tidak terdapat karya ilmiah yang pernah diajukan oleh orang lain untuk memperoleh gelar akademik di suatu Perguruan Tinggi, dan tidak terdapat karya atau pendapat yang pernah ditulis atau diterbitkan oleh orang lain, kecuali yang secara tertulis dikutip dalam naskah ini dan disebutkan dalam sumber kutipan dan daftar pustaka.

Apabila ternyata didalam naskah Skripsi/Tesis/Disertasi inidapat dibuktikan terdapat unsur-unsur jiplakan, saya bersedia Skripsi/Tesis/Disertasi dibatalkan, serta diproses sesuai dengan peraturan perundang-undangan yang berlaku (UU No. 20 Tahun 2003, pasal 25 ayat 2 dan pasal 70).

Malang, 24 juli 2020

Mahasiswa,



Ardy Perdani Ika Sari

NIM. 155060101111026

# TURNITIN



**UNIVERSITAS BRAWIJAYA  
FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM SARJANA**



## **SERTIFIKAT BEBAS PLAGIASI**

Nomor : 013/UN10.F07.11.11/PP/2020

Sertifikat ini diberikan kepada :

**ARDYA PERDANI IKA SARI**

Dengan Judul Skripsi :

**ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI MENGGUNAKAN DATA CPT  
(*CONE PENETRATION TEST*) DI KOTA GORONTALO  
DENGAN METODE PERCEPATAN GEMPA *MC. GUIRE***

Telah dideteksi tingkat plagiasinya dengan kriteria toleransi  $\leq 20\%$ , dan dinyatakan Bebas dari Plagiasi pada tanggal 29 September 2020



Ketua Jurusan Teknik Sipil

Dr. Eng. Ir. Alvafi Pujiraharjo, ST, MT  
NIP. 19700829 200012 1 001

Ketua Program Studi S1 Teknik Sipil

Dr. Eng. Indradi Wijatmiko, ST., M. Eng [Prac]  
NIP. 19810220 200604 1 002



## RINGKASAN

**Ardya Perdani Ika Sari**, Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik Universitas Brawijaya, Juli 2020, *Analisis Potensi Likuifaksi Menggunakan Data CPT (Cone Penetration Test) Di Kota Gorontalo Dengan Metode Percepatan Gempa Mc. Guire*, Dosen Pembimbing: Harimurti dan Yulvi Zaika

Indonesia merupakan salah satu negara yang mempunyai potensi tinggi terhadap terjadinya gempa bumi. Hal ini dikarenakan letak geografis Indonesia berada di jalur gempa teraktif di dunia karena dikelilingi oleh Cincin Api Pasifik (*Ring of Fire*) yaitu daerah sekeliling Samudra Pasifik yang sering terjadi gempa bumi dan letusan gunung api, selain itu Indonesia berdiri diatas tiga tumbukan lempeng benua. Satu dampak yang disebabkan oleh gempa bumi adalah fenomena hilangnya kekuatan lapisan tanah akibat getaran yang disebut dengan likuifaksi.

Gorontalo berada di wilayah dengan zona gempa tinggi sehingga analisis potensi likuifaksi penting dilakukan guna mengantisipasi terjadinya kerusakan yang parah akibat bencana tersebut. likuifaksi umumnya terjadi pada lapisan tanah jenis pasir lepas dan kondisi muka air tanah dangkal. Melihat beberapa syarat terjadinya likuifaksi yang juga dijumpai di wilayah Telkom Gorontalo, maka dilakukan perhitungan analisis potensi terjadinya likuifaksi pada wilayah tersebut menggunakan dari CPT (*Cone Penetration Test*).

Dari data CPT (*Cone Penetration Test*) dan data sejarah gempa yang pernah terjadi anantara tahun 2008-2019, kemudian dihitung parameter-parameter yang akan digunakan dalam evaluasi potensi likuifaksi. Parameter tersebut adalah *Cyclic Stress Ratio (CSR)* dan *Cyclic Resistant Ratio (CRR)*. Perhitungan CSR secara empiris kemudian dibandingkan dengan nilai CSR hasil perhitungan menggunakan software Geostudio, hal ini dilakukan guna mengetahui keakuratan perhitungan dari prosentasi perbedaan nilai CRR berdasarkan dua perhitungan tersebut. Pada lokasi penelitian terdapat dua titik yang ditinjau. Berdasarkan sejarah gempa didapat nilai PGA sebesar 71,695 gal dan menunjukkan tidak adanya lapisan tanah yang berpotensi terjadi likuifaksi. Perhitungan kemudian dilanjutkan dengan mengasumsikan besaran magnitude gempa menjadi 7,2 M dan 7,5 M didapatkan hasil perbandingan nilai CRR/CSR atau *safety factor* kurang dari 1 yang menunjukkan terjadi likuifaksi pada kedalaman tertentu.

Kata kunci : Likuifaksi, *Peak Ground Acceleration*, CRR, CSR

## SUMMARY

**Ardya Perdani Ika Sari**, *Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Brawijaya University, July 2020, Liquefaction Potential Analysis of Gorontalo City Using CPT (Cone Penetration Test) and Peak Ground Acceleration Analysis using Mc. Guire Method, Academic Supervisor: Harimurti and Yulvi Zaika*

*Indonesia is one of the countries that has a high potential for earthquakes. It is caused by the geographical of Indonesia is located in the most active earthquake line in the world or called by the Ring of Fire, which is the area around the Pacific Ocean which often occurs earthquakes and volcanic eruptions, in addition Indonesia stands on three collider continent plates. One impact caused by an earthquake is the phenomenon of loss of ground strength due to vibrations called the liquefaction.*

*Gorontalo is located in an area with high seismic zone, so the analysis of liquefaction is important to anticipate the occurrence of damage caused by the disaster. Liquefaction generally occurs in a loose sand type of soil layers and shallow ground water conditions that is also found in the region of Telkom Gorontalo.*

*In this Study, the liquefaction potential analysis is using CPT (Cone Penetration Test) data obtained previously. CPT and the history of earthquake that occurred between 2008-2019 in Gorontalo is used to calculate the CRR and CSR which is the parameters of Liquefaction analysis. Based on historical earthquake obtained value of PGA of 71,695 gal and not indicates a liquefaction. Calculations then proceed by assuming the magnitude of the earthquake to 7.2 M and 7.5 M showed the results of CRR/CSR or safety factor less than 1 which indicates happens liquefaction at a particular depth.*

**Keywords :** *Liquefaction, Peak Ground Acceleration, CRR, CSR*



## PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT atas berkah dan rahmat-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan Laporan Tugas Akhir. Adapun judul dari Tugas Akhir ini adalah

**”Analisis Potensi Likuifaksi Menggunakan Data CPT (*Cone Penetration Test*) Di Kota Gorontalo Dengan Metode Percepatan Gempa *Mc. Guire*”.**

Pada kesempatan ini tak lupa kami sampaikan ucapan terima kasih kepada :

1. Dr. Eng. Alwafi Pujiraharjo, ST., MT selaku ketua Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.
2. Dr. Eng. Indradi W., ST., M.Eng (Prac.) selaku ketua Prodi S1 Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Brawijaya Malang.
3. Dr. Ir. Harimurti, MT selaku Dosen Pembimbing I yang dengan segala kesabarannya membimbing sehingga penulis dapat menyelesaikan penyusunan Laporan Tugas Akhir ini.
4. Dr. Eng. Ir. Yulvi Zaika, MT selaku pembimbing II yang memberi segala bentuk masukan untuk penyusunan Laporan Tugas Akhir penulis.
5. Keluarga dan orang-orang tercinta yang telah memberikan dukungan moril dan materi dalam proses penyelesaian Laporan Tugas Akhir ini.
6. Teman-teman FORSIS yang tidak bisa penulis sebutkan satu persatu yang telah mengajarkan banyak hal selama ini.

Kami menyadari bahwa Laporan Tugas Akhir ini masih banyak kekurangan. Oleh karenanya saran dan kritik selalu kami terima agar tercapai hasil yang lebih baik berikutnya. Akhir kata, semoga Laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat sebagai referensi dan ilmu pengetahuan sipil pada umumnya.

Malang, 23 juli 2020

Penyusun



DAFTAR ISI

<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>ii</b>
<b>DAFTAR TABEL.....</b>	<b>iv</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN.....</b>	<b>vi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>1</b>
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Identifikasi Masalah.....	2
1.3 Rumusan Masalah.....	2
1.4 Batasan Masalah.....	2
1.5 Tujuan.....	3
1.6 Manfaat.....	3
<b>BAB II DASAR TEORI.....</b>	<b>5</b>
2.1 Likui-faksi.....	5
2.1.1 Definisi likuifaksi.....	5
2.1.2 Faktor-faktor yang mempengaruhi potensi likuifaksi.....	6
2.1.3 Bahaya yang disebabkan oleh likuifaksi.....	8
2.2 Teori Dasar Gempa bumi.....	9
2.3 Percepatan Gerakan Tanah ( <i>Peak Ground Acceleration</i> ).....	13
2.4 Karakteristik Tanah Dasar.....	16
2.5 Tegangan Dalam Tanah.....	17
2.6 Kekuatan Geser Tanah.....	20
2.7 Metode Untuk Mengevaluasi Potensi Likuifaksi.....	22
<b>BAB III METODE PENELITIAN.....</b>	<b>29</b>
3.1 Metode Pengumpulan Data.....	29
3.1.1 Metode dan Lokasi Pengumpulan Data Gempa.....	29

3.2	Metode Pengambilan data Lapisan Tanah .....	30
3.3	Variabel Penelitian.....	30
3.4	Tahapan Analisis Data .....	31
<b>BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN .....</b>		<b>33</b>
4.1	Data Pengujian Sondir dan Pemeriksaan Jenis Lapisan Tanah .....	33
4.2	Percepatan Gempa pada Permukaan Tanah Menggunakan Rumus <i>Mc.Guire</i> .....	37
4.3	Analisis Potensi Likuifaksi .....	41
4.3.1	Perhitungan Tegangan Vertikal Total ( $\sigma_v$ ) dan Tegangan Fertikal Efektif .....	41
4.3.2	Perhitungan CRR dan CSR pada Titik 1 .....	46
4.3.3	Perhitungan CRR dan CSR pada Titik 2 .....	50
4.3.3	Perhitungan FS dan analisis potensi likuifaksi.....	55
4.4	Analisis Perhitungan Kembali .....	57
4.4.1	Analisis Menggunakan Magnitude Gempa 7.5 SR .....	58
4.4.2	Analisis Menggunakan Magnitude Gempa 7.2 SR .....	61
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>		<b>65</b>
5.1	Kesimpulan .....	65
5.2	Saran .....	65
DAFTAR PUSTAKA		
LAMPIRAN		



DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 *The Estimation of Unit weight based soil description* ..... 33

Tabel 4. 2 Pemeriksaan jenis lapisan tanah pada titik bor 1 ..... 34

Tabel 4. 3 Pemeriksaan jenis lapisan tanah pada titik bor 2 ..... 35

Tabel 4. 4 perhitungan hiposentrum dan percepatan gempa ..... 38

Tabel 4. 5 Perhitungan tegangan vertikal total dan tegangan vertikal efektif pada titik bor 1 ..... 42

Tabel 4. 6 Perhitungan tegangan vertikal total dan tegangan vertikal efektif pada titik bor 2 ..... 45

Tabel 4. 7 Perhitungan CRR pada titik bor 1 ..... 48

Tabel 4. 8 Perhitungan CSR pada titik bor 1 ..... 49

Tabel 4. 9 Perhitungan CRR pada titik bor 2 ..... 52

Tabel 4. 10 Perhitungan CSR pada titik bor 2 ..... 54

Tabel 4. 11 Analisis potensi likuifaksi pada titik bor 1 ..... 55

Tabel 4. 12 Analisis potensi likuifaksi pada titik bor 2 ..... 56

Tabel 4. 13 Analisis potensi likuifaksi dengan PGA = 134,1984 gal pada titik 1 ..... 58

Tabel 4. 14 Analisis potensi likuifaksi dengan PGA = 134,1984 gal pada titik 2 ..... 59

Tabel 4. 15 Analisis potensi likuifaksi magnitude gempa 7,2 pada titik bor 1 ..... 62

Tabel 4. 16 Analisis potensi likuifaksi magnitude gempa 8 SR pada titik bor 2 ..... 63



**DAFTAR GAMBAR**

Gambar 2. 1 Ilustrasi efek likuifaksi ..... 9

Gambar 2. 2 Tiga Jenis Batas Lempeng (Plate Boundary)..... 11

Gambar 2. 3 Jarak horizontal dari pusat gempa ..... 15

Gambar 2. 4 Rentang Ukuran Partikel ..... 17

Gambar 2. 5 Interpretasi Tegangan Efektif ..... 18

Gambar 2. 6 Kriteria keruntuhan Mohr – Coulomb ..... 21

Gambar 2. 7 rd versus Depth Curves Developed by Seed and Idriss (1971) ..... 23

Gambar 2. 8 Kurva yang direkomendasikan untuk perhitungan CRR dari data CPT sepanjang data empiris likuifaksi dari gabungan sejarah kasus ..... 24

Gambar 2. 9 Grafik klasifikasi tanah berdasarkan qc dan Fr oleh Robertson ..... 26

Gambar 2. 10 Grain-Characteristic Correction Factor Kc for Determination of Clean-Sand Equivalent CPT Resistance ..... 28

Gambar 3. 1 Diagram Alir Penelitian ..... 30

Gambar 4. 1 Grafik klasifikasi tanah berdasarkan qc dan FR oleh Robertson ..... 33

Gambar 4. 2 Rekaman Gempa Gorontalo ..... 38



DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Data CPT di Wilayah Gedung Telkom Gorontalo Titik 1..... 72

Lampiran 2 Data CPT di Wilayah Gedung Telkom Gorontalo Titik 2..... 11

Lampiran 3 Data sejarah gempa kota gorontalo tahun 2008-2019 ..... 76

Lampiran 4 Perhitungan Epicenter Gempa..... 80



## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Gempa bumi adalah suatu gejala fisik bumi yang ditandai dengan adanya getaran dalam berbagai intensitas. Gempa bumi dapat disebabkan oleh beberapa hal akibat aktivitas vulkanik maupun aktivitas tektonik pada lempeng bumi. Indonesia merupakan salah satu negara yang mempunyai potensi tinggi terhadap terjadinya gempa bumi. Hal ini dikarenakan letak geografis Indonesia berada di jalur gempa teraktif di dunia karena dikelilingi oleh Cincin Api Pasifik (*Ring of Fire*) yaitu daerah sekeliling Samudra Pasifik yang sering terjadi gempa bumi dan letusan gunung api, selain itu Indonesia berdiri diatas tiga tumbukan lempeng benua yaitu lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia dan lempeng Pasifik. Lempeng Eurasia dan Australia saling menujam di lepas pantai barat pulau Sumatera, lepas pantai selatan Kepulauan Nusa Tenggara, lepas pantai selatan pulau Jawa, dan perairan Maluku selatan. Pertemuan antar lempeng Eurasia dan lempeng Pasifik terjadi di daerah kepala burung pulau Papua. Sementara pertemuan antar tiga lempeng Australia, Eurasia dan pasifik terletak di daerah sulawesi. Pergerakan lempeng-lempeng tersebut atau aktivitas gunung berapi akan memacu terjadinya gempa bumi, umumnya aktivitas ini terjadi setiap hari dan menimbulkan gempa namun dalam skala kecil dan tidak menimbulkan kerusakan. Gempa yang terjadi akan memberikan efek yang berbeda di setiap daerah bergantung pada kondisi tanah yang merespon di sekitar wilayah gempa tersebut. Pada jenis tanah non-kohefif yang memiliki kandungan muka air tanah tinggi, getaran akibat gempa dapat menyebabkan terjadinya likuifaksi.

Likuifaksi adalah kondisi dimana massa tanah mengalami kehilangan kekuatan mekanisnya akibat adanya kenaikan nilai tegangan air pori yang terjadi pada jenis tanah non-kohefif jenuh air pada saat mengalami beban dinamis atau beban gempa. Menurut Sladen dkk, (1985), Likuifaksi adalah suatu fenomena dimana massa tanah mengalami kehilangan nilai *shear resistance* karena adanya suatu kondisi yang bersifat monoton, berulang, siklik, dan beban yang mengagetkan (*shock loading*) sehingga bersifat seperti cairan yang mengalir hingga *shear stress*

yang terjadi pada massa tanah tersebut bernilai sama rendahnya dengan nilai berkurangnya *shear resistance*. Daerah dengan potensi likuifaksi akan berkemungkinan mengalami kerusakan yang cukup besar ketika mengalami gempa, oleh sebab itu para ahli mengembangkan beberapa metode empiris guna menganalisis potensi terjadinya likuifaksi akibat gempa. Analisis likuifaksi yang digunakan dalam laporan skripsi ini menggunakan uji sondir atau *Cone Penetration Test (CPT)* di Kota Gorontalo.

## 1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017, wilayah Indonesia dibagi menjadi 18 zona wilayah gempa berdasarkan percepatan puncak di batuan dasar. Gorontalo terletak pada wilayah 15, dimana percepatan puncak di batuan dasar pada wilayah ini senilai 1,2 - 1,5 g ( $1g = 9.8m/s$ ). Namun nilai percepatan ini tidak dapat digunakan di seluruh tanah di Kota Gorontalo, sebab nilai ini sangat dipengaruhi oleh sifat-sifat lapisan tanah.

Oleh karena itu perlu dilakukan perhitungan kembali terhadap nilai percepatan tanah, sebab hal ini sangat berpengaruh terhadap pembangunan fisik yang akan dilaksanakan di Kota Gorontalo.

## 1.3 Rumusan Masalah

1. Bagaimana potensi terjadinya likuifaksi di Kota Gorontalo berdasarkan data CPT (*Cone Penetration Test*)?
2. Bagaimana pengaruh besarnya magnitude gempa pada zona likuifaksi di Kota Gorontalo ?

## 1.4 Batasan Masalah

1. Pengambilan data tanah pada penelitian ini berada di wilayah Gedung Telkom Gorontalo.
2. Metode yang digunakan dalam analisis potensi likuifaksi adalah metode uji sondir atau CPT (*Cone Penetration Test*).
3. Tidak memperhitungkan penurunan tanah (*settlement*).



4. Menggunakan persamaan dari *Mc. Guire* dalam mencari besarnya percepatan tanah maksimum.

### 1.5 Tujuan

1. Mengetahui potensi terjadinya likuifaksi di Kota Gorontalo berdasarkan data CPT (*Cone Penetration Test*).
2. Mengetahui pengaruh besarnya magnitude gempa pada zona likuifaksi di Gedung Telkom Gorontalo.

### 1.6 Manfaat

Hasil penelitian dapat dijadikan referensi sebagai analisis bahaya dari likuifaksi yang terjadi di Kota Gorontalo, serta dapat digunakan dalam mengetahui nilai angka keamanan dan karakteristik dari tanah yang berpotensi terjadi likuifaksi.





Halaman ini sengaja dikosongkan



## BAB II

### DASAR TEORI

#### 2.1 Likuifaksi

Guncangan akibat pelepasan energi di dalam lapisan kerak bumi atau biasa disebut dengan gempa bumi banyak menyebabkan kerusakan di permukaan bumi akibat gelombang yang sampai pada permukaan berbahaya terutama di daerah yang difungsikan sebagai permukiman penduduk. Salah satu akibat dari guncangan dan penyisiran tanah pada suatu lokasi adalah terjadinya peristiwa likuifaksi. Proses ini dapat menyebabkan bangunan rusak, retak maupun runtuh, kerusakan bangunan akibat likuifaksi ini dikatakan sebagai kegagalan tanah.

Youd (1980) dan Kertapati (1998) meninjau dari beberapa kerusakan berat atau kerusakan total pada bangunan karena peretakan tanah akibat proses likuifaksi bahwa kerusakan ringan terjadi pada pergeseran tanah sejauh 50-100 mm, kerusakan yang memerlukan perbaikan ringan atau kerusakan sedang terjadi akibat pergeseran tanah sejauh 120-600 mm, dan kerusakan berat dengan pergeseran tanah sejauh lebih dari 760 mm. Tanah jenuh air dan bergradasi kasar atau tidak padat berpotensi tinggi terjadi likuifaksi akibat dari peningkatan tekanan air pori dan pengurangan tegangan efektif tanah, sekaligus juga mengurangi kekuatan geser tanah sehingga wujud tanah solid sebelumnya seolah-olah mencair seperti likuid atau cairan yang mengalir tidak mempunyai kekuatan

##### 2.1.1 Definisi likuifaksi

Likuifaksi adalah kondisi dimana tanah kehilangan kekuatan gesernya sehingga tanah berdeformasi dari wujud solid atau padat menjadi seperti cairan, hal tersebut disebabkan oleh adanya beban getar atau beban siklik yang cukup tinggi seperti beban gempa. Resiko likuifaksi tinggi pada tanah berjenis tanah pasir dengan tipe gradasi partikelnya adalah non-koheusif atau tidap padat, sehingga kondisi tanah jenuh dan menyebabkan pori-pori tanah terisi penuh oleh air. Pada tanah pasir jenuh air tersebut, kandungan air akan memberikan tekanan pada partikel tanah sehingga menyebabkan adanya ikatan pada partikel-partikel tanah tersebut. Sebelum

terjadinya gempa, tekanan air pori relatif rendah, namun guncangan dari gempa dapat memicu kenaikan tekanan air dalam tanah sampai pada titik dimana partikel-partikel tanah dapat saling bergerak atau kehilangan ikatannya.

Terjadinya beban dinamik, atau dalam kebanyakan kasus merupakan beban getar gempa, tanah pasir tersaturasi tersebut kemudian meningkatkan tegangan air pori di celah-celah partikel tanah pasir yang kemudian menyebabkan terpecahnya ikatan-ikatan antar tanah dan tanah tersebut kehilangan kuat gesernya dan tidak bisa menerima beban di atasnya.

Dua fenomena yang perlu diperhatikan terkait dengan likuifaksi adalah *flow liquefaction* dan *cyclic mobility*. Keduanya sangat penting untuk diperhatikan dalam mengevaluasi bahaya likuifaksi. *Flow liquefaction* merupakan peristiwa dimana terjadi aliran-aliran tanah. Hal ini terjadi apabila tekanan geser statis yang diperlukan untuk mencapai kesetimbangan pada suatu massa tanah jauh lebih besar daripada tegangan geser tanah dalam kondisi cair (*liquefied*). Dengan kata lain, deformasi yang terjadi merupakan akibat dari tekanan geser statik (*static shear stress*). Pada peristiwa *flow liquefaction* ini, terdapat dua karakteristik yang dapat dilihat yaitu kecepatan aliran dan perpindahan material tanah yang sangat besar.

*Cyclic mobility* merupakan fenomena lainnya yang juga dapat menyebabkan deformasi permanen yang sangat besar akibat adanya guncangan gempa. Berbeda dengan *flow liquefaction*, dalam *static mobility* kondisinya adalah tekanan geser statis lebih kecil dibandingkan dengan tegangan geser tanah cair (*liquefied*). Pada fenomena ini, deformasi yang terjadi diakibatkan oleh pembebanan siklik (*cyclic loading*) dan tekanan geser statis (*static shear stress*). Dalam hal ini, deformasi yang terjadi adalah deformasi lateral (*lateral spreading*).

Sejarah mencatat telah terjadi kasus likuifaksi di beberapa daerah di seluruh dunia, antara gempa di Alaska, AS (1964), Niigata, Jepang (1964), Loma Prieta, AS (1989), dan Kobe, Jepang (1995) tentunya hal tersebut mendasari adanya penelitian terkait likuifaksi yang bertujuan untuk proses waspada dari bahaya yang sama terjadi lagi.

### 2.1.2 Faktor-faktor yang mempengaruhi potensi likuifaksi

Perlu dipahami factor-faktor yang mempengaruhi potensi terjadinya

likuifaksi di suatu daerah, kondisi geologis di daerah tersebut sangat menentukan potensi terjadinya likuifaksi. tanah tersusun dari partikel-partikel pembentuk tanah. Seperti yang sebelumnya diketahui, tanah tersusun oleh partikel padat, partikel udara dan partikel air jika tanah tersebut jenuh. Setiap partikelnya berkaitan satu sama lain akibat adanya gaya berat dari partikel tanah, itulah yang disebut gaya antar partikel. Gaya antar partikel ini menyebabkan tanah stabil, tetap pada tempatnya dan dapat menahan beban yang ada di atas tanah, begitulah yang dimaksud dengan kekuatan tanah.

Likuifaksi terjadi ketika tanah berpasir jenuh air (tersaturasi) mengalami beban siklik atau beban dinamik yang terus menerus dalam kurun waktu tertentu. Sebab beban yang terjadi, air pada pori-pori tanah menekan ke segala sisi partikel tanah sehingga gaya antar partikel nya hilang kemudian tanah terurai atau pecah. Pada tahap selanjutnya, tegangan air pori akan sangat meningkat kemudian memecah kontak partikel tanah satu dengan yang lainnya kemudian tanah seolah-olah ikut mengalir dan kehilangan kekuatannya, beban yang berada di atas permukaan tanah pun kemudian ikut hanyut bersamaan dengan runtuhnya kekuatan tanah yang menopang beban tersebut. Peristiwa tersebut yang dinamakan dengan Likuifaksi

Beberapa factor yang berpengaruh terhadap potensi likuifaksi diantaranya yaitu gradasi partikel tanah, kepadatan tanah, umur deposit tanah, fabric, Riwayat tegangan nilai OCR (nilai *Over Consolidation Ratio*) kondisi tegangan insitu dan juga bentuk dari partikel tanah itu sendiri.

Kepadatan dari tanah pasir dapat dinyatakan dengan nilai *relative density* ( $D_r$ ). Semakin besar nilai  $D_r$  maka akan semakin besar tahanannya terhadap bahaya likuifaksi. Likuifaksi berpotensi tinggi terjadi pada tanah bergradasi seragam (uniformly graded soil), sementara tanah yang bergradasi baik (well graded soil) umumnya mempunyai tahanan terhadap likuifaksi lebih besar disebabkan karena partikel-partikel kecil yang terdapat pada tanah bergradasi baik dapat mengisi rongga yang ada diantara partikel yang besar, sehingga potensi untuk mengalami perubahan volume pada kondisi drain akan menjadi lebih kecil akibat *undrained loading*.

Umur deposit juga berpengaruh terhadap potensi likuifaksi. Akibat umur deposit semakin tua, tanah mengalami proses sementasi antar partikel yang

menyebabkan ketahanan terhadap likuifaksi semakin tinggi. Semakin besar pula nilai OCR menghasilkan nilai  $K_0$  semakin besar yang mana akan menaikkan tegangan efektif rata-rata tanah ( $\sigma'_{av}$ ). Tahanan terhadap likuifaksi akan meningkat dengan meningkatnya tegangan efektif *confining*. Oleh karena itu, daerah dengan tinggi muka air tanah atau *ground water table* semakin tinggi atau semakin dekat dengan permukaan tanah akan berpotensi lebih tinggi mengalami likuifaksi dibandingkan dengan daerah yang tinggi muka air tanahnya dalam.

Tanah dengan permukaan partikel yang halus akan mudah mengalami likuifaksi dibandingkan dengan tanah dengan permukaan partikel bersudut. Hal ini disebabkan tanah dengan permukaan partikel yang halus lebih mudah untuk terurai dari gaya antar partikelnya.

### 2.1.3 Bahaya yang disebabkan oleh likuifaksi

Likuifaksi hanya terjadi pada tanah yang tersaturasi, maka efeknya seringkali hanya diamati pada area yang dekat dengan badan air seperti sungai, danau, dan laut. Efek yang disebabkan oleh likuifaksi dapat berupa longsor besar ataupun terjadinya retakan – retakan pada tanah yang paralel dengan badan air, seperti kasus yang terjadi pada Montagua River, Guatemala (1976).

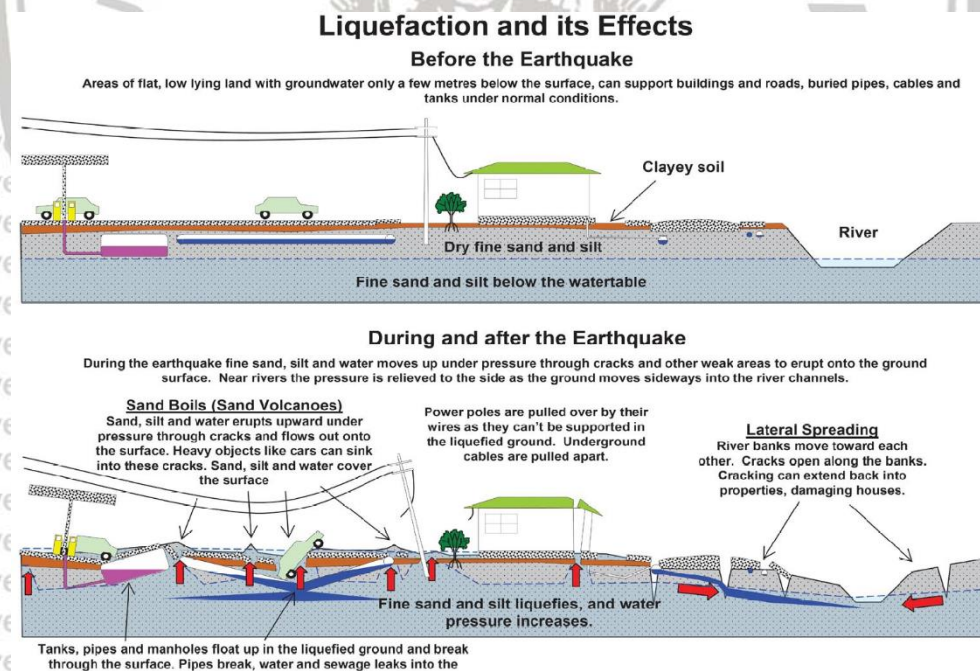
Terjadinya likuifaksi mengakibatkan kemampuan tanah menahan beban di atasnya berkurang, termasuk dalam ketahanan dalam menopang beban pondasi dari struktur di atasnya. Likuifaksi juga dapat memberikan tekanan yang besar pada dinding-dinding penahan tanah kemudian menggeser atau memiringkan dinding-dinding penahan tanah tersebut. Naiknya tekanan air pori juga dapat memicu terjadinya longsor (land slides).

Bangunan-bangunan yang perlu perhatian lebih dalam potensi likuifaksi diantaranya adalah Pelabuhan dan dermaga. Letaknya yang relatif berada pada area dekat badan air yang berpotensi terjadi likuifaksi. Pada umumnya, dermaga dan pelabuhan memiliki struktur dinding penahan yang sangat tinggi. Apabila tanah dibelakang dinding penahan tersebut mengalami likuifaksi, maka dapat terjadi kegagalan pada dinding penahan tanah tersebut sehingga dinding itu dapat bergeser, miring, atau bahkan runtuh.

Selain pada konstruksi Pelabuhan dan dermaga, likuifaksi juga seringkali

merusak jembatan yang melewati badan air. Pergerakan tanah pada peristiwa likuifaksi dapat menekan pondasi jembatan sehingga pondasi kehilangan kemampuannya menahan beban struktur kemudian jembatan kehilangan supportnya, atau menyebabkan terjadinya *buckling* pada pondasi jembatan. Perancangan dan pembangunan struktur tanah pasir di daerah dekat dengan badan air, baik itu sungai, laut ataupun lokasi dengan jenuh air akan membawa konsekuensi besar terjadi likuifaksi. Akibat jangka Panjang bisa dilihat dari kerugian moril dan materiil yang berpotensi terjadi Ketika pembangunan tersebut tidak memperhitungkan potensi likuifaksi yang mungkin terjadi. Bahayanya Ketika lokasi tersebut kemudian digunakan untuk daerah pemukiman tanpa adanya treatment khusus dalam penanganan likuifaksi.

Pada penelitian ini penulis lebih menekankan pada struktur bangunan Telkom grprntalo dimana Sebagian lapisan tanahnya adalah tanah pasir jenuh. Berikut adalah gambar yang mengilustrasikan efek dari likuifaksi



Gambar 2. 1 Ilustrasi efek likuifaksi

Sumber : *The Institution of Professional Engineers of New Zealand*

## 2.2 Teori Dasar Gempa bumi

### 2.2.1 Teori lempeng tektonik

Proses terjadinya gempa bumi dapat diketahui dari teori lempeng tektoning yang sudah dikembangkan sejak tahun 1960-an. Menurutny, permukaan bumi

terdiri dari lempeng-lempeng tektonik yang berlapis-lapis, bisa disebut juga sebagai lempeng *litosphere*, dengan masing-masing pelat memiliki karakteristik lapisan dan kerak yang lebih kaku dari lapisan terluarnya. Lempeng-lempeng tektonik ini aktif bergerak, sebabnya dari pergerakan lempeng tersebut terjadinya pelepasan energi yang menimbulkan getaran sampai ke permukaan tanah. Tekanan yang terkumpul akibat pergerakan lempeng tersebut kian membesar hingga tidak dapat lagi ditahan oleh pinggiran lempeng, proses itulah yang mengakibatkan terjadinya gempa. Yaitu saat adanya pelepasan energi akibat dari pergerakan lempeng-lempeng tektonik. Potensi gempa bumi semakin besar pada daerah yang dekat dengan pertemuan antar lempeng tektonik.

Batas lempeng (*plate boundaries*) dibedakan menjadi tiga jenis berdasarkan cara lempengan tersebut bergerak satu sama lain. Tiga jenis batas lempeng dimaksud yakni:

- **Batas Divergen (Divergent Boundaries)**

Batas Divergen terjadi ketika dua lempeng bergerak saling menjauhi satu sama lain. Magma panas yang keluar ke permukaan akibat pergerakan dua lempeng ini mengalami proses pendinginan dan membentuk punggung-punggung bukit. Gempa bumi yang terjadi akibat pembentukan punggung bukit ini hanya terjadi di sekitar puncak bukit, pada saat kerak baru terbentuk. Gempa ini relatif kecil dan terjadi pada kedalaman yang dangkal.

- **Batas Konvergen (Convergent Boundaries)**

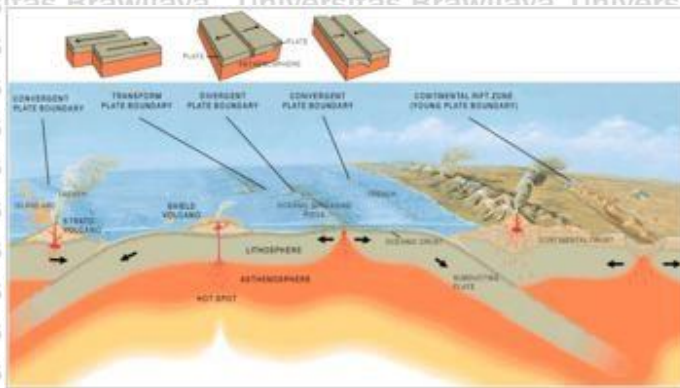
Batas Konvergen ini terjadi ketika dua lempeng bergerak bergesekan saling mendekati satu sama lain, berlainan dengan batas divergen pergerakan ini membentuk zona subduksi (*subduction zone*) ketika salah satu lempeng bergerak menyusup ke bawah permukaan lempeng satunya.

- **Batas Transform (Transform Boundaries)**

Batas Transform disebut Patahan (*Fault*) terjadi ketika lempeng bergerak dan saling mengalami gesekan satu sama lain dengan tanpa menimbulkan efek konstruktif ataupun destruktif pada lapisan bumi seperti yang terjadi pada Batas Konvergen maupun Batas Divergen. Pergerakan dua lempeng tersebut terjadi relative sejajar dengan zona patahan *strike-slip* (*strike-slip fault zone*) terbentuk



pada Batas Transform.



Gambar 2. Tiga Jenis Batas Lempeng (Plate Boundary)

Sumber : Wikipedia

Seperti dijelaskan sebelumnya, gempa bumi terjadi akibat pelepasan energi tiba-tiba dari aktivitas pergerakan lempeng bumi. Namun besar atau tidaknya gempa yang terjadi bergantung pada besar energi yang dilepaskan juga kondisi geografis di area sekitar terjadinya aktifitas lempeng.

### 2.2.2 Besaran kekuatan gempa

Besaran gempa bumi yang terjadi dapat dianalisis dan disajikan dalam dua bentuk data berdasarkan metode perhitungan tertentu yaitu berdasarkan magnitudo gempa (earthquake magnitude) dan berdasarkan intensitas kerusakan yang diakibatkannya (earthquake intensity). Magnitudo gempa bergantung pada kuat energi akibat patahan juga bergantung pada kondisi geografis di wilayah tersebut, sedangkan intensitas mengukur bahaya kerusakan yang diakibatkan oleh gempa pada efek terhadap orang-orang sekitar dan juga kerusakan infrastruktur yang diakibatkan gempa tersebut.

- *Earthquake Magnitude*

Magnitudo gempa adalah hasil analisis perhitungan gempa yang disajikan berdasarkan perhitungan skala kuantitatif yang dihitung berdasarkan waktu terjadinya gempa, arah gelombang dan banyak factor lainnya. Skala magnitudo dihitung berdasarkan data kuantitatif yang tidak memperhitungkan kerusakan infrastruktur yang terjadi atau respon warga sekitar terhadap terjadinya gempa. Maka skala magnitudo dapat diterapkan pada wilayah berpenduduk maupun tidak. Magnitudo gempa yang pertama kali diperkenalkan oleh Wadati

di Jepang pada tahun 1931.

a. *Local Magnitude Scales* ( $M_L$ )

Tahun 1935, dilakukan penelitian oleh Prof. Charles Richter, dari Institut Teknologi California dengan pengembangan skala gempa untuk gempa dangkal dan lokal serta memiliki episentrum berjarak kurang dari 600 km di daerah selatan California. Besaran gempa ini kemudian dikenal dengan Skala Richter atau juga disebut sebagai *Local Magnitude Scale* ( $M_L$ ) karena besaran tersebut memperhitungkan gempa dangkal dan lokal. Richter mendefinisikan magnitude local gempa sebagai logaritma berbasis 10 dari amplitude gelombang gempa maksimum dalam micron direkam menggunakan sesimograf Wood-Anderson yang terletak pada jarak 100 km dari episentrum gempa.

$$M_L = \log A - \log A_0 = \log A/A_0 \dots\dots\dots (2-1)$$

Dengan:

$M_L$  = besaran gempa

$A$  = amplitudo jejak gempa maksimum (mm) yang direkam oleh seismograf standar *Wood-Anderson* yang memiliki periode natural 0,8 detik dengan faktor redaman 80% dan magnifikasi statis sebesar 2800.

$A_0$  = 0,001 mm (skala gempa lokal nol yang berhubungan dengan besaran gempa terkecil yang pernah direkam)

b. *Surface Wave Magnitude Scales* ( $M_s$ )

Skala gempa permukaan digunakan untuk mengukur besaran gempa permukaan periode sekitar 20 detik yang sering dominan pada rekaman seismograf untuk gempa yang memiliki episentrum cukup jauh dari lokasi pengamatan atau sekitar lebih dari 2000 km. Gutenberg mendefinisikan *Surface Magnitude Scale* ( $M_s$ ) berdasarkan pengukuran amplitude gelombang gempa permukaan dengan periode 20 detik.

c. *Body Wave Magnitude* ( $m_b$ )

Gempa yang memiliki focus yang dalam hanya memiliki sedikit gelombang permukaan sehingga dibutuhkan pengukuran terhadap amplitude gelombang P yang merupakan salah satu jenis gelombang

badan yang tidak dipengaruhi oleh kedalaman focal sumber gempa.

d. *Moment Magnitude Scales* ( $M_w$ )

Perhitungan magnitudo gempa dengan pendekatan momen seismic yang langsung berhubungan langsung dengan parameter-parameter di titik sumber gempa yang dihitung dengan pendekatan berikut:

$$M_w = \frac{\log M_0}{1,5} - 10,7 \dots\dots\dots(2-2)$$

$M_0$  adalah *moment seismic* dalam satuan dyn-cm.

• *Earthquake Intensity*

Skala intensitas gempa pertama kali disusun oleh Forel dari Swiss dan de Rossi dari Italia pada tahun 1880 kemudian dikembangkan dan diperbaiki oleh Mercalli pada tahun 1931. Versi lainnya disusun oleh H.O. Wood dan Frank Neumann. Jepang juga mengeluarkan skala intensitas gempanya.

**2.3 Percepatan Gerakan Tanah (*Peak Ground Acceleration*)**

Parameter yang dapat dijadikan saat gempa terjadi salah satunya adalah percepatan tanah. Percepatan tanah maksimum atau *Peak Ground Acceleration* (PGA) pada suatu wilayah dipilih untuk dapat menentukan tingkat kerusakan yang paling parah di daerah tersebut. Nilai PGA sangat bervariasi di setiap kedalaman gempa bumi. Hal tersebut dapat terjadi karena disebabkan banyak faktor, diantaranya adalah panjang patahan, kedalaman gempa, jarak durasi pusat gempa, dan geologi tanah di wilayah tersebut. Semakin besar intensitas gempa yang dirasakan itu berarti semakin besar pula nilai PGA pada tanah tersebut.

Analisis pada lapisan permukaan tanah harus dilakukan untuk dapat menghitung percepatan gempa pada lokasi tersebut. Percepatan gempa di permukaan tanah dipengaruhi secara langsung oleh perubahan percepatan gempa di batuan dasar. Sifat-sifat dari lapisan tanah tersebut harus diketahui terlebih dahulu, karena akan berpengaruh untuk menentukan percepatan gempa di permukaan tanah. Dengan melakukan perhitungan secara empiris menggunakan data gempa bumi seperti *Mc Guire, Danovan, Maruscha* dan rumusan empiris lainnya nilai PGA dapat diperoleh, atau kita dapat menggunakan peta gerak tanah seismik (Standar Nasional Indonesia, 2012) untuk menentukan besarnya nilai PGA tersebut. Penelitian ini menggunakan

situs USGS (*United State Geological Survey*) dan sejarah gempa BMKG untuk mengetahui sejarah gempa yang pernah terjadi.

Rumusan empiris yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. *Mc Guire*

Rumusan empiris yang dikembangkan oleh Mc Guire (1963) untuk menentukan nilai percepatan tanah maksimum menggunakan gelombang permukaan maka rumusan empirisnya sebagai berikut

$$a_{max} = \frac{472,3 \times 10^{0,278M_s}}{(R+25)^{1,301}} \dots\dots\dots(2-3)$$

Keterangan:

$a_{max}$  = Percepatan gempa di permukaan tanah (gal)

$M_s$  = Magnitude gelombang permukaan

R = Jarak hiposentrum (km)

Nilai R dapat diketahui dengan melakukan perhitungan menggunakan rumus dibawah ini:

$$R = \sqrt{E^2 + D^2} \dots\dots\dots(2-4)$$

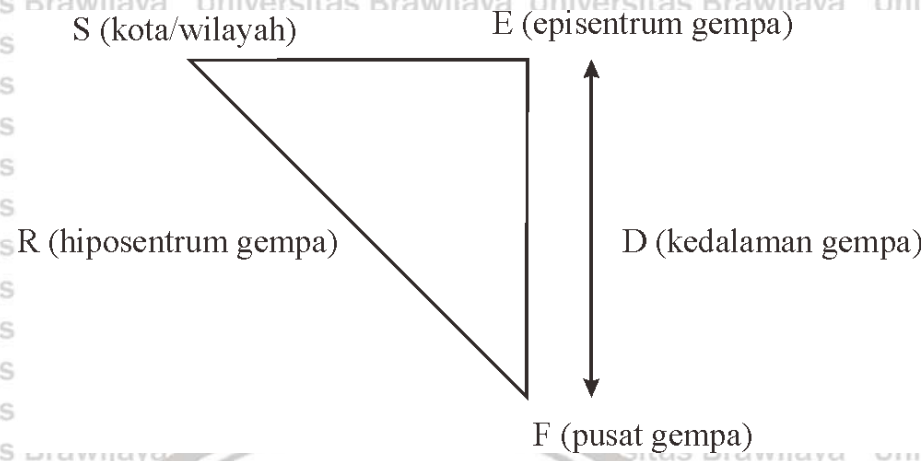
Dimana:

R = Jarak hiposentrum gempa (km)

E = Jarak episentrum (km)

D = Kedalaman sumber gempa (km)





Gambar 2. 3 Jarak horizontal dari pusat gempa

2. Donovan

Besarnya magnitude gempa tersebut mempengaruhi lamanya getaran gempa tersebut akan berlangsung minimal selama tidak terjadinya geseran pada patahan. Salah satu metode analisis untuk menghitung percepatan gempa yang diusulkan oleh Donovan (1973) dapat dilihat pada persamaan (2-6). rumus empiris Donovan merupakan rumusan yang bisa digunakan untuk menentukan nilai pga di suatu wilayah. rumusan empiris Donovan dihitung berdasarkan data rekaman gempa bumi yang terjadi pada 9 Februari 1971 di San Fernando. berikut ini merupakan rumusan empiris Donovan.

$$a_{max} = \frac{1080e^{0,5M}}{(R+25)^{1,32}} \dots\dots\dots(2-5)$$

Keterangan:

- $a_{max}$  = Percepatan gempa di permukaan tanah (gal)
- $e$  = Bilangan logaitma (  $e : 2,17828$ )
- $M$  = Magnitude gempa (skala richter)
- $R$  = Jarak hiposentrum dari sumber gempa (km)

3. Maruscha

Rumusan empiris Maruscha (1980) dalam menentukan nilai percepatan tanahnya menggunakan momen magnitude seperti pada rumus empiris di bawah ini

$$a_{max} = 119 \times e^{0,81M} \times (R + 25)^{-1,15} \dots\dots\dots(2-6)$$

Keterangan:

$a_{max}$  = Percepatan gempa di permukaan tanah (gal)

$M$  = Magnitude gelombang permukaan

$R$  = Jarak hiposentrum (km)

4. Liu dan Dong

Percepatan maksimum akibat gempa ( $a_{max}$ ) dengan menggunakan persamaan Liu dan Dong (1996), sebagai berikut

$$a_{max} = a \cdot e^{(bxM)} \cdot (R + 25)^{-c} (cm/dt^2) \dots \dots \dots (2-7)$$

Dengan:

$$a = 2,154 \times 10^6 \times R^{-2,1}$$

$$b = 0,046 + 0,455 \text{ Log } R$$

$$c = 2,515 - 0,486 \text{ Log } R$$

Keterangan:

$a_{max}$  = Percepatan tanah (cm/dt<sup>2</sup>)

$M$  = Magnitude gempa (km)

$R$  = Jarak hiposentrum (km)

$g$  = 9,81 m/s<sup>2</sup>

Percepatan gempa di permukaan dapat di nyatakan dalam “g” (percepatan akibat gravitasi bumi, setara dengan gaya gravitasi bumi, dalam m/s<sup>2</sup> (1g = 9,81 m/s<sup>2</sup>) atau dalam “gal”, dimana 1 gal sama dengan 0,01 m/s<sup>2</sup> (1g = 981 gal).

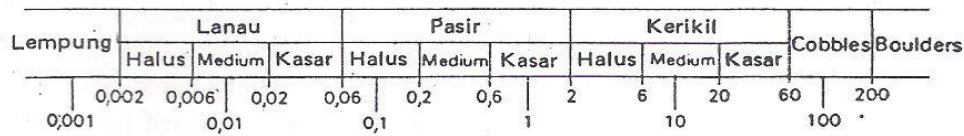
**2.4 Karakteristik Tanah Dasar**

Tanah tersusun dari berbagai butir partikel dengan ukuran yang berbeda-beda, yaitu antara lebih besar dari 100 mm sampai kurang dari 0.001 mm. kondisi tersebut mengakibatkan adanya klasifikasi tanah berdasarkan ukuran partikel pembentuknya yang dominan, tanah dengan partikel yang paling halus diklasifikasikan sebagai lempung, lanau, pasir, kerikil, *cobbles*, dan *boulders* untuk bebatuan yang paling keras dan ukuran partikelnya paling



besar. Keberagaman partikel tanah juga berpengaruh pada daya lekat antar partikel itu sendiri.

Secara umum, berdasarkan gaya antar partikelnya, tanah dibedakan menjadi tanah kohesif dan non kohesif. Tanah kohesif adalah tanah yang memiliki daya lekat baik antar partikel-partikel pembentuknya. Tanah yang partikelnya terdiri dari rentang ukuran kerikil dan pasir disebut tanah berbutir kasar (coarse grained). Sebaliknya, bila partikelnya kebanyakan berukuran partikel lempung dan lanau, disebut tanah berbutir halus (fine grained).



Gambar 2. 4 Rentang Ukuran Partikel

#### 2.4.1 Sifat – sifat fraksi tanah berbutir kasar

Secara kasat mata, tanah berbutir kasar dapat dikenali secara langsung mengingat ukurannya partikelnya relative besar.

Material tanah berbutir kasar paling banyak digunakan dalam kegiatan konstruksi mengingat banyak keuntungan yang diperoleh dengan sifat-sifat tanah berbutir kasar tersebut dalam bidang konstruksi. Berikut ini adalah beberapa sifat–sifat tanah berbutir kasar, yaitu :

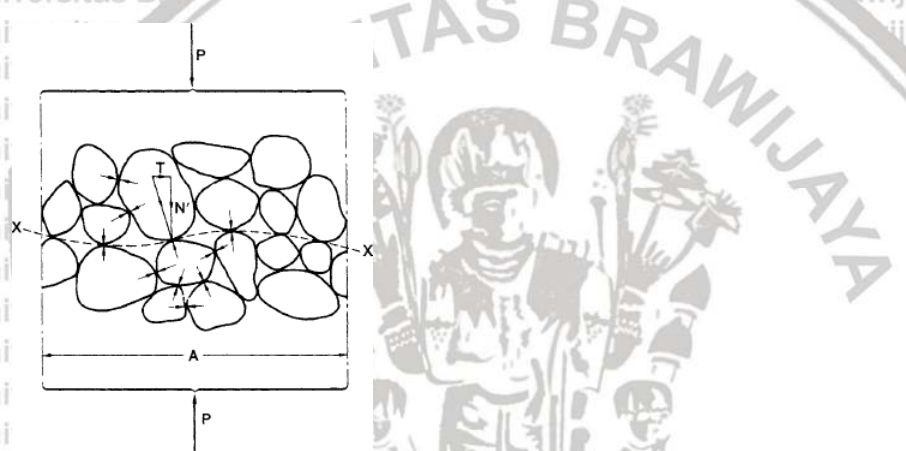
- Tidak kohesif
- Tingkat kompresibilitas yang tinggi dan nilai elastisitas yang besar
- Porositas atau angka pori yang tinggi karena banyak mempunyai celah dalam susunan strukturnya
- Memiliki kuat geser yang besar
- Mampu terkonsolidasi dalam kurun waktu relative cepat
- Partikel besar, yaitu berukuran  $> 0.075$  mm

#### 2.5 Tegangan Dalam Tanah

Tahun 1923 Terzaghi mengetahui adanya pengaruh gaya-gaya yang menjalar dari partikel ke partikel lainnya dalam kerangka tanah ketika menyimpulkan hasil penelitiannya dan mengemukakan prinsip tegangan efektif.

Untuk rentang tegangan yang biasa dijumpai dalam praktek, masing-masing partikel

padat dan air dapat dianggap tidak kompresibel sedangkan elemen udara bersifat sangat kompresibel. Tanah dapat divisualisasikan sebagai suatu bentuk volume partikel padat yang termasuk didalamnya terdapat pori-pori dimana pori-pori tersebut mengandung air dan/atau udara. Suatu Volume tanah secara keseluruhan dapat berubah akibat perubahan posisi partikel-partikel padat pada posisi yang baru, terutama dengan memperkecil pori-pori berisi udara atau air tersebut dan dipadatkan sehingga terjadi perubahan gaya-gaya dalam tanah yang mengakibatkan adanya yang bekerja diantara partikel-partikel tanah. Kompresibilitas kerangka tanah yang sesungguhnya tergantung pada susunan struktural partikel tanah tersebut.



Gambar 2. 5 Interpretasi Tegangan Efektif

Sumber: R.F.Craig, 1991

Gaya yang timbul akibat pergesekan antar partikel tanah dapat menahan tegangan geser yang terjadi pada kerangka volume. Begitu pula dengan Tegangan normal dapat ditahan oleh gaya antar partikel yang terjadi pada satuan volume tanah. Kondisi tersebut mengakibatkan pula terjadinya tegangan air pori tanah sebab tanah dengan kondisi jenuh atau saturated ikut menahan tegangan normal tanah.

### 2.5.1 Tegangan Efektif

Tegangan efektif merupakan gaya per satuan luas yang ditahan oleh bulir-bulir tanah. Dalam suatu massa tanah, perubahan volume dan kekuatan tanah berbanding lurus dimana semakin tinggi tegangan efektif menunjukkan semakin padat tanah tersebut.



Prinsip diatas berlaku hanya pada tanah dengan kondisi jenuh sempurna. Tegangan-tegangan yang berhubungan dengan prinsip tersebut adalah:

- Tegangan normal total ( $\sigma$ ); adalah gaya per satuan luas yang ditransmisikan pada arah normal bidang dengan menganggap bahwa tanah adalah material padat saja
- Tekanan air pori ( $u$ ); adalah tekanan air dalam pori-pori tanah
- Tegangan normal efektif ( $\sigma'$ ) adalah tegangan yang timbul dengan perhitungan penjalaran melalui tanah saja, tidak dengan air pori.

Hubungan ketiganya dapat disajikan sebagai berikut:

$$\sigma = \sigma' + u \dots\dots\dots(2-8)$$

**2.5.2 Tegangan Horizontal (Tegangan Lateral)**

Prinsip tegangan dalam tanah berbeda jauh dengan prinsip tegangan di hidrolika, dimana dalam hidrolika prinsip tegangan akan sama besar pada berbagai arah. Pada tanah, tegangan yang terjadi antara vertical maupun horizontal tidak bisa dipastikan memiliki nilai yang sama. Berikut merupakan perbandingan atau hubungan antar tegangan-tegangan yang terjadi pada suatu volume tanah:

$$\sigma_h = K \cdot \sigma_v \dots\dots\dots(2-9)$$

dengan K adalah koefisien tekanan tanah. Disebabkan oleh kondisi permukaan air tanah yang dapat berubah-ubah dalam suatu periode yang menyebabkan berubahnya nilai tegangan total, nilai koefisien K tidak konstan dalam suatu lapisan tanah. Untuk menghindari masalah muka air tanah yang fluktuatif, perbandingan tegangan tersebut harus dalam keadaan kondisi efektif.

$$\sigma'_h = K_0 \cdot \sigma'_v \dots\dots\dots(2-10)$$

$K_0$  atau bisa disebut dengan “koefisien tekanan tanah dalam keadaan diam” (coefficient of earth pressure at rest) adalah kondisi tegangan dalam tanah berada pada keadaan efektif dan tidak tergantung dari tinggi muka air tanah. Bahkan apabila terjadi perubahan fluktuasi muka air tanah  $K_0$  tetap konstan, dengan ketentuan masih dalam lapisan dan juga kepadatan tanah yang sama.



## 2.6 Kekuatan Geser Tanah

Kuat geser tanah atau kemampuan tanah untuk menahan gesekan sepanjang bidang geser dengan massanya adalah karakteristik tanah yang dapat menjaga keseimbangan pada permukaan lereng. Hilangnya kuat geser tanah didominasi oleh adanya gerak relative antar butir tanah. Kuat geser suatu tanah dipengaruhi oleh:

- Kohesi atau lekatan antar butir tanah. Ciri ini dimiliki oleh tanah perbutir halus atau kohesif. Misalnya lempung.
- Sudut geser dalam. Ciri ini dimiliki oleh tanah berbutir kasar (non kohesif), kekuatan geser disebabkan sebab gesekan antar partikel butiran tanah sehingga disebut sudut geser dalam ( $\phi$  soil).
- Kombinasi antara kohesi dan sudut geser dalam. Ciri tersebut berlaku untuk tanah yang merupakan campuran antara tanah kohesif dan tanah non-kohesif atau tanah berbutir kasar dan tanah berbutir halus.

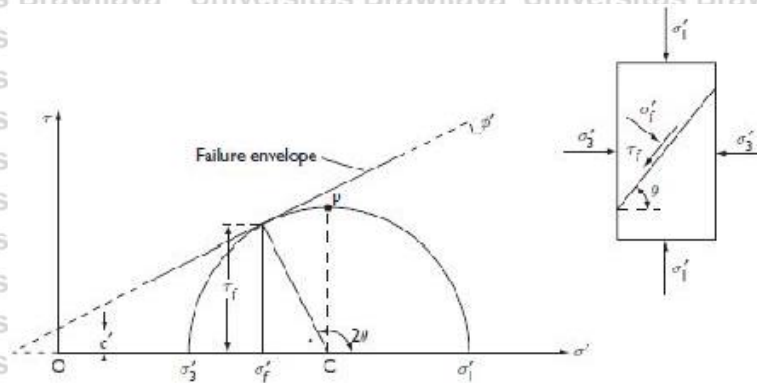
Apabila tegangan geser bernilai sama dengan kuat gesernya, maka akan terjadi keruntuhan pada tanah. Menurut Coulomb, kuat geser tanah pada suatu titik pada bidang tertentu, dapat diekspresikan sebagai suatu fungsi linear dari tegangan normal pada saat keruntuhan di titik yang sama pada bidang tersebut.

$$\tau_f = c + \sigma_f \tan \phi \dots \dots \dots (2-11)$$

Adapun  $c$  (kohesi) dan  $\phi$  (sudut geser) adalah parameter perhitungan kuat geser. Berdasarkan prinsip bahwa tegangan geser pada tanah hanya dapat ditahan oleh partikel padatnya, maka kuat geser harus diekspresikan sebagai suatu fungsi dalam kondisi efektifnya, yaitu sebagai berikut :

$$\tau_f = c' + \sigma'_f \tan \phi' \dots \dots \dots (2-12)$$

Hubungan parameter kuat geser dengan prinsip tegangan efektif pada saat keruntuhan disajikan dalam gambar berikut, dimana lingkaran Mohr menunjukkan kasus dengan  $c' > 0$ .



Gambar 2. 6 Kriteria keruntuhan Mohr – Coulomb

Sumber: R.F. Craig, 2004

### 2.6.1 Kekuatan Geser Tanah Non-Kohesif

Tanah bergradasi hamper memiliki konsep mendekati kekuatan geser dan tahanan gesek pada benda padat pada bidang kontak. korelasi antara tegangan normal pada bidang tanah dan kekuatan gesernya disajikan dalam persamaan berikut:

$$\tau_f = \sigma \tan \phi \dots\dots\dots(2-13)$$

Dimana:

$\tau_f$  = tegangan geser keruntuhan, atau kekuatan geser

$\sigma$  = tegangan normal pada bidang geser  $\phi$  = sudut geser

Pada kepadatan tanah yang relative sama, sudut geser untuk pasir jenuh sedikit lebih kecil jika dibandingkan dengan sudut geser pasir kering. Efek dari tegangan normal air pada bidang geser juga diperhitungkan untuk kondisi tanah pasir jenuh. Tegangan normal pasir harus dihitung pada kondisi atau keadaan efektif. Untuk kekuatan geser, nilainya akan berbanding lurus dengan sudut geser pada pasir. Oleh karena itu:

$$\tau_f = (\sigma - u) \tan \phi' \dots\dots\dots(2-14)$$

dimana:

$\tau_f$  = tegangan geser keruntuhan, atau kekuatan geser

$\sigma$  = tegangan normal pada bidang geser

$u$  = tekanan air pori

$\phi$  = sudut geser

### 2.7 Metode Untuk Mengevaluasi Potensi Likuifaksi

Analisis potensi likuifaksi dapat dilakukan dengan 2 pendekatan yaitu uji laboraturim dan perhitungan dari data yang didapat dari uji lapangan lokasi. Pada skripsi ini, penulis menggunakan pendekatan empiris dalam Analisa potensi likuifaksi dengan menggunakan data hasil uji lapangan berupa data sondir atau CPT. Analisis empiris mengenai potensi likuifaksi membutuhkan nilai rasio tegangan siklik (CSR) dan nilai rasio tahanan siklik (CRR) yang dihitung berdasarkan nilai data CPT atau sondir.

Metode mengevaluasi untuk analisis potensi likuifaksi yaitu dengan memperhitungkan nilai FS atau faktor keamanan dari hasil perbandingan CRR (Cyclic Resistance Ratio) dengan CSR (Cyclic Stress Ratio). Dimana CRR menunjukkan kekuatan tanah menahan beban siklis yang umumnya disebabkan oleh gempa bumi sedangkan CSR adalah nilai tegangan yang disebabkan oleh gempa bumi. Uji FS harus menunjukkan angka lebih dari 1 untuk menunjukkan aman dari potensi likuifaksi. dengan otomatis, Ketika nilai FS menunjukkan angka lebih dari 1 maka lapisan tanah berpotensi terjadi likuifaksi. Berikut hubungan FS disajikan dalam persamaan:

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \dots\dots\dots (2-15)$$

Dimana, jika  $FS < 1$  (terjadi likuifaksi)

$FS = 1$  (kondisi kritis)

$FS > 1$  (tidak terjadi likuifaksi)

#### 2.7.1 Metode evaluasi CSR

Pendekatan untuk rasio tegangan siklik yang dikemukakan oleh Seed dan Idriss tahun 1971 adalah sebagai berikut:

$$CSR = (\tau_{av}/\sigma'_{vo}) = 0.65(a_{max}/g)(\sigma_{vo}/\sigma'_{vo})r_d \dots\dots\dots (2-16)$$

Dimana:

$a_{max}$  = aselarasasi puncak horizontal pada permukaan tanah yang disebabkan gempa;

$g$  = gravitasi

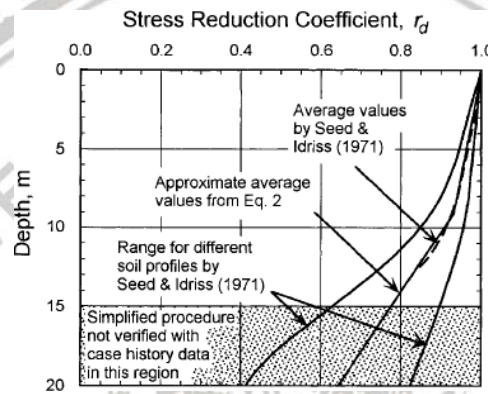
$\sigma_{vo}$  dan  $\sigma'_{vo}$  = tegangan *overburden* vertikal efektif

$r_d$  = koefisien tegangan reduksi. Untuk penyederhanaan dan proyek nonkritis, persamaan berikut mungkin digunakan untuk

memperkirakan nilai  $r_d$  rata-rata (Liao dan Whitman, 1968):

$$r_d = 1.0 - 0.00765z \quad \text{untuk } z \leq 9.15 \text{ m}$$

$$r_d = 1.174 - 0.0267z \quad \text{untuk } 9.15 \leq z \leq 23 \text{ m}$$



Gambar 2. 7  $r_d$  versus Depth Curves Developed by Seed and Idriss (1971)

Sumber : Soil Liquefaction During Earthquakes by I.M Idriss and R.W. Boulanger

TF Blake (1996) memperkirakan nilai tengah plot kurva pada gambar 2.6 dengan persamaan seperti berikut:

$$r_d = \frac{(1.000 - 0.4113z^{0.5} + 0.04052z + 0.001753z^{1.5})}{(1.000 - 0.4177z^{0.5} + 0.05729z - 0.006205z^{1.5} + 0.001210z^2)} \dots(2-17)$$

dimana  $z$  = kedalaman dibawah permukaan tanah (m)

Sedangkan Idriss (1999), meneruskan apa yang dikerjakan oleh Golesorkhi (1989) dilakukan analisis respon parametrik dan disimpulkan bahwa nilai  $r_d$  harus menunjukkan fungsi dari kedalaman dan *earthquake magnitude* ( $M_w$ ). berikut pendekatan empiris yang dihasilkan dari analisis tersebut.

$$r_d = \exp(\alpha(z) + \beta(z)M) \dots(2-18)$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin((z/11.73) + 5.133) \dots(2-19)$$

$$\beta(z) = 0.106 + 0.118 \sin((z/11.38) + 5.412) \dots(2-20)$$

Dimana  $z$  adalah kedalaman (m),  $M_w$  adalah *momen magnitude*. Persamaan

tersebut dapat diaplikasikan pada kedalaman tanah berkisar kurang dari 20 m sebab keidakpastian nilai  $r_d$  dengan meningkatnya kedalaman,

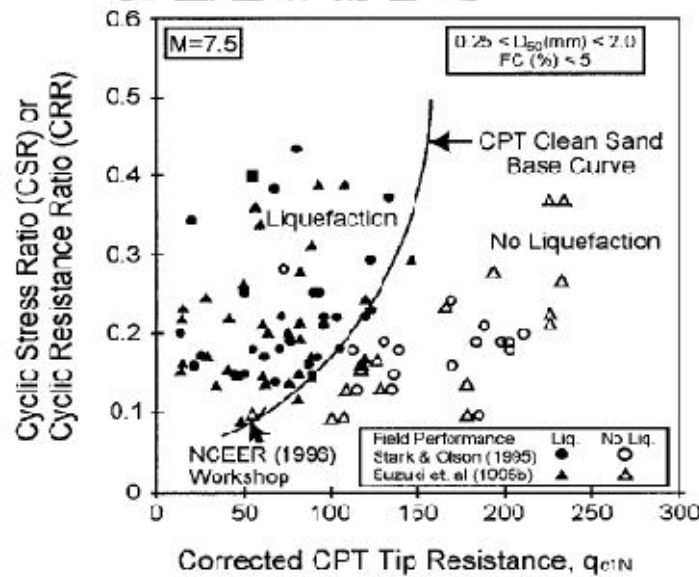
### 2.7.2 Metode Evaluasi CRR

Metode evaluasi CRR berdasarkan data CPT adalah sebagai berikut:

- CPT

Kelebihan data yang dihasilkan oleh CPT adalah biasanya data CPT menunjukkan nilai yang konsisten dan memiliki *repeatability* yang baik sehingga data yang didapatkan relatif mendekati satu sama lain. Statigrafi yang didapatkan dari CPT memiliki kemampuan lebih dalam interpretasi data tahanan likuifaksi.

Berikut adalah kurva perhitungan CRR berdasarkan data CPT namun, berdasarkan beberapa sejarah kesalahan kasus pada tahun 1989 saat terjadi Gempa Loma Prieta, I.M. Idriss menyarankan bergesernya grafik pada kurva sebesar 10 sampai 15% ke kanan seperti pada gambar berikut.



Gambar 2. 8 Kurva yang direkomendasikan untuk perhitungan CRR dari data CPT sepanjang data empiris likuifaksi dari gabungan sejarah kasus

Sumber : Soil Liquefaction During Earthquakes by I.M Idriss and R.W. Boulanger

Adapun Gilstrap dan Youd (1988) melakukan perbandingan perhitungan tahanan likuifaksi dari keadaan lapangan di 19 lokasi dan disimpulkan adanya akurasi analisis potensi likuifaksi menggunakan data CPT adalah sebesar 85%.

Kurva *clean-sand base* Gambar 2.8 didapatkan dari persamaan (Robertson dan

Wride, 1998) yang berketentuan sebagai berikut berikut :

Jika nilai  $(q_{c1N})_{cs} < 50$

$$\text{maka nilai } CRR_{7.5} = 0.833[(q_{c1N})_{cs} / 1.000] + 0.05 \dots \dots \dots (2-21)$$

Dan jika  $50 \leq (q_{c1N})_{cs} \leq 160$

$$\text{maka } CRR_{7.5} = 93[[(q_{c1N})_{cs} / 1.000]^3 + 0.08] \dots \dots \dots (2-22)$$

Normalisasi dari tahanan *cone penetration* didapatkan sebagai berikut :

$$q_{c1N} = C_N (q_c / P_a) \dots \dots \dots (2-23)$$

$$C_N = (P_a / \sigma'_{vo})^n \dots \dots \dots (2-24)$$

Dalam buku *Soil Liquefaction During Earthquake* karangan I.M Idriss dan R.W. Boulanger diketahui bahwa nilai  $CRR_{7.5}$  sebagai berikut:

Jika nilai  $(q_{c1N})_{cs} < 211$

$$CRR_{7.5} = \exp(((q_{c1N})_{cs}/540) + ((q_{c1N})_{cs}/67)^2 - ((q_{c1N})_{cs}/80)^3 + ((q_{c1N})_{cs}/114)^4 - 3) \dots (2-25)$$

Jika nilai  $(q_{c1N})_{cs} > 211$ , maka  $CRR_{7.5} = 2$

Dimana:

$C_Q$  = faktor normalisasi untuk tahanan CPT;

$P_a = 1$  atm tekanan yang sama yang digunakan oleh  $\sigma'_{vo}$

$n$  = eksponen yang bergantung pada jenis tanah

$q_c$  = tahanan ujung konus

Pada kedalaman tanah yang relative dangkal nilai  $C_Q$  akan meningkat sangat besar karena nilai tekanan *overburden* yang kecil. Sebagaimana telah dijelaskan bahwa besaran nilai  $n$  bervariasi dari 0.5-1.0 tergantung pada karakteristik butir tanah (Olsen 1997).

Rasio friksi biasanya berbanding lurus dengan peningkatan *finer content* dan sifat plastisitas tanah, yang memungkinkan adanya klasifikasi jenis tanah dan nilai pori yang dapat ditentukan berdasarkan data CPT. Robertson dan Wride (1998) menyempurnakan grafik sebelumnya untuk mengestimasi jenis klasifikasi tanah.



Indeks tipe perilaku tanah biasa didefinisikan  $I_c$  dihtung dengan persamaan berikut:

$$I_c = [(3.47 - \log Q)^2 - (1.22 + \log F)^2]^{0.5} \dots\dots\dots(2-26)$$

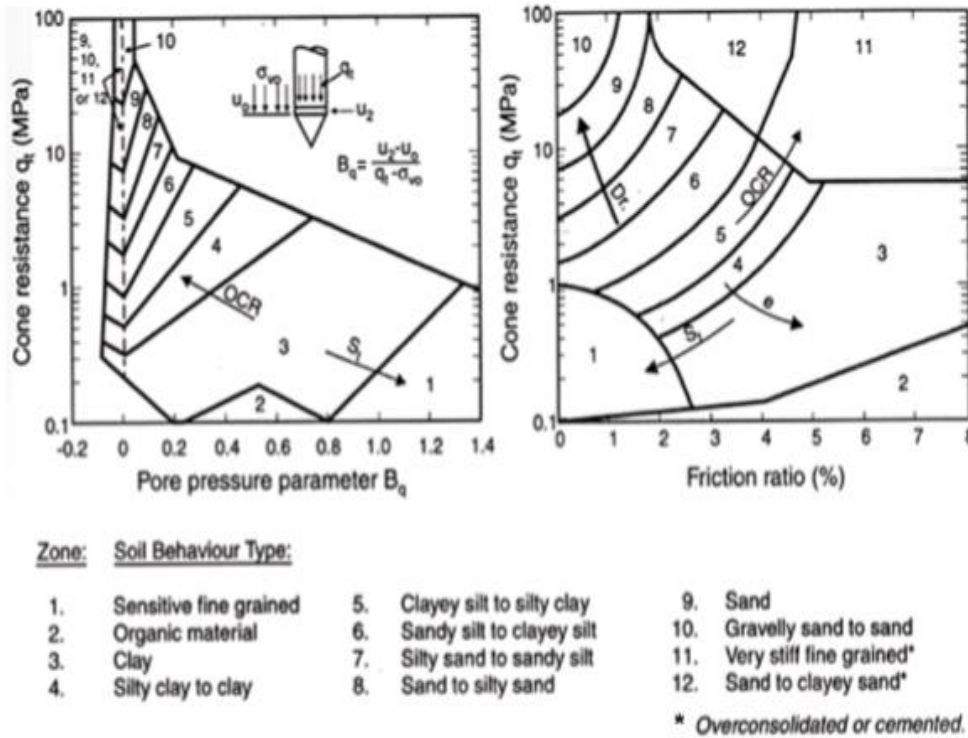
Dimana:

$$Q = [(q_c - \sigma_{vo})/P_a][P_a/\sigma'_{vo}]^n \dots\dots\dots(2-27)$$

dan

$$F = [f_s / (q_c - \sigma_{vo})] \times 100\% \dots\dots\dots(2-28)$$

Grafik klasifikasi jenis tanah pada gambar 2.9 berikut menunjukkan hubungan antara nilai  $q_c$  dan friction ratio untuk menentukan jenis tanah yang di bagi menjadi 12 zona.



Gambar 2. 9 Grafik klasifikasi tanah berdasarkan  $q_c$  dan  $Fr$  oleh Robertson

Sumber : *Proceedings of the NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistances of Soils*, T.L. Youd dan I.M. Idriss, editors, Technical Report NCEER-97-022, 41-88





Analisis diawali dengan mengklasifikasikan jenis tanah berdasarkan grafik diatas dan menghitung dimensi tahanan ujung Q dari persamaan sebagai berikut:

$$Q = [(q_c - \sigma_{vo})/P_a][P_a / \sigma'_{vo}]^{1.0} = [(q_c - \sigma_{vo}) / \sigma'_{vo}] \dots \dots \dots (2-29)$$

Apabila nilai  $I_c$  menunjukkan nilai  $>2.6$ , analisis dihentikan dengan menganggap tanah termasuk tanah dengan banyak butiran halus dan digolongkan sebagai tanah padat yang sulit untuk terlikuifaksi. Namun sample tanah perlu diambil guna mengonfirmasi jenis tanah tersebut dengan uji laboratorium. Seed dan Idriss (1982) mendefinisikan beberapa syarat tanah yang berpotensi terjadi likuifaksi memiliki beberapa kriteria yang harus ditemui pada lapisan tanah diantaranya adalah sebagai berikut:

- Kandungan lempung lebih kecil 15%
- Batas cair kurang dari 35%
- Kandungan kelembaban natural lebih dari 0.9 batas cair.

Perhitungan nilai  $(q_{c1N})_{cs}$  ditentukan dari persamaan berikut :

$$(q_{c1N})_{cs} = K_c q_{c1N} \dots \dots \dots (2-30)$$

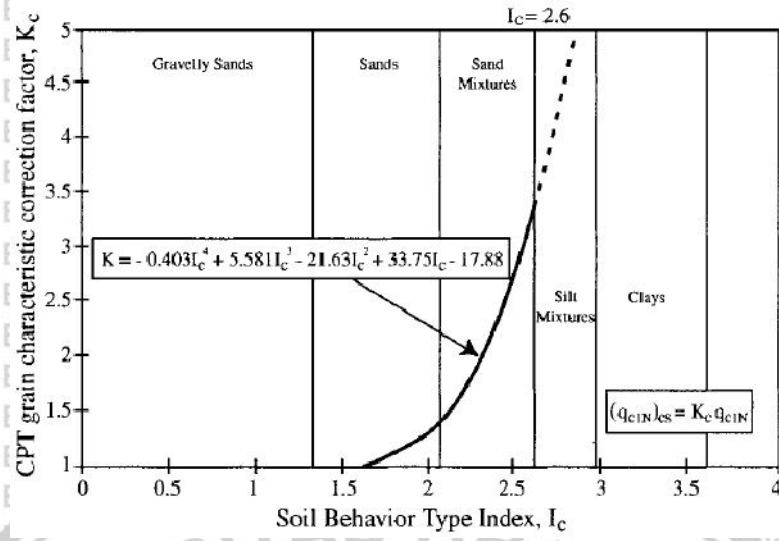
$K_c$  merupakan faktor koreksi untuk karakteristik butir yang dihitung berdasarkan persamaan berikut:

(Robertson dan Wride, 1988)

$$\text{untuk } I_c \leq 1.64 \quad K_c = 1.0 \dots \dots \dots (2-31)$$

$$\text{untuk } I_c > 1.64 \quad K_c = -0.403 I_c^4 + 5.581 I_c^3 - 21.63 I_c^2 + 33.75 I_c - 17.88 \dots \dots \dots (2-32)$$

Gambar 2.10 menunjukkan kurva  $K_c$  dari perhitungan diatas



Gambar 2. 10 Grain-Characteristic Correction Factor  $K_c$  for Determination of Clean-Sand Equivalent CPT Resistance

Sumber: Robertson and Wride (1998)



## BAB III

### METODE PENELITIAN

#### 3.1 Metode Pengumpulan Data

Pengumpulan data dalam penelitian ini meliputi dua data primer pokok yang terdiri dari dua macam, yaitu :

- a. Data sejarah gempa bumi yang pernah terjadi di Kota Gorontalo dan sekitarnya.
- b. Data lapisan tanah yang didapat di wilayah Kota Gorontalo.

##### 3.1.1 Metode dan Lokasi Pengumpulan Data Gempa

Sebelum melakukan analisa potensi likuifaksi di wilayah Kota Gorontalo, perlu dilakukan perhitungan percepatan tanah di batuan dasar dengan menggunakan data gempa yang pernah terjadi sebelumnya.

Dalam memperoleh data sejarah gempa yang pernah terjadi, penelitian ini menggunakan situs yang disediakan oleh USGS (United State Geological Survey). Situs tersebut akan menampilkan data gempa sesuai dengan permintaan yang dibutuhkan. Untuk mendapatkan data gempa yang dibutuhkan, perlu ditentukan wilayah terjadinya gempa yang ingin diteliti, interval megnetude gempa yang diinginkan serta interval waktu kejadian gempa. Data sejarah gempa yang diperlukan untuk menganalisa potensi likuifaksi, adalah data gempa pada radius 200 km dari Kota Gorontalo, serta bermagnetude di atas 5 SR, sebab seperti yang telah dibahas sebelumnya, gempa yang bermagnetude di bawah 5 SR tidak berpotensi menyebabkan likuifaksi.

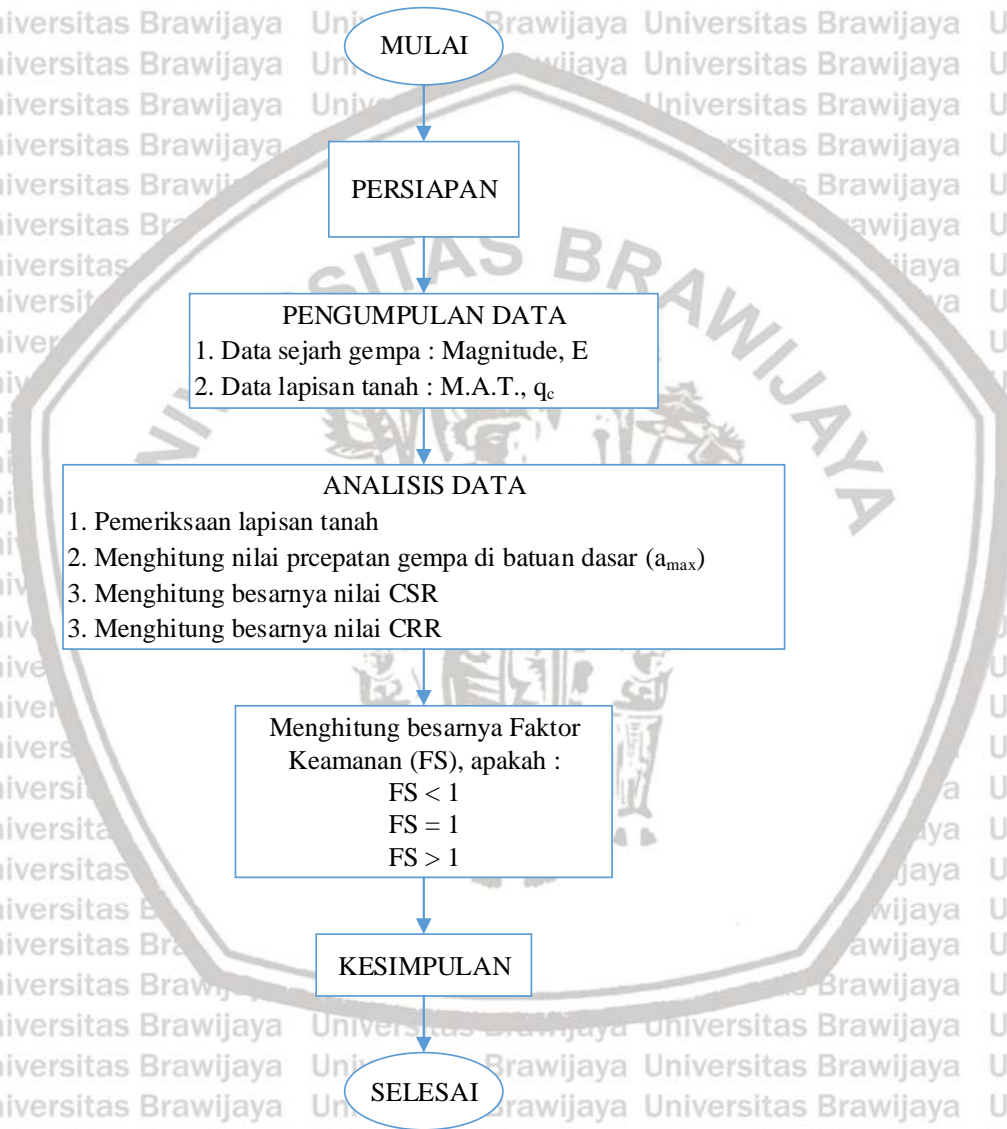
Data yang dapat diperoleh dari situs tersebut meliputi:

- Tanggal terjadinya gempa
- Besar magnetude gempa
- Kedalaman hiposentrum
- Letak koordinat epientrum (Garis lintang dan garis bujur)



### 3.2 Metode Pengambilan data Lapisan Tanah

Untuk menganalisa potensi likuifaksi diperlukan pula data yang berhubungan dengan sifat fisis dari suatu tanah, kedalaman muka air tanah dan data hasil pengujian Sondir atau *Cone Peetration Test (CPT)*. Adapun diagram alir dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1 berikut ini.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

### 3.3 Variabel Penelitian

Variabel bebas atau variabel yang menjadi pengaruh atau yang menjadi penyebab terjadinya perubahan, variabel ini merupakan faktor-faktor yang diukur dan dibuat oleh peneliti dalam melihat suatu perilaku yang sedaing diteliti. Variabel bebas dalam

penelitian ini adalah jenis lapisan tanah yaitu jenis tanah non-kohefif (tanah pasir) dan percepatan gempa.

Selanjutnya adalah variabel terikat. Variabel terikat sering disebut sebagai variabel tergantung, variabel terikat merupakan faktor-faktor yang diamati untuk menentukan ada tidaknya pengaruh dari variabel bebas. Pada penelitian ini, terjadinya peristiwa likuifaksi merupakan variabel terikat tersebut.

### 3.4 Tahapan Analisis Data

Tahapan dalam melakukan analisis untuk mengetahui besarnya potensi terjadi likuifaksi di Kota Gorontalo, maka dilakukan langkah-langkah sebagai berikut:

1. Menentukan nilai  $q_{c1N}$  (nilai tahanan ujung konus) Dengan menggunakan data tanah dari hasil uji CPT.
2. Menghitung nilai  $Q$  dengan nilai  $n$ . Dimana besarnya nilai  $n = 1$  untuk tanah lempung dan untuk pasir murni  $n = 0,5$ .
3. Menghitung nilai  $F$ .
4. Menentukan magnitude dan percepatan tanah maksimum ( $a_{max}$ ). Dengan menggunakan persamaan dari *Mc. Guire* dalam perhitungan percepatan tanah maksimum. Magnitude gempa dan percepatan tanah maksimum diperlukan untuk perhitungan CSR.
5. Menghitung besarnya nilai CSR. CSR diperoleh dari nilai percepatan gempa di permukaan.
6. Menghitung besarnya nilai CRR. Berdasarkan hasil dari uji CPT dengan nilai perlawanan terkoreksi.
7. Mengevaluasi potensi terjadinya likuifaksi. Dari besarnya nilai FS berdasarkan nilai CSR dan CRR di tip lapisan.
8. Menghitung MSF. Apabila perencanaan menggunakan momen magnitude gempa selain 7.5 maka perlu memperhitungkan faktor koreksi MSF.



Halaman ini sengaja dikosongkan

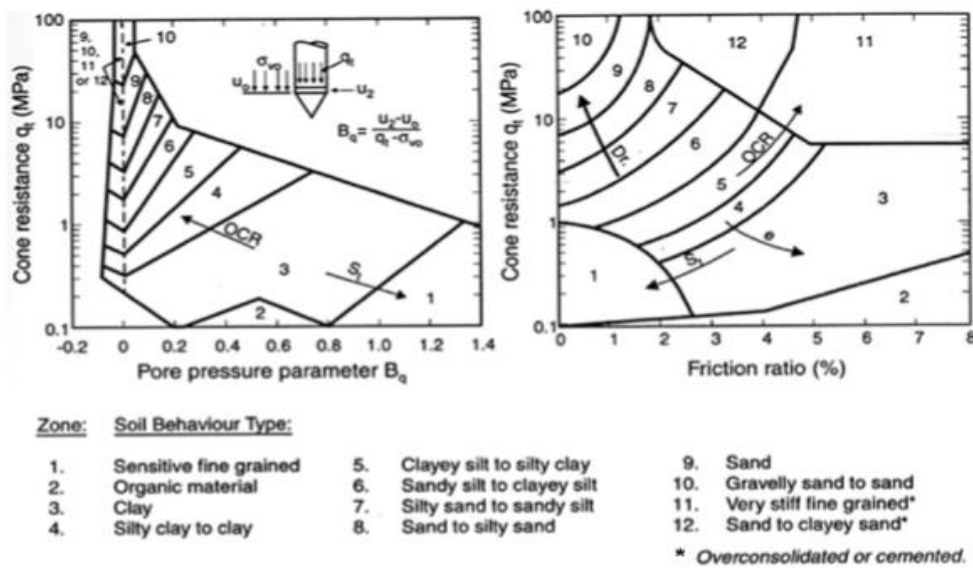


BAB IV

ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Data Pengujian Sondir dan Pemeriksaan Jenis Lapisan Tanah

Pemeriksaan jenis lapisan tanah dari hasil uji sondir didapatkan melalui grafik perbandingan nilai qc dan FR. Hasil dari klasifikasi lapisan tanah ini selanjutnya digunakan untuk menentukan  $\gamma$  tanah berdasarkan tabel 4.1



Gambar 4. 1 Grafik klasifikasi tanah berdasarkan qc dan FR oleh Robertson

Tabel 4. 1

The Estimation of Unit weight Based Soil Description

The Estimation of Unit weight Based Soil Description	
Zone	Approximate of Unit Weight (kg/cm <sup>2</sup> )
1	0,00175
2	0,00125
3	0,00175
4	0,00180
5	0,00180
6	0,00180
7	0,00185
8	0,00190
9	0,00195
10	0,00200



Zone	Approximate of Unit Weight (kg/cm <sup>2</sup> )
11	0,00250
12	0,00190

Tabel 4. 2

Pemeriksaan jenis lapisan tanah pada titik bor 1

Depth (m)	qc (kg/cm <sup>2</sup> )	qc (Mpa)	FR	zona	klasifikasi	$\gamma$ (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0.00	0.00	0.00	-	-	-
0.2	5.36	0.53	8.22	3	clay	0.00175
0.4	10.71	1.05	4.11	3	clay	0.00175
0.6	10.71	1.05	4.11	3	clay	0.00175
0.8	10.71	1.05	4.11	3	clay	0.00175
1	10.71	1.05	4.11	3	clay	0.00175
1.2	16.07	1.58	2.74	5	clayey silt to silty clay	0.0018
1.4	16.07	1.58	2.74	5	clayey silt to silty clay	0.0018
1.6	16.07	1.58	2.74	5	clayey silt to silty clay	0.0018
1.8	16.07	1.58	2.74	5	clayey silt to silty clay	0.0018
2	16.07	1.58	2.74	5	clayey silt to silty clay	0.0018
2.2	16.07	1.58	2.74	5	clayey silt to silty clay	0.0018
2.4	12.85	1.26	2.05	5	clayey silt to silty clay	0.0018
2.6	16.07	1.58	2.74	5	clayey silt to silty clay	0.0018
2.8	16.07	1.58	2.74	5	clayey silt to silty clay	0.0018
3	16.07	1.58	2.74	5	clayey silt to silty clay	0.0018
3.2	16.07	1.58	2.74	5	clayey silt to silty clay	0.0018
3.4	37.49	3.68	1.17	7	silty sand to sandy silt	0.00185
3.6	64.26	6.30	0.68	8	sand to silty sand	0.0019
3.8	64.26	6.30	0.68	8	sand to silty sand	0.0019
4	64.26	6.30	0.68	8	sand to silty sand	0.0019
4.2	44.98	4.41	0.59	8	sand to silty sand	0.0019
4.4	18.21	1.79	1.45	6	sandy silt to clayey silt	0.0018
4.6	18.21	1.79	1.45	6	sandy silt to clayey silt	0.0018
4.8	18.21	1.79	1.45	6	sandy silt to clayey silt	0.0018
5	21.42	2.10	2.05	6	sandy silt to clayey silt	0.0018
5.2	37.49	3.68	1.17	7	silty sand to sandy silt	0.00185
5.4	37.49	3.68	1.17	7	silty sand to sandy silt	0.00185
5.6	34.27	3.36	0.77	7	silty sand to sandy silt	0.00185





Depth (m)	qc (kg/cm <sup>2</sup> )	qc (Mpa)	FR	zona	klasifikasi	γ (kg/cm <sup>2</sup> )
5.8	64.26	6.30	0.68	8	sand to silty sand	0.0019
6	34.27	3.36	0.77	7	silty sand to sandy silt	0.00185
6.2	37.49	3.68	1.17	7	silty sand to sandy silt	0.00185
6.4	37.49	3.68	1.17	7	silty sand to sandy silt	0.00185
6.6	37.49	3.68	1.17	7	silty sand to sandy silt	0.00185
6.8	42.84	4.20	1.03	7	silty sand to sandy silt	0.00185
7	42.84	4.20	1.03	7	silty sand to sandy silt	0.00185
7.2	80.33	7.88	0.55	8	sand to silty sand	0.0019
7.4	155.30	15.23	0.28	9	sand	0.00195
7.6	187.43	18.38	0.23	9	sand	0.00195
7.8	208.85	20.48	0.21	9	sand	0.00195
8	230.27	22.58	0.19	9	sand	0.00195
8.2	262.40	25.73	0.17	10	gravelly sand to sand	0.00200
8.4						

Tabel 4. 3

Pemeriksaan jenis lapisan tanah pada titik bor 2

Depth (m)	qc (kg/cm <sup>2</sup> )	qc (Mpa)	FR	zona	klasifikasi	γ (kg/cm <sup>2</sup> )
0	0.00	0.00	0.00	-	-	-
0.2	2.14	0.21	12.32	2	organic material	0.00175
0.4	2.14	0.21	12.32	2	organic material	0.00175
0.6	5.36	0.53	8.22	3	clay	0.00125
0.8	5.36	0.53	8.22	3	clay	0.00125
1	5.36	0.53	8.22	3	clay	0.00125
1.2	10.71	1.05	4.11	3	clay	0.00125
1.4	10.71	1.05	4.11	3	clay	0.00125
1.6	10.71	1.05	4.11	3	clay	0.00125
1.8	10.71	1.05	4.11	3	clay	0.00125
2	10.71	1.05	4.11	3	clay	0.00125
2.2	10.71	1.05	4.11	3	clay	0.00125
2.4	10.71	1.05	4.11	3	clay	0.00125
2.6	10.71	1.05	4.11	3	clay	0.00125
2.8	10.71	1.05	4.11	3	clay	0.00125
3	37.49	3.68	1.17	6	sandy silt to clayey silt	0.0018

<i>Depth</i> (m)	<i>qc</i> (kg/cm <sup>2</sup> )	<i>qc</i> (Mpa)	<i>FR</i>	<i>zona</i>	<i>klasifikasi</i>	<i>γ</i> (kg/cm <sup>2</sup> )
3.2	37.49	3.68	1.17	6	<i>sandy silt to clayey silt</i>	0.0018
3.4	74.97	7.35	0.59	8	<i>sand to silty sand</i>	0.0019
3.6	74.97	7.35	0.59	8	<i>sand to silty sand</i>	0.0019
3.8	74.97	7.35	0.59	8	<i>sand to silty sand</i>	0.0019
4	34.27	3.36	0.77	7	<i>silty sand to sandy silt</i>	0.00185
4.2	34.27	3.36	0.77	7	<i>silty sand to sandy silt</i>	0.00185
4.4	34.27	3.36	0.77	7	<i>silty sand to sandy silt</i>	0.00185
4.6	34.27	3.36	0.77	7	<i>silty sand to sandy silt</i>	0.00185
4.8	23.56	2.31	1.12	6	<i>sandy silt to clayey silt</i>	0.0018
5	23.56	2.31	1.12	6	<i>sandy silt to clayey silt</i>	0.0018
5.2	23.56	2.31	1.12	6	<i>sandy silt to clayey silt</i>	0.0018
5.4	23.56	2.31	1.12	6	<i>sandy silt to clayey silt</i>	0.0018
5.6	23.56	2.31	1.12	6	<i>sandy silt to clayey silt</i>	0.0018
5.8	23.56	2.31	1.12	6	<i>sandy silt to clayey silt</i>	0.0018
6	23.56	2.31	1.12	6	<i>sandy silt to clayey silt</i>	0.0018
6.2	23.56	2.31	1.12	6	<i>sandy silt to clayey silt</i>	0.0018
6.4	23.56	2.31	1.12	6	<i>sandy silt to clayey silt</i>	0.0018
6.6	32.13	3.15	1.37	6	<i>sandy silt to clayey silt</i>	0.0018
6.8	32.13	3.15	1.37	6	<i>sandy silt to clayey silt</i>	0.0018
7	58.91	5.78	0.75	8	<i>sand to silty sand</i>	0.0019
7.2	58.91	5.78	0.75	8	<i>sand to silty sand</i>	0.0019
7.4	58.91	5.78	0.75	8	<i>sand to silty sand</i>	0.0019
7.6	80.33	7.88	0.55	8	<i>sand to silty sand</i>	0.0019
7.8	80.33	7.88	0.55	8	<i>sand to silty sand</i>	0.0019
8	101.75	9.98	0.43	9	<i>sand</i>	0.00195
8.2	101.75	9.98	0.43	9	<i>sand</i>	0.00195
8.4	123.17	12.08	0.36	9	<i>sand</i>	0.00195
8.6	123.17	12.08	0.36	9	<i>sand</i>	0.00195
8.8	192.78	18.91	0.23	9	<i>sand</i>	0.00195
9	208.85	20.48	0.21	9	<i>sand</i>	0.00195
9.2	219.56	21.53	0.20	9	<i>sand</i>	0.00195
9.4	230.27	22.58	0.19	9	<i>sand</i>	0.00195
9.6	246.33	24.16	0.18	10	<i>gravelly sand to sand</i>	0.002
9.8	262.40	25.73	0.17	10	<i>gravelly sand to sand</i>	0.002
10						

Ketinggian muka air tanah pada titik bor 1 dan 2 sedalam 2m dibawah permukaan tanah. Analisis selanjutnya dilakukan pada lapisan tanah yang jenuh air dan terdapat lapisan pasir yaitu pada lapisan tanah 3,4 m – 8,2 m pada titik 1 dan 3 m – 9,8 m pada titik 2.

#### 4.2 Percepatan Gempa pada Permukaan Tanah Menggunakan Rumus *Mc.Guire*

Untuk menghitung percepatan gempa pada lokasi penelitian, dilakukan analisis dengan menggunakan sejarah gempa yang pernah terjadi. Akuisisi data gempa dilakukan dengan memasukkan rentan waktu kejadian antara tahun 2008-2019 untuk data gempa dengan magnitudo lebih dari 5 dan radius kejadian 200 km dari lokasi penelitian pada laman *Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS)*.

##### - Penentuan wilayah gempa pengaruh

Data gempa yang akan digunakan adalah gempa dengan radius 200 km dari lokasi penelitian. Diketahui titik koordinat lokasi penelitian adalah  $0,552251^{\circ}$ LU dan  $123,057935^{\circ}$  BT. Diperkirakan gempa yang berpengaruh di lokasi tersebut adalah gempa dengan radius 200 km yang apabila dikonfersikan ke dalam derajat setara dengan  $1,81^{\circ}$  (1 derajat katulistiwa = 110 km). Sehingga ditentukan radius pengaruh gempa adalah :

$$\begin{aligned} \text{Latitude} &= 0,5252251^{\circ} \pm 1,81^{\circ} \\ &= -1,257739^{\circ} \\ &= 2,362251^{\circ} \\ \text{Longitude} &= 123,057935^{\circ} \pm 1,81^{\circ} \\ &= 121,247935^{\circ} \\ &= 124,867035^{\circ} \end{aligned}$$



Gambar 4. 2 Rekaman Gempa Gorontalo

Sumber : [https://ds.iris.edu/wilber3/find\\_event](https://ds.iris.edu/wilber3/find_event)

Contoh perhitungan hiposentrum dan percepatan gempa :

Digunakan data pada tanggal 2019-02-24 dengan jarak epicenter (E) sejauh 97.624 km, magnitude gempa sebesar (Ms) 5,1 SR dan kedalaman gempa sebesar (D) 97,67 km.

Perhitungan hiposentrum gempa

$$\begin{aligned} \text{Jarak hiposentrum (R)} &= \sqrt{D^2 + E^2} \\ &= \sqrt{97,69^2 + 97,624^2} \\ &= 138,0935 \text{ Km} \end{aligned}$$

Perhitungan percepatan gempa dengan rumus *Mc. Guire*

$$\begin{aligned} a_{max} &= \frac{472,3 \times 10^{0,278M_s}}{(R + 25)^{1,301}} \\ &= \frac{472,3 \times 10^{0,278(5,1)}}{(138,0935 + 25)^{1,301}} \\ &= 16,3545 \text{ gal} \end{aligned}$$

Tabel 4. 4

Perhitungan hiposentrum dan percepatan gempa

Date/Time	Coordinate		Depth	M	Epicenter	Hypocenter	a <sub>max</sub>
	Lalitude	Longitude					
2019-02-24/T13:29:33.487Z	0.4927	122.1832	97.67	5.1	97.624	138.093	16.355

Date/Time	Coordinate		Depth	M	Epicenter	Hypocenter	a <sub>max</sub>
	Lalitude	Longitude					
2018-12-14/T19:27:26.640Z	-0.0399	122.9645	147.89	5.2	66.727	162.247	14.568
2018-12-11/T11:23:24.150Z	-0.1177	124.482	46.4	5.1	175.161	181.202	12.054
2018-07-10/T15:33:21.730Z	0.2864	122.1082	196.54	5.1	109.809	225.136	9.375
2018-03-18/T11:35:05.850Z	0.488	121.4659	104.61	5.3	177.389	205.937	11.823
2018-01-15/T06:31:50.920Z	0.4389	123.6688	237.71	5.3	69.130	247.558	9.530
2017-11-22/T01:11:21.660Z	0.4157	124.4387	88.65	5.3	154.421	178.058	13.977
2017-10-18/T13:40:55.610Z	-0.2383	122.9492	92.61	5.6	88.825	128.322	24.409
2017-09-25/T22:07:03.500Z	0.8223	124.3318	219.8	5	144.922	263.276	7.311
2017-07-15/T12:12:21.490Z	0.4098	121.9844	113	5.9	120.575	165.249	22.337
2017-03-29/T08:20:12.110Z	0.0513	123.3717	137.95	5	65.776	152.829	13.708
2017-02-10/T18:28:02.970Z	-0.185	123.0199	81.13	5	82.170	115.473	18.629
2016-12-23/T19:15:39.190Z	-0.2458	124.4794	73.18	5	181.438	195.640	10.353
2016-07-29/T08:29:26.170Z	0.0828	123.4107	141.98	5.4	65.343	156.295	17.269
2016-07-20/T03:58:30.420Z	0.0371	122.9509	166.59	5.3	58.566	176.585	14.110
2016-06-30/T11:43:11.500Z	0.4991	123.6178	253.49	5	62.573	261.099	7.384
2015-10-09/T16:28:25.360Z	-0.0241	123.8928	96.26	5.1	112.901	148.367	15.105
2015-09-25/T08:47:47.000Z	1.2844	122.6907	6.57	5	91.200	91.437	23.781
2015-09-13/T01:13:14.640Z	0.0422	123.4494	143	5.4	71.548	159.900	16.832
2015-09-12/T09:49:27.030Z	0.0177	124.3731	58.85	5	158.002	168.606	12.273
2015-06-13/T23:45:45.130Z	-0.2268	124.4263	64.21	5.1	175.252	186.644	11.652
2015-04-24/T05:28:07.920Z	-0.196	124.2485	79.43	5.1	156.504	175.506	12.501
2015-03-28/T22:28:50.780Z	0.4002	121.9895	118	5.9	120.158	168.410	21.863
2015-03-02/T01:40:52.350Z	-0.0463	124.5345	71.49	5	177.330	191.198	10.631
2015-03-01/T03:32:33.780Z	0.0241	124.4702	62	5.6	167.814	178.901	16.845
2015-01-03/T08:03:31.370Z	0.007	123.7942	118.15	5	101.958	156.061	13.390
2014-11-15/T03:08:04.590Z	-0.1448	123.8891	90.28	5.9	120.726	150.749	24.764
2014-11-04/T04:19:10.360Z	0.0782	123.6538	129.16	5.1	84.733	154.473	14.440
2014-06-26/T11:28:21.890Z	0.0232	123.4569	141.74	5.4	73.737	159.773	16.847
2014-06-21/T21:51:50.490Z	-0.099	122.939	117	5.4	73.690	138.272	19.789
2014-03-06/T00:23:19.290Z	-0.1817	122.9097	140.88	5.1	83.347	163.689	13.529
2013-12-29/T14:29:52.780Z	0.0094	123.3694	155.67	5	69.646	170.540	12.115
2013-12-04/T17:43:24.390Z	0.0238	123.5477	136.82	5.2	80.179	158.582	14.948
2013-11-22/T05:37:18.080Z	-0.1938	122.9498	92.72	5.2	83.911	125.052	19.432
2013-10-12/T14:30:09.700Z	0.7452	122.2107	96.63	5.5	96.753	136.742	21.357
2013-09-10/T01:12:40.290Z	1.4292	122.2569	35.17	5.2	132.235	136.832	17.613
2013-09-09/T21:41:33.180Z	1.3814	122.2235	22.5	5.6	130.967	132.886	23.495
2013-08-15/T04:05:55.760Z	0.0081	123.1864	151	5.3	62.223	163.318	15.416
2012-12-28/T17:32:18.070Z	-0.145	122.918	112.1	5.5	79.160	137.232	21.273
2012-11-06/T01:42:26.330Z	1.357	122.167	35	5.6	133.665	138.172	22.510
2012-11-06/T01:38:20.120Z	1.281	122.088	17.4	5	135.070	136.186	15.577
2012-11-06/T01:36:21.630Z	1.374	122.2	25	5.7	132.264	134.606	24.697



Date/Time	Coordinate		Depth	M	Epicenter	Hypocenter	$a_{max}$
	Lalitude	Longitude					
2012-11-01/T23:37:18.240Z	1.229	122.105	35	5.4	130.128	134.752	20.358
2012-10-25/T10:09:45.000Z	0.69	124.55	174.2	5	166.766	241.156	8.112
2012-07-09/T12:25:47.340Z	-0.171	122.791	94.4	5.3	85.820	127.579	20.272
2012-06-20/T21:55:53.810Z	0.102	123.426	142.3	5.4	64.711	156.323	17.265
2012-05-13/T04:46:05.930Z	-0.115	122.996	92.1	5.3	74.589	118.515	21.953
2012-01-16/T08:26:17.390Z	0.002	123.09	168.5	5.2	61.345	179.319	13.005
2011-12-13/T07:52:11.930Z	0.041	123.03	161	6	56.988	170.788	22.941
2011-11-23/T22:06:00.410Z	1.339	121.662	48.6	5	178.386	184.888	11.049
2011-11-15/T10:43:51.850Z	-0.095	121.914	276.2	5.7	146.331	312.568	9.320
2011-11-02/T06:33:29.680Z	-0.012	123.352	138.8	5	70.807	155.818	13.414
2011-11-01/T01:03:53.480Z	0.048	123.366	143.3	5.3	65.755	157.666	16.040
2011-07-08/T05:22:40.820Z	0.131	123.244	159.3	5.3	51.242	167.339	14.998
2011-07-01/T02:38:49.430Z	0.938	121.743	59.6	5	152.565	163.793	12.681
2011-05-27/T05:39:30.630Z	1.545	123.899	286.1	5.1	144.821	320.665	6.155
2011-05-06/T06:46:23.470Z	-0.065	122.948	82	5.5	69.787	107.677	27.635
2011-05-05/T08:45:29.000Z	-0.199	124.483	73	5	179.300	193.591	10.480
2010-12-11/T07:58:43.170Z	0.257	122.031	210	5.1	118.970	241.358	8.639
2010-10-07/T01:42:51.880Z	1.038	124.395	188	5.1	158.323	245.785	8.456
2010-08-25/T06:25:15.470Z	0.397	123.844	210.7	5	89.162	228.789	8.630
2010-02-26/T04:41:28.990Z	0.893	123.181	69.5	5	40.331	80.354	27.086
2010-01-21/T17:00:51.100Z	1.446	122.201	32.5	5.2	137.852	141.631	16.956
2010-01-10/T08:09:45.030Z	-0.019	123.169	176.2	5	64.766	187.726	10.857
2009-12-23/T18:13:18.810Z	0.457	121.646	123.2	5	157.554	200.004	10.093
2009-12-20/T13:25:48.050Z	-0.176	124.477	56.6	5	177.525	186.330	10.951
2009-08-26/T23:27:53.330Z	0.13	123.521	141	5.2	69.733	157.301	15.085
2009-08-15/T12:30:12.490Z	0.1	123.411	160.3	5.3	63.843	172.546	14.486
2009-07-10/T03:48:06.780Z	0.251	123.295	253.7	5.3	42.647	257.260	9.106
2009-06-28/T14:19:30.000Z	1.381	122.204	36.7	5.7	132.485	137.474	24.132
2009-06-28/T14:18:44.480Z	1.342	122.286	35.2	5	122.955	127.894	16.685
2009-02-11/T04:17:31.270Z	-0.084	124.285	62.7	5	153.835	166.122	12.481
2009-02-09/T10:47:49.440Z	1.317	123.467	23.5	5.4	96.539	99.358	28.200
2009-01-04/T07:09:02.360Z	1.095	121.856	50.4	5	146.825	155.234	13.470
2009-01-01/T10:35:34.280Z	1.319	121.838	33.1	5.1	160.412	163.791	13.520
2008-12-11/T21:40:51.870Z	0.063	123.433	129	5.9	68.599	146.106	25.641
2008-11-16/T18:20:32.430Z	1.127	121.775	35	5.5	156.508	160.374	17.885
2008-11-16/T17:34:38.650Z	1.291	122.106	35	5.6	134.153	138.644	22.425
2008-11-16/T17:02:32.700Z	1.271	122.091	30	7.4	134.136	137.450	71.659
2008-10-26/T09:08:34.690Z	-0.141	123.015	81	5.6	77.311	111.973	28.265
2008-06-02/T19:47:16.200Z	-0.029	123.282	153	5.3	69.325	167.973	14.934
2008-02-09/T14:37:49.460Z	-0.122	124.368	35	5.1	163.986	167.679	13.166
2008-02-07/T07:50:55.250Z	1.228	122.653	35.6	5.8	87.717	94.666	38.298



Date/Time	Coordinate		Depth	M	Epicenter	Hypocenter	a <sub>max</sub>
	Lalitude	Longitude					
2008-01-24/T20:04:15.550Z	-0.114	124.001	107.9	5	128.507	167,799	12.339

Dari perhitungan di atas didapatkan nilai percepatan gempa maksimum sebesar 71,659 gal, nilai ini kemudian digunakan dalam analisis potensi likuifaksi pada perhitungan selanjutnya.

### 4.3 Analisis Potensi Likuifaksi

Analisis potensi likuifaksi dilakukan pada setiap lapisan tanah dengan menghitung *Cyclic Stress Ratio (CSR)* dan *Cyclic Resistant Ratio (CRR)*, dimana pada perhitungannya diperlukan perhitungan tegangan vertikal total dan tegangan vertikal efektif.

#### 4.3.1 Perhitungan Tegangan Vertikal Total ( $\sigma_v$ ) dan Tegangan Vertikal Efektif ( $\sigma'_v$ )

##### 4.3.1.1 Titik 1

- Tegangan Vertikal Total

Tegangan vertikal total dihitung dengan rumus berikut:

$$\sigma_v = \gamma_{sat} \cdot z$$

Dimana:

$\sigma_v$  = Tegangan vertikal total

$\gamma_{sat}$  = Berat volume tanah jenuh

$z$  = kedalaman tanah

Contoh perhitungan tegangan vertikal total pada titik 1 pada kedalaman 4m:

Diketahui :  $\gamma_{sat} = 0,00190 \text{ kg/cm}^3$

$$\sigma_v = \gamma_{sat} \cdot z$$

$$= 0,00190 \times 400$$

$$= 0,76 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_v = 0,76 \times 98,07$$

$$= 74,5332 \text{ kN/m}^2$$

- Tegangan Vertikal Efektif

Tegangan vertikal efektif didapat dengan rumus berikut:

$$\sigma'_v = \sigma_v - u$$

$$u = \gamma_w \cdot z$$



Dimana:

$\sigma'v$  = Tegangan vertikal efektif ( $\text{kN/m}^2$ )

$\sigma v$  = Tegangan vertikal total ( $\text{kN/m}^2$ )

$u$  = Tegangan air pori ( $\text{kN/m}^2$ )

$\gamma w$  = Berat isi air ( $9,807 \text{ kN/m}^3$ )

$z$  = Kedalaman tanah (m)

Contoh perhitungan tegangan vertikal efektif di titik bor 1 pada kedalaman 4m,

diketahui:

Muka air tanah = 2 m

$\sigma v = 74,5332 \text{ kN/m}^2$

Penyelesaian

- $u = \gamma w \cdot z$   
 $= 9.807 \times (4-2)$   
 $= 19,241 \text{ kN/m}^2$

- $\sigma'v = (\sigma v - u)$   
 $= (74,5332 - 19,2413)$   
 $= 55,2919 \text{ kN/m}^2$

Tabel 4. 5

Perhitungan Tegangan Vertikal Total dan Tegangan Fertikal Efektif Pada Titik Bor 1

Depth	qc (MPa)	FR (%)	$\gamma$ ( $\text{kg/cm}^3$ )	$\sigma v$ ( $\text{kN/m}^2$ )	$u$ ( $\text{kN/m}^3$ )	$\sigma'v$ ( $\text{kN/m}^2$ )
0	0.00	0.00	0.00000			
0.2	0.53	8.22	0.00175	3.43245	0	3.43245
0.4	1.05	4.11	0.00175	6.8649	0	6.8649
0.6	1.05	4.11	0.00175	10.29735	0	10.29735
0.8	1.05	4.11	0.00175	13.7298	0	13.7298
1	1.05	4.11	0.00175	17.16225	0	17.16225
1.2	1.58	2.74	0.00180	21.18312	0	21.18312
1.4	1.58	2.74	0.00180	24.71364	0	24.71364
1.6	1.58	2.74	0.00180	28.24416	0	28.24416
1.8	1.58	2.74	0.00180	31.77468	0	31.77468
2	1.58	2.74	0.00180	35.3052	0	35.3052





<i>Depth</i>	<i>qc (MPa)</i>	<i>FR (%)</i>	<i><math>\gamma</math> (km/cm<sup>3</sup>)</i>	<i><math>\sigma_v</math> (kN/m<sup>2</sup>)</i>	<i>u (kN/m<sup>3</sup>)</i>	<i><math>\sigma'v</math> (kN/m<sup>2</sup>)</i>
2.2	1.58	2.74	0.00180	38.83572	1.924133	36.91159
2.4	1.26	2.05	0.00180	42.36624	3.848267	38.51797
2.6	1.58	2.74	0.00180	45.89676	5.7724	40.12436
2.8	1.58	2.74	0.00180	49.42728	7.696534	41.73075
3	1.58	2.74	0.00180	52.9578	9.620667	43.33713
3.2	1.58	2.74	0.00180	56.48832	11.5448	44.94352
3.4	3.68	1.17	0.00185	61.68603	13.46893	48.2171
3.6	6.30	0.68	0.00190	67.07988	15.39307	51.68681
3.8	6.30	0.68	0.00190	70.80654	17.3172	53.48934
4	6.30	0.68	0.00190	74.5332	19.24133	55.29187
4.2	4.41	0.59	0.00190	78.25986	21.16547	57.09439
4.4	1.79	1.45	0.00180	77.67144	23.0896	54.58184
4.6	1.79	1.45	0.00180	81.20196	25.01373	56.18823
4.8	1.79	1.45	0.00180	84.73248	26.93787	57.79461
5	2.10	2.05	0.00180	88.263	28.862	59.401
5.2	3.68	1.17	0.00185	94.34334	30.78613	63.55721
5.4	3.68	1.17	0.00185	97.97193	32.71027	65.26166
5.6	3.36	0.77	0.00185	101.6005	34.6344	66.96612
5.8	6.30	0.68	0.00190	108.0731	36.55853	71.51461
6	3.36	0.77	0.00185	108.8577	38.48267	70.37503
6.2	3.68	1.17	0.00185	112.4863	40.4068	72.07949
6.4	3.68	1.17	0.00185	116.1149	42.33093	73.78395
6.6	3.68	1.17	0.00185	119.7435	44.25507	75.4884
6.8	4.20	1.03	0.00185	123.3721	46.1792	77.19286
7	4.20	1.03	0.00185	127.0007	48.10334	78.89732
7.2	7.88	0.55	0.00190	134.1598	50.02747	84.13229
7.4	15.23	0.28	0.00195	141.515	51.9516	89.56341
7.6	18.38	0.23	0.00195	145.3397	53.87574	91.464
7.8	20.48	0.21	0.00195	149.1645	55.79987	93.3646
8	22.58	0.19	0.00195	152.9892	57.724	95.2652
8.2	25.73	0.17	0.00200	160.8348	59.64814	101.1867
8.4						



### 4.3.1.2 Titik 2

#### - Tegangan Vertikal Total

Tegangan vertikal total dihitung dengan rumus berikut:

$$\sigma_v = \gamma_{sat} \cdot z$$

Dimana:

$\sigma_v$  = Tegangan vertikal total

$\gamma_{sat}$  = Berat volume tanah jenuh

$z$  = kedalaman tanah

Contoh perhitungan tegangan vertikal total pada titik 2 pada kedalaman 4m:

Diketahui :  $\gamma_{sat} = 0,00185 \text{ kg/cm}^3$

$$\begin{aligned} \sigma_v &= \gamma_{sat} \cdot z \\ &= 0,00185 \times 400 \\ &= 0,74 \text{ kg/cm}^2 \\ \sigma_v &= 0,74 \times 98,07 \\ &= 72,5718 \text{ kN/m}^2 \end{aligned}$$

#### - Tegangan Vertikal Efektif

Tegangan vertikal efektif didapat dengan rumus berikut:

$$\sigma'_v = \sigma_v - u$$

$$u = \gamma_w \cdot z$$

Dimana:

$\sigma'_v$  = Tegangan vertikal efektif (kN/m<sup>2</sup>)

$\sigma_v$  = Tegangan vertikal total (kN/m<sup>2</sup>)

$u$  = Tegangan air pori (kN/m<sup>2</sup>)

$\gamma_w$  = Berat isi air (9.807 kN/m<sup>3</sup>)

$z$  = Kedalaman tanah (m)

Contoh perhitungan tegangan vertikal efektif di titik bor 1 pada kedalaman 4m,

diketahui:

Muka air tanah = 2 m

$$\sigma_v = 72,5718 \text{ kN/m}^2$$

Penyelesaian



- $u = \gamma_w \cdot z$   
 $= 9,807 \times (4-2)$   
 $= 19,2413 \text{ kN/m}^2$
- $\sigma'_v = (\sigma_v - u)$   
 $= (72,5718 - 19,2413)$   
 $= 53,3305 \text{ kN/m}^2$

Tabel 4. 6

Perhitungan Tegangan Vertikal Total dan Tegangan Fertikal Efektif Pada Titik Bor 2

Depth	qc (MPa)	FR (%)	$\gamma$ (kg/cm <sup>3</sup> )	$\sigma_v$ (kN/m <sup>2</sup> )	u (kN/m <sup>3</sup> )	$\sigma'_v$ (kN/m <sup>2</sup> )
0						
0.2	0.210066	12.32493	0.00175	3.43245	0	3.43245
0.4	0.210066	12.32493	0.00175	6.8649	0	6.8649
0.6	0.525165	8.21662	0.00125	7.35525	0	7.35525
0.8	0.525165	8.21662	0.00125	9.807	0	9.807
1	0.525165	8.21662	0.00125	12.25875	0	12.25875
1.2	1.05033	4.10831	0.00125	14.7105	0	14.7105
1.4	1.05033	4.10831	0.00125	17.16225	0	17.16225
1.6	1.05033	4.10831	0.00125	19.614	0	19.614
1.8	1.05033	4.10831	0.00125	22.06575	0	22.06575
2	1.05033	4.10831	0.00125	24.5175	0	24.5175
2.2	1.05033	4.10831	0.00125	26.96925	1.924133	25.04512
2.4	1.05033	4.10831	0.00125	29.421	3.848267	25.57273
2.6	1.05033	4.10831	0.00125	31.87275	5.7724	26.10035
2.8	1.05033	4.10831	0.00125	34.3245	7.696534	26.62797
3	3.676154	1.173803	0.0018	52.9578	9.620667	43.33713
3.2	3.676154	1.173803	0.0018	56.48832	11.5448	44.94352
3.4	7.352308	0.586901	0.0019	63.35322	13.46893	49.88429
3.6	7.352308	0.586901	0.0019	67.07988	15.39307	51.68681
3.8	7.352308	0.586901	0.0019	70.80654	17.3172	53.48934
4	3.361055	0.770308	0.00185	72.5718	19.24133	53.33047
4.2	3.361055	0.770308	0.00185	76.20039	21.16547	55.03492
4.4	3.361055	0.770308	0.00185	79.82898	23.0896	56.73938
4.6	3.361055	0.770308	0.00185	83.45757	25.01373	58.44384
4.8	2.310725	1.120448	0.0018	84.73248	26.93787	57.79461



Depth	$q_c$ (MPa)	FR (%)	$\gamma$ ( $\text{km}/\text{cm}^3$ )	$\sigma_v$ ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )	$u$ ( $\text{kN}/\text{m}^3$ )	$\sigma'v$ ( $\text{kN}/\text{m}^2$ )
5	2.310725	1.120448	0.0018	88.263	28.862	59.401
5.2	2.310725	1.120448	0.0018	91.79352	30.78613	61.00739
5.4	2.310725	1.120448	0.0018	95.32404	32.71027	62.61377
5.6	2.310725	1.120448	0.0018	98.85456	34.6344	64.22016
5.8	2.310725	1.120448	0.0018	102.3851	36.55853	65.82655
6	2.310725	1.120448	0.0018	105.9156	38.48267	67.43293
6.2	2.310725	1.120448	0.0018	109.4461	40.4068	69.03932
6.4	2.310725	1.120448	0.0018	112.9766	42.33093	70.64571
6.6	3.150989	1.369437	0.0018	116.5072	44.25507	72.25209
6.8	3.150989	1.369437	0.0018	120.0377	46.1792	73.85848
7	5.776813	0.746965	0.0019	130.4331	48.10334	82.32977
7.2	5.776813	0.746965	0.0019	134.1598	50.02747	84.13229
7.4	5.776813	0.746965	0.0019	137.8864	51.9516	85.93482
7.6	7.877473	0.547775	0.0019	141.6131	53.87574	87.73734
7.8	7.877473	0.547775	0.0019	145.3397	55.79987	89.53987
8	9.978132	0.432454	0.00195	152.9892	57.724	95.2652
8.2	9.978132	0.432454	0.00195	156.8139	59.64814	97.16579
8.4	12.07879	0.357244	0.00195	160.6387	61.57227	99.06639
8.6	12.07879	0.357244	0.00195	164.4634	63.4964	100.967
8.8	18.90593	0.228239	0.00195	168.2881	65.42054	102.8676
9	20.48143	0.210683	0.00195	172.1129	67.34467	104.7682
9.2	21.53176	0.200405	0.00195	175.9376	69.2688	106.6688
9.4	22.58209	0.191084	0.00195	179.7623	71.19294	108.5694
9.6	24.15758	0.178622	0.002	188.2944	73.11707	115.1773
9.8	25.73308	0.167686	0.002	192.2172	75.0412	117.176

### 4.3.2 Perhitungan CRR dan CSR pada Titik 1

Analisis potensi likuifaksi dilakukan dengan perhitungan CRR dan CSR pada setiap lapisan tanah. Contoh perhitungan berikut dihitung berdasarkan salah satu data titik sondir 1 yaitu pada kedalaman 4 m dari permukaan tanah, dengan data dan ketentuan sebagai berikut :

$$q_c = 64,26 \text{ kg}/\text{cm}^3 = 6301,753 \text{ kN}/\text{m}^3$$

$$a_{\text{max}} = 71.659 \text{ gal}$$

$$\sigma'v = 55,2918 \text{ kN}/\text{m}^2$$

$$\sigma_v = 74,5332 \text{ kN}/\text{m}^2$$

$$P_a = 98,065 \text{ kN}/\text{m}^2$$



- Mencari nilai  $I_c$

$$Q = [(q_c - \sigma_v) / P_a] \times [(P_a / \sigma'_v)^n]$$

$$= [(6301,66 - 74,5332) / 98,065] \times [(98,065 / 55,291)^2]$$

$$= 84,567$$

$$F = (f_s / q_c - \sigma_v) \times 100\%$$

$$= ((0,44 \times 98,065) / 6301,66 - 74,5332) \times 100\%$$

$$= 0,0069$$

$$I_c = [(3,47 - \log Q)^2 + (1,22 + \log F)^2]^{0,5}$$

$$= [(3,47 - \log 84,567)^2 + (1,22 + \log 0,0069)^2]^{0,5}$$

$$= 1,806 \rightarrow \text{bukan tanah padat}$$

- Normalisasi dari tahanan penetrasi konus

$$C_N = (P_a / \sigma'_{vo})^n$$

$$= (98,065 / 55,2918)^{0,5}$$

$$= 1,3318$$

$$q_{c1N} = C_N (q_c / P_a)$$

$$= 1,3318 (6301,66 / 98,065)$$

$$= 85,581$$

- Menghitung  $[q_{c1N}]_{cs}$

Karena  $I_c > 1,64$ , maka

$$K_c = -0,403 I_c^4 + 5,581 I_c^3 - 21,63 I_c^2 + 33,75 I_c - 17,88$$

$$= 1,112$$

$$[q_{c1N}]_{cs} = K_c \times q_{c1N}$$

$$= 1,112 \times 85,581$$

$$= 95,101$$

- Menghitung CRR

Karena nilai  $50 \leq [q_{c1N}]_{cs} \leq 160$

$$\text{Maka, } CRR_{7,5} = 93 \left[ \frac{[q_{c1N}]_{cs}}{1.000} \right]^3 + 0,08$$

$$= 93 \left[ \frac{95,101}{1.000} \right]^3 + 0,08$$

$$= 93 \left[ \frac{95,101}{1.000} \right]^3 + 0,08$$

$$= 0,159$$

- Untuk erencanaan dengan tidak menggunakan magnitudo gempa sebesar 7,5 SR perlu dihitung faktor koreksi

$$CRR = CRR_{7,5} \times MSF$$

Untuk :

$$M_w < 7,5 ; MSF = \frac{10^{2,24}}{M_w^{2,56}}$$

$$M_w > 7,5 ; MSF = \left(\frac{M_w}{7,5}\right)^{-2,56}$$

Perencanaan dengan menggunakan besar magnitude gempa 8 SR adalah:

$$MSF = 1,0348$$

Diperoleh nilai CRR

$$CRR = CRR_{7,5} \times MSF$$

$$CRR = 0,1599 \times 1,0348$$

$$= 0,166$$

- Menghitung CSR

Karena kedalaman tanah yang ditinjau kurang dari 9,15 m maka koefisien tegangan reduksi dihitung berdasarkan rumus:

$$r_d = 1.0 - 0.00765z$$

$$= 1.0 - 0.00765(4)$$

$$= 0,9694$$

$$CSR = \left(\frac{\tau_v}{\sigma'_v}\right) = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g}\right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\right) r_d$$

$$= 0.65 \left(\frac{0,7169}{9,807}\right) \left(\frac{74,5332}{55,2918}\right) \times 0,9694$$

$$= 0,06206$$

Tabel 4. 7 Perhitungan CRR pada titik bor 1

Depth	qc	Cn	qc1N	Q	F	Ic	Kc	[qc1N]cs	CRR
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	525.14	28.571	153	28.436	0.083	2.021	1.328	203.208	0.890
0.4	1050.28	14.286	153	40.214	0.041	1.873	1.164	178.127	0.627
0.6	1050.28	9.524	102	32.727	0.041	1.962	1.253	127.823	0.284
0.8	1050.28	7.143	77	28.249	0.042	2.025	1.335	102.096	0.185
1	1050.28	5.714	61	25.183	0.042	2.075	1.411	86.368	0.145
1.2	1575.41	4.630	74	34.101	0.028	1.966	1.258	93.588	0.162
1.4	1575.41	3.968	64	31.499	0.028	2.000	1.300	82.879	0.138
1.6	1575.41	3.472	56	29.398	0.028	2.029	1.340	74.770	0.123
1.8	1575.41	3.086	50	27.653	0.028	2.055	1.380	68.406	0.114
2	1575.41	2.778	45	26.174	0.028	2.079	1.418	63.269	0.107
2.2	1575.41	2.657	43	25.540	0.028	2.089	1.436	61.277	0.105
2.4	1260.33	2.546	33	19.817	0.021	2.220	1.716	56.154	0.100



Depth	qc	Cn	qc1N	Q	F	Ic	Kc	[qc1N]cs	CRR
2.6	1575.41	2.444	39	24.383	0.028	2.109	1.471	57.758	0.101
2.8	1575.41	2.350	38	23.854	0.028	2.118	1.488	56.195	0.100
3	1575.41	2.263	36	23.354	0.028	2.127	1.506	54.744	0.099
3.2	1575.41	2.182	35	22.879	0.028	2.136	1.523	53.393	0.097
3.4	3675.97	1.426	53	52.561	0.012	1.885	1.175	62.833	0.107
3.6	6301.66	1.377	89	87.571	0.007	1.794	1.102	97.546	0.172
3.8	6301.66	1.354	87	86.031	0.007	1.800	1.107	96.293	0.169
4	6301.66	1.332	86	84.567	0.007	1.806	1.111	95.101	0.166
4.2	4411.16	1.311	59	57.906	0.006	1.980	1.275	75.182	0.124
4.4	1785.47	1.340	24	23.343	0.015	2.186	1.632	39.836	0.089
4.6	1785.47	1.321	24	22.959	0.015	2.192	1.648	39.643	0.089
4.8	1785.47	1.303	24	22.591	0.015	2.199	1.664	39.462	0.089
5	2100.55	1.285	28	26.366	0.021	2.098	1.450	39.916	0.089
5.2	3675.97	1.242	47	45.367	0.012	1.943	1.233	57.394	0.101
5.4	3675.97	1.226	46	44.725	0.012	1.949	1.239	56.921	0.101
5.6	3360.88	1.210	41	40.220	0.008	2.063	1.391	57.693	0.101
5.8	6301.66	1.171	75	73.958	0.007	1.855	1.149	86.479	0.145
6	3360.88	1.180	40	39.146	0.008	2.073	1.408	56.954	0.101
6.2	3675.97	1.166	44	42.385	0.012	1.970	1.263	55.220	0.099
6.4	3675.97	1.153	43	41.850	0.012	1.975	1.269	54.836	0.099
6.6	3675.97	1.140	43	41.333	0.012	1.980	1.275	54.467	0.098
6.8	4201.10	1.127	48	46.868	0.011	1.951	1.241	59.939	0.103
7	4201.10	1.115	48	46.317	0.011	1.956	1.246	59.532	0.103
7.2	7877.07	1.080	87	85.244	0.006	1.854	1.149	99.614	0.178
7.4	15229.00	1.046	163	160.988	0.003	1.830	1.129	183.455	0.677
7.6	18379.83	1.035	194	192.536	0.002	1.839	1.136	220.520	1.115
7.8	20480.38	1.025	214	212.479	0.002	1.849	1.144	244.862	1.495
8	22580.94	1.015	234	232.041	0.002	1.859	1.153	269.333	1.963
8.2	25731.77	0.984	258	256.701	0.002	1.880	1.171	302.479	2.746

Tabel 4. 8 Perhitungan CSR pada titik bor 1

Depth	qc	$\sigma_v$	$\sigma'_v$	rd	CSR
0					
0.2	525.14	3.43245	3.43245	0,9984	0.047422339
0.4	1050.28	6.8649	6.8649	0,9969	0.047349671
0.6	1050.28	10.29735	10.29735	0,9951	0.047277004
0.8	1050.28	13.7298	13.7298	0,9938	0.047204337
1	1050.28	17.16225	17.16225	0,9923	0.047131669
1.2	1575.41	21.18312	21.18312	0,9908	0.047059002
1.4	1575.41	24.71364	24.71364	0,9892	0.046986335
1.6	1575.41	28.24416	28.24416	0,9877	0.046913667
1.8	1575.41	31.77468	31.77468	0,9862	0.046841

Depth	qc	$\sigma_v$	$\sigma'_v$	rd	CSR
2	1575.41	35.3052	35.3052	0,9847	0.046768332
2.2	1575.41	38.83572	36.91159	0.98317	0.049129825
2.4	1260.33	42.36624	38.51797	0.98164	0.051281024
2.6	1575.41	45.89676	40.12436	0.98011	0.053247188
2.8	1575.41	49.42728	41.73075	0.97858	0.055049686
3	1575.41	52.9578	43.33713	0.97705	0.056706716
3.2	1575.41	56.48832	44.94352	0.97552	0.058233877
3.4	3675.97	61.68603	48.2171	0.97399	0.059181806
3.6	6301.66	67.07988	51.68681	0.97246	0.059942137
3.8	6301.66	70.80654	53.48934	0.97093	0.061043863
4	6301.66	74.5332	55.29187	0.9694	0.06206396
4.2	4411.16	78.25986	57.09439	0.96787	0.063010161
4.4	1785.47	77.67144	54.58184	0.96634	0.065311716
4.6	1785.47	81.20196	56.18823	0.96481	0.066223318
4.8	1785.47	84.73248	57.79461	0.96328	0.067075366
5	2100.55	88.263	59.401	0.96175	0.067872693
5.2	3675.97	94.34334	63.55721	0.96022	0.067696334
5.4	3675.97	97.97193	65.26166	0.95869	0.068354904
5.6	3360.88	101.6005	66.96612	0.95716	0.068972075
5.8	6301.66	108.0731	71.51461	0.95563	0.068589991
6	3360.88	108.8577	70.37503	0.9541	0.07009425
6.2	3675.97	112.4863	72.07949	0.95257	0.070604559
6.4	3675.97	116.1149	73.78395	0.95104	0.071084144
6.6	3675.97	119.7435	75.4884	0.94951	0.071535085
6.8	4201.10	123.3721	77.19286	0.94798	0.071959281
7	4201.10	127.0007	78.89732	0.94645	0.072358465
7.2	7877.07	134.1598	84.13229	0.94492	0.071565308
7.4	15229.00	141.515	89.56341	0.94339	0.07079639
7.6	18379.83	145.3397	91.464	0.94186	0.071083445
7.8	20480.38	149.1645	93.3646	0.94033	0.071352859
8	22580.94	152.9892	95.2652	0.9388	0.071605689
8.2	25731.77	160.8348	101.1867	0.93727	0.070756999
8.4	0.00	0	0	0	0

#### 4.3.3 Perhitungan CRR dan CSR pada Titik 2

Analisis potensi likuifaksi dilakukan dengan perhitungan CRR dan CSR pada setiap lapisan tanah. Contoh perhitungan berikut dihitung berdasarkan salah satu data titik sondir 2 yaitu pada kedalaman 3 m dari permukaan tanah, dengan data dan ketentuan sebagai berikut :

$$q_c = 37,49 \text{ kg/cm}^3 = 3676 \text{ kN/m}^3$$



$$a_{\max} = 71.659 \text{ gal}$$

$$\sigma'_v = 43,337 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_v = 52,958 \text{ kN/m}^2$$

$$P_a = 98,065 \text{ kN/m}^2$$

- Mencari nilai  $I_c$

$$Q = [(q_c - \sigma_v) / P_a] \times [(P_a / \sigma'_v)^n]$$

$$= [(3676 - 52,958) / 98,065] \times [(98,065 / 43,337)^2]$$

$$= 55,575$$

$$F = (f_s / q_c - \sigma_v) \times 100\%$$

$$= ((0,44 \times 98,065) / 3676 - 52,958) \times 100\%$$

$$= 0,0119$$

$$I_c = [(3,47 - \log Q)^2 + (1,22 + \log F)^2]^{0,5}$$

$$= [(3,47 - \log 55,575)^2 + (1,22 + \log 0,0119)^2]^{0,5}$$

$$= 1,863 \rightarrow \text{bukan tanah padat}$$

- Normalisasi dari tahanan penetrasi konus

$$C_N = (P_a / \sigma'_v)^n$$

$$= (98,065 / 43,337)^{0,5}$$

$$= 2,26$$

$$q_{c1N} = C_N (q_c / P_a)$$

$$= 2,26 (3676 / 98,065)$$

$$= 84,826$$

- Menghitung  $[q_{c1N}]_{cs}$

Karena  $I_c > 1,64$ , maka

$$- K_c = -0,403 I_c^4 + 5,581 I_c^3 - 21,63 I_c^2 + 33,75 I_c - 17,88$$

$$= 1,1565$$

$$- [q_{c1N}]_{cs} = K_c \times q_{c1N}$$

$$= 1,1565 \times 84,826$$

$$= 98,099$$

- Menghitung CRR

Karena nilai  $50 \leq [q_{c1N}]_{cs} \leq 160$

$$\text{Maka, CRR} = 93 [(q_{c1N}]_{cs} / 1.000]^3 + 0,08$$

$$= 93 [98,099 / 1.000]^3 + 0,08$$

$$= 0,167$$



-Untuk erencanaan dengan tidak menggunakan magnitudo gempa sebesar 7,5 SR

perlu dihitung faktor koreksi

$$CRR = CRR_{7,5} \times MSF$$

Untuk :

$$M_w < 7,5 ; MSF = \frac{10^{2,24}}{M_w^{2,56}}$$

$$M_w > 7,5 ; MSF = \left(\frac{M_w}{7,5}\right)^{-2,56}$$

Perencanaan dengan menggunakan besar magnitudo gempa 8 SR adalah:

$$MSF = 1,0348$$

Diperoleh nilai CRR

$$CRR = CRR_{7,5} \times MSF$$

$$CRR = 0,167 \times 1,0348$$

$$= 0,174$$

- Menghitung CSR

Karena kedalaman tanah yang ditinjau kurang dari 9,15 m maka koefisien tegangan reduksi dihitung berdasarkan rumus:

$$r_d = 1.0 - 0.00765z$$

$$= 1.0 - 0.00765(3)$$

$$= 0,9771$$

$$CSR = \left(\frac{\tau_v}{\sigma'_v}\right) = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g}\right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\right) r_d$$

$$= 0.65 \left(\frac{0,7169}{9,807}\right) \left(\frac{74,5332}{55,2918}\right) \times 0,9771$$

$$= 0,0337$$

Tabel 4. 9 Perhitungan CRR pada titik bor 2

Depth	qc	Cn	qc1N	Q	F	Ic	Kc	[qc1N]cs	CRR
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.2	210.06	28.57	61.2	11.262	0.125	2.44	2.48	151.75	0.419
0.4	210.06	14.29	30.6	7.831	0.127	2.60	3.31	101.17	0.182
0.6	525.14	13.33	71.4	19.279	0.083	2.19	1.64	117.19	0.238
0.8	525.14	10.00	53.55	16.617	0.084	2.25	1.81	96.90	0.170
1	525.14	8.00	42.84	14.792	0.084	2.30	1.96	84.11	0.140
1.2	1050.28	6.67	71.4	27.265	0.042	2.04	1.36	96.88	0.170
1.4	1050.28	5.71	61.2	25.183	0.042	2.08	1.41	86.37	0.145
1.6	1050.28	5.00	53.55	23.500	0.042	2.10	1.46	78.38	0.129



Depth	qc	Cn	qc1N	Q	F	Ic	Kc	[qc1N] <sub>cs</sub>	CRR
1.8	1050.28	4.44	47.6	22.104	0.042	2.13	1.51	72.09	0.119
2	1050.28	4.00	42.84	20.919	0.042	2.16	1.56	66.99	0.112
2.2	1050.28	3.92	41.9375	20.648	0.042	2.16	1.58	66.09	0.111
2.4	1050.28	3.83	41.07225	20.385	0.042	2.17	1.59	65.23	0.109
2.6	1050.28	3.76	40.24198	20.130	0.042	2.17	1.60	64.40	0.108
2.8	1050.28	3.68	39.44461	19.881	0.042	2.18	1.61	63.60	0.108
3	3675.97	2.26	84.82688	55.575	0.012	1.86	1.16	98.10	0.174
3.2	3675.97	2.18	81.79497	54.520	0.012	1.87	1.16	95.13	0.166
3.4	7351.93	1.97	147.3873	104.209	0.006	1.77	1.08	159.76	0.475
3.6	7351.93	1.90	142.2473	102.323	0.006	1.77	1.09	154.82	0.440
3.8	7351.93	1.83	137.4537	100.533	0.006	1.78	1.09	150.21	0.409
4	3360.88	1.84	63.02317	45.470	0.008	2.02	1.32	83.41	0.139
4.2	3360.88	1.78	61.07131	44.711	0.008	2.02	1.33	81.38	0.135
4.4	3360.88	1.73	59.23673	43.986	0.008	2.03	1.34	79.47	0.131
4.6	3360.88	1.68	57.50915	43.292	0.008	2.04	1.35	77.66	0.128
4.8	2310.61	1.70	39.98167	29.567	0.011	2.12	1.50	60.03	0.104
5	2310.61	1.65	38.90045	29.118	0.012	2.13	1.51	58.88	0.102
5.2	2310.61	1.61	37.87616	28.686	0.012	2.14	1.53	57.79	0.101
5.4	2310.61	1.57	36.90443	28.271	0.012	2.14	1.54	56.75	0.100
5.6	2310.61	1.53	35.98131	27.870	0.012	2.15	1.55	55.76	0.099
5.8	2310.61	1.49	35.10324	27.484	0.012	2.15	1.56	54.82	0.099
6	2310.61	1.45	34.26702	27.112	0.012	2.16	1.57	53.92	0.098
6.2	2310.61	1.42	33.4697	26.751	0.012	2.16	1.59	53.06	0.097
6.4	2310.61	1.39	32.70865	26.403	0.012	2.17	1.60	52.23	0.096
6.6	3150.83	1.36	43.61104	36.048	0.014	2.02	1.32	57.59	0.101
6.8	3150.83	1.33	42.66252	35.612	0.014	2.02	1.33	56.62	0.100
7	5776.52	1.19	70.16677	62.837	0.008	1.90	1.19	83.34	0.138
7.2	5776.52	1.17	68.66345	62.119	0.008	1.90	1.19	81.84	0.136
7.4	5776.52	1.14	67.2232	61.423	0.008	1.91	1.20	80.39	0.133
7.6	7877.07	1.12	89.78472	83.394	0.006	1.86	1.16	103.83	0.190
7.8	7877.07	1.10	87.97726	82.511	0.006	1.87	1.16	102.03	0.185
8	9977.62	1.03	104.7406	101.646	0.004	1.85	1.15	120.33	0.250
8.2	9977.62	1.01	102.6918	100.608	0.004	1.86	1.15	118.27	0.242
8.4	12078.18	0.99	121.9262	120.911	0.004	1.85	1.14	139.60	0.345
8.6	12078.18	0.97	119.6311	119.729	0.004	1.85	1.15	137.29	0.332
8.8	18904.97	0.95	183.789	186.550	0.002	1.86	1.15	211.67	0.995
9	20480.38	0.94	195.4928	200.355	0.002	1.87	1.16	226.34	1.198
9.2	21530.66	0.92	201.8562	208.794	0.002	1.87	1.16	234.74	1.327
9.4	22580.94	0.90	207.9969	217.100	0.002	1.88	1.17	242.99	1.463
9.6	24156.35	0.85	209.7425	225.524	0.002	1.89	1.18	247.60	1.543
9.8	25731.77	0.84	219.6105	238.252	0.002	1.90	1.19	260.97	1.793



Tabel 4. 10 Perhitungan CSR pada titik bor 2

Depth	qc	$\sigma_v$	$\sigma'_v$	CSR
0	0	0	0	0
0.2	210.06	3.43245	3.43245	0.047422
0.4	210.06	6.8649	6.8649	0.04735
0.6	525.14	7.35525	7.35525	0.047277
0.8	525.14	9.807	9.807	0.047204
1	525.14	12.25875	12.25875	0.047132
1.2	1050.28	14.7105	14.7105	0.047059
1.4	1050.28	17.16225	17.16225	0.046986
1.6	1050.28	19.614	19.614	0.046914
1.8	1050.28	22.06575	22.06575	0.046841
2	1050.28	24.5175	24.5175	0.046768
2.2	1050.28	26.96925	25.04512	0.050283
2.4	1050.28	29.421	25.57273	0.053639
2.6	1050.28	31.87275	26.10035	0.056845
2.8	1050.28	34.3245	26.62797	0.059912
3	3675.97	52.9578	43.33713	0.056707
3.2	3675.97	56.48832	44.94352	0.058234
3.4	7351.93	63.35322	49.88429	0.05875
3.6	7351.93	67.07988	51.68681	0.059942
3.8	7351.93	70.80654	53.48934	0.061044
4	3360.88	72.5718	53.33047	0.062653
4.2	3360.88	76.20039	55.03492	0.063648
4.4	3360.88	79.82898	56.73938	0.064573
4.6	3360.88	83.45757	58.44384	0.065436
4.8	2310.61	84.73248	57.79461	0.067075
5	2310.61	88.263	59.401	0.067873
5.2	2310.61	91.79352	61.00739	0.06862
5.4	2310.61	95.32404	62.61377	0.06932
5.6	2310.61	98.85456	64.22016	0.069977
5.8	2310.61	102.3851	65.82655	0.070595
s6	2310.61	105.9156	67.43293	0.071175
6.2	2310.61	109.4461	69.03932	0.071721
6.4	2310.61	112.9766	70.64571	0.072235
6.6	3150.83	116.5072	72.25209	0.072719
6.8	3150.83	120.0377	73.85848	0.073175
7	5776.52	130.4331	82.32977	0.071216
7.2	5776.52	134.1598	84.13229	0.071565
7.4	5776.52	137.8864	85.93482	0.071894
7.6	7877.07	141.6131	87.73734	0.072203
7.8	7877.07	145.3397	89.53987	0.072493
8	9977.62	152.9892	95.2652	0.071606
8.2	9977.62	156.8139	97.16579	0.071843
8.4	12078.18	160.6387	99.06639	0.072065
8.6	12078.18	164.4634	100.967	0.072274
8.8	18904.97	168.2881	102.8676	0.07247



9	20480.38	172.1129	104.7682	0.072653
9.2	21530.66	175.9376	106.6688	0.072824
9.4	22580.94	179.7623	108.5694	0.072984
9.6	24156.35	188.2944	115.1773	0.071944
9.8	25731.77	192.2172	117.176	0.07207

### 4.3.3 Perhitungan FS dan analisis potensi likuifaksi

Perbandingan CRR terhadap CSR menghasilkan nilai FS atau *Factor of Savety* yang merupakan angka keamanan terhadap likuifaksi. Dimana angka FS > 1 menunjukkan angka aman terhadap likuifaksi, sebaliknya untuk FS < 1 menunjukkan adanya potensi terjadinya likuifaksi pada lokasi tinjauan.

Tabel 4. 11 Analisis potensi likuifaksi pada titik bor 1

Depth	CSR	CRR	FS	Potensi Likuifaksi
0	0	0	-	-
0.2	0.0474	0.890	-	-
0.4	0.0473	0.627	-	-
0.6	0.0473	0.284	-	-
0.8	0.0472	0.185	-	-
1	0.0471	0.145	-	-
1.2	0.0471	0.162	-	-
1.4	0.0470	0.138	-	-
1.6	0.0469	0.123	-	-
1.8	0.0468	0.114	-	-
2	0.0468	0.107	-	-
2.2	0.0491	0.105	-	-
2.4	0.0513	0.100	-	-
2.6	0.0532	0.101	-	-
2.8	0.0550	0.100	-	-
3	0.0567	0.099	-	-
3.2	0.0582	0.097	-	-
3.4	0.0592	0.107	-	-
3.6	0.0599	0.172	2.870641008	Tidak Likuifaksi
3.8	0.0610	0.169	2.763192017	Tidak Likuifaksi
4	0.0621	0.166	2.667000507	Tidak Likuifaksi
4.2	0.0630	0.124	1.962440661	Tidak Likuifaksi
4.4	0.0653	0.089	1.360387198	Tidak Likuifaksi
4.6	0.0662	0.089	1.340335909	Tidak Likuifaksi
4.8	0.0671	0.089	1.322088941	Tidak Likuifaksi
5	0.0679	0.089	1.309598277	Tidak Likuifaksi



5.2	0.0677	0.101	1.491333768	Tidak Likuifaksi
5.4	0.0684	0.101	1.470443542	Tidak Likuifaksi
5.6	0.0690	0.101	1.467886931	Tidak Likuifaksi
5.8	0.0686	0.145	2.113942849	Tidak Likuifaksi
6	0.0701	0.101	1.434389863	Tidak Likuifaksi
6.2	0.0706	0.099	1.401716658	Tidak Likuifaksi
6.4	0.0711	0.099	1.387541889	Tidak Likuifaksi
6.6	0.0715	0.098	1.374349229	Tidak Likuifaksi
6.8	0.0720	0.103	1.438117371	Tidak Likuifaksi
7	0.0724	0.103	1.424401317	Tidak Likuifaksi
7.2	0.0716	0.178	2.485481044	Tidak Likuifaksi
7.4	0.0708	0.677	9.560321096	Tidak Likuifaksi
7.6	0.0711	1.115	15.67959129	Tidak Likuifaksi
7.8	0.0714	1.495	20.95699576	Tidak Likuifaksi
8	0.0716	1.963	27.40839216	Tidak Likuifaksi
8.2	0.0708	2.746	38.80247407	Tidak Likuifaksi

Tabel 4. 12 Analisis potensi likuifaksi pada titik bor 2

Depth	CSR	CRR	FS	Potensi Likuifaksi
0	0	0	-	-
0.2	0.0474	0.405	-	-
0.4	0.0473	0.176	-	-
0.6	0.0473	0.230	-	-
0.8	0.0472	0.165	-	-
1	0.0471	0.135	-	-
1.2	0.0471	0.165	-	-
1.4	0.0470	0.140	-	-
1.6	0.0469	0.125	-	-
1.8	0.0468	0.115	-	-
2	0.0468	0.108	-	-
2.2	0.0503	0.107	-	-
2.4	0.0536	0.106	-	-
2.6	0.0568	0.105	-	-
2.8	0.0599	0.104	-	-
3	0.0567	0.168	2.959045	Tidak Likuifaksi
3.2	0.0582	0.160	2.748526	Tidak Likuifaksi
3.4	0.0587	0.459	7.815937	Tidak Likuifaksi
3.6	0.0599	0.425	7.092521	Tidak Likuifaksi
3.8	0.0610	0.395	6.473928	Tidak Likuifaksi
4	0.0627	0.134	2.138159	Tidak Likuifaksi

4.2	0.0636	0.130	2.044333	Tidak Likuifaksi
4.4	0.0646	0.127	1.961600	Tidak Likuifaksi
4.6	0.0654	0.124	1.888266	Tidak Likuifaksi
4.8	0.0671	0.100	1.492613	Tidak Likuifaksi
5	0.0679	0.099	1.458358	Tidak Likuifaksi
5.2	0.0686	0.098	1.427367	Tidak Likuifaksi
5.4	0.0693	0.097	1.399233	Tidak Likuifaksi
5.6	0.0700	0.096	1.373611	Tidak Likuifaksi
5.8	0.0706	0.095	1.350207	Tidak Likuifaksi
6	0.0712	0.095	1.328771	Tidak Likuifaksi
6.2	0.0717	0.094	1.309087	Tidak Likuifaksi
6.4	0.0722	0.093	1.290971	Tidak Likuifaksi
6.6	0.0727	0.098	1.344330	Tidak Likuifaksi
6.8	0.0732	0.097	1.324013	Tidak Likuifaksi
7	0.0712	0.134	1.879327	Tidak Likuifaksi
7.2	0.0716	0.131	1.830131	Tidak Likuifaksi
7.4	0.0719	0.128	1.784910	Tidak Likuifaksi
7.6	0.0722	0.184	2.549867	Tidak Likuifaksi
7.8	0.0725	0.179	2.465988	Tidak Likuifaksi
8	0.0716	0.242	3.380072	Tidak Likuifaksi
8.2	0.0718	0.234	3.255136	Tidak Likuifaksi
8.4	0.0721	0.333	4.621303	Tidak Likuifaksi
8.6	0.0723	0.321	4.436387	Tidak Likuifaksi
8.8	0.0725	0.962	13.274644	Tidak Likuifaksi
9	0.0727	1.158	15.943761	Tidak Likuifaksi
9.2	0.0728	1.283	17.616855	Tidak Likuifaksi
9.4	0.0730	1.414	19.378464	Tidak Likuifaksi
9.6	0.0719	1.492	20.733711	Tidak Likuifaksi
9.8	0.0721	1.733	24.045820	Tidak Likuifaksi

#### 4.4 Analisis Perhitungan Kembali

Penelitian ini juga memperhitungkan analisis kembali terhadap potensi likuifaksi pada daerah yang sama dengan beberapa asumsi.

#### Data Gempa

koordinat		Magnitude	Depth	Epicenter	R	PGA
Lat	Long	(SR)	(km)	(km)	(km)	(gal)
0,893	123,181	7,5	69,5	40,3306	80,3542	134,1984



#### 4.4.1 Analisis Menggunakan Magnitude Gempa 7.5 SR

Perhitungan nilai CSR pada kedalaman 4 m dengan percepatan gempa

$$a_{max} = 134,1984$$

Diketahui:

$$\sigma'_v = 55,2918 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_v = 74,5332 \text{ kN/m}^2$$

untuk kedalaman tanah kurang dari 9,15 m, maka koefisien tegangan reduksi dihitung berdasarkan rumus:

$$r_d = 1.0 - 0.00765z$$

$$= 1.0 - 0.00765(4)$$

$$= 0,96$$

$$\begin{aligned} CSR &= \left( \frac{\tau_v}{\sigma'_v} \right) = 0.65 \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \left( \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) r_d \\ &= 0.65 \left( \frac{1,3419}{9,807} \right) \left( \frac{74,5332}{55,2918} \right) \times 0,96 \\ &= 0,063 \end{aligned}$$

Tabel 4. 13 Analisis potensi likuifaksi dengan PGA = 134,1984 gal pada titik 1

Depth	CSR	CRR	FS	Potensi Likuifaksi
0	0	0	-	-
0.2	0.0888	0.860	-	-
0.4	0.0887	0.606	-	-
0.6	0.0885	0.274	-	-
0.8	0.0884	0.179	-	-
1	0.0883	0.140	-	-
1.2	0.0881	0.156	-	-
1.4	0.0880	0.133	-	-
1.6	0.0879	0.119	-	-
1.8	0.0877	0.110	-	-
2	0.0876	0.104	-	-
2.2	0.0920	0.101	-	-
2.4	0.0960	0.096	-	-
2.6	0.0997	0.098	-	-
2.8	0.1031	0.097	-	-
3	0.1062	0.095	-	-
3.2	0.1091	0.094	-	-
3.4	0.1108	0.103	-	-
3.6	0.1123	0.166	1.481616	Tidak Likuifaksi
3.8	0.1143	0.163	1.426158	Tidak Likuifaksi
4	0.1162	0.160	1.376511	Tidak Likuifaksi



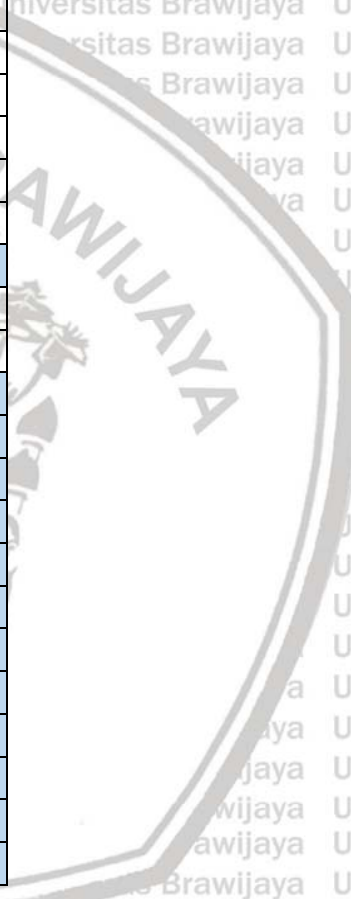


4.2	0.1180	0.120	1.012869	Tidak Likuifaksi
4.4	0.1223	0.086	0.702133	Likuifaksi
4.6	0.1240	0.086	0.691784	Likuifaksi
4.8	0.1256	0.086	0.682366	Likuifaksi
5	0.1271	0.086	0.675919	Likuifaksi
5.2	0.1268	0.098	0.769718	Likuifaksi
5.4	0.1280	0.097	0.758936	Likuifaksi
5.6	0.1292	0.098	0.757616	Likuifaksi
5.8	0.1285	0.140	1.091063	Tidak Likuifaksi
6	0.1313	0.097	0.740327	Likuifaksi
6.2	0.1322	0.096	0.723464	Likuifaksi
6.4	0.1331	0.095	0.716148	Likuifaksi
6.6	0.1340	0.095	0.709339	Likuifaksi
6.8	0.1348	0.100	0.742251	Likuifaksi
7	0.1355	0.100	0.735172	Likuifaksi
7.2	0.1340	0.172	1.282824	Tidak Likuifaksi
7.4	0.1326	0.654	4.93434	Tidak Likuifaksi
7.6	0.1331	1.077	8.092661	Tidak Likuifaksi
7.8	0.1336	1.445	10.81647	Tidak Likuifaksi
8	0.1341	1.897	14.14621	Tidak Likuifaksi
8.2	0.1325	2.654	20.02701	Tidak Likuifaksi

Tabel 4. 14 Analisis potensi likuifaksi dengan  $PGA = 134,1984$  gal pada titik 2

Depth	CSR	CRR	FS	Potensi Likuifaksi
0	0	0	-	-
0.2	0.0888	0.405	-	-
0.4	0.0887	0.176	-	-
0.6	0.0885	0.230	-	-
0.8	0.0884	0.165	-	-
1	0.0883	0.135	-	-
1.2	0.0881	0.165	-	-
1.4	0.0880	0.140	-	-
1.6	0.0879	0.125	-	-
1.8	0.0877	0.115	-	-
2	0.0876	0.108	-	-
2.2	0.0942	0.107	-	-
2.4	0.1005	0.106	-	-
2.6	0.1065	0.105	-	-
2.8	0.1122	0.104	-	-
3	0.1062	0.168	1.580065	Tidak Likuifaksi
3.2	0.1091	0.160	1.467653	Tidak Likuifaksi
3.4	0.1100	0.459	4.173539	Tidak Likuifaksi
3.6	0.1123	0.425	3.787251	Tidak Likuifaksi
3.8	0.1143	0.395	3.456936	Tidak Likuifaksi

4	0.1173	0.134	1.14173	Tidak Likuifaksi
4.2	0.1192	0.130	1.091629	Tidak Likuifaksi
4.4	0.1209	0.127	1.047451	Tidak Likuifaksi
4.6	0.1225	0.124	1.008292	Tidak Likuifaksi
4.8	0.1256	0.100	0.797023	Likuifaksi
5	0.1271	0.099	0.778731	Likuifaksi
5.2	0.1285	0.098	0.762183	Likuifaksi
5.4	0.1298	0.097	0.74716	Likuifaksi
5.6	0.1310	0.096	0.733478	Likuifaksi
5.8	0.1322	0.095	0.720981	Likuifaksi
6	0.1333	0.095	0.709534	Likuifaksi
6.2	0.1343	0.094	0.699024	Likuifaksi
6.4	0.1353	0.093	0.68935	Likuifaksi
6.6	0.1362	0.098	0.717843	Likuifaksi
6.8	0.1370	0.097	0.706994	Likuifaksi
7	0.1334	0.134	1.003519	Tidak Likuifaksi
7.2	0.1340	0.131	0.97725	Likuifaksi
7.4	0.1346	0.128	0.953103	Likuifaksi
7.6	0.1352	0.184	1.361573	Tidak Likuifaksi
7.8	0.1358	0.179	1.316784	Tidak Likuifaksi
8	0.1341	0.242	1.804884	Tidak Likuifaksi
8.2	0.1345	0.234	1.738171	Tidak Likuifaksi
8.4	0.1350	0.333	2.467675	Tidak Likuifaksi
8.6	0.1354	0.321	2.368933	Tidak Likuifaksi
8.8	0.1357	0.962	7.088369	Tidak Likuifaksi
9	0.1361	1.158	8.513619	Tidak Likuifaksi
9.2	0.1364	1.283	9.407014	Tidak Likuifaksi
9.4	0.1367	1.414	10.34768	Tidak Likuifaksi
9.6	0.1347	1.492	11.07135	Tidak Likuifaksi
9.8	0.1350	1.733	12.83994	Tidak Likuifaksi



#### 4.4.2 Analisis Menggunakan Magnitude Gempa 7.2 SR

##### Data Gempa

koordinat		Magnitude	Depth	Epicenter	R	PGA
Lat	Long	(SR)	(km)	(km)	(km)	(gal)
0,893	123,181	7,2	69,5	40,3306	80,3542	110,7509

- Perhitungan nilai CSR pada kedalaman 4 m dengan percepatan gempa

$$a_{max} = 110,7509$$

Diketahui:

$$\sigma'_v = 55,2918 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma_v = 74,5332 \text{ kN/m}^2$$

untuk kedalaman tanah kurang dari 9,15 m, maka koefisien tegangan reduksi dihitung berdasarkan rumus:

$$r_d = 1.0 - 0.00765z$$

$$= 1.0 - 0.00765(4)$$

$$= 0,96$$

$$\begin{aligned} CSR &= \left( \frac{\tau_v}{\sigma'_v} \right) = 0.65 \left( \frac{a_{max}}{g} \right) \left( \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) r_d \\ &= 0.65 \left( \frac{1,1075}{9,807} \right) \left( \frac{74,5332}{55,2918} \right) \times 0,96 \\ &= 0,094 \end{aligned}$$

- Untuk erencanaan dengan tidak menggunakan magnitude gempa sebesar 7,5 SR perlu dihitung faktor koreksi

$$CRR = CRR_{7,5} \times MSF$$

Untuk:

$$M_w < 7,5 ; MSF = \frac{10^{2,24}}{M_w^{2,56}}$$

$$M_w > 7,5 ; MSF = \left( \frac{M_w}{7,5} \right)^{-2,56}$$

Perencanaan dengan menggunakan besar magnitude gempa 7 SR adalah:

$$MSF = 1,1097$$

Diperoleh nilai CRR

$$CRR = CRR_{7,5} \times MSF$$

$$CRR = 0,1663 \times 1,1097$$

$$= 0,1845$$

Tabel 4. 15 Analisis potensi likuifaksi magnitudo gempa 7,2 pada titik bor 1

Depth	CSR	CRR	FS	Potensi Likuifaksi
0	0	0	-	-
0.2	0.0733	0.955	-	-
0.4	0.0732	0.672	-	-
0.6	0.0731	0.304	-	-
0.8	0.0730	0.199	-	-
1	0.0728	0.155	-	-
1.2	0.0727	0.173	-	-
1.4	0.0726	0.148	-	-
1.6	0.0725	0.132	-	-
1.8	0.0724	0.122	-	-
2	0.0723	0.115	-	-
2.2	0.0759	0.113	-	-
2.4	0.0793	0.107	-	-
2.6	0.0823	0.109	-	-
2.8	0.0851	0.107	-	-
3	0.0876	0.106	-	-
3.2	0.0900	0.104	-	-
3.4	0.0915	0.114	-	-
3.6	0.0926	0.185	1.992344	Tidak Likuifaksi
3.8	0.0943	0.181	1.91777	Tidak Likuifaksi
4	0.0959	0.178	1.851009	Tidak Likuifaksi
4.2	0.0974	0.133	1.362015	Tidak Likuifaksi
4.4	0.1009	0.095	0.944165	Likuifaksi
4.6	0.1023	0.095	0.930249	Likuifaksi
4.8	0.1037	0.095	0.917585	Likuifaksi
5	0.1049	0.095	0.908916	Likuifaksi
5.2	0.1046	0.108	1.035048	Tidak Likuifaksi
5.4	0.1056	0.108	1.020549	Tidak Likuifaksi
5.6	0.1066	0.109	1.018775	Tidak Likuifaksi
5.8	0.1060	0.156	1.467164	Tidak Likuifaksi
6	0.1083	0.108	0.995526	Likuifaksi
6.2	0.1091	0.106	0.97285	Likuifaksi
6.4	0.1099	0.106	0.963012	Likuifaksi
6.6	0.1106	0.105	0.953856	Likuifaksi
6.8	0.1112	0.111	0.998113	Likuifaksi
7	0.1118	0.111	0.988594	Likuifaksi
7.2	0.1106	0.191	1.725027	Tidak Likuifaksi
7.4	0.1094	0.726	6.635261	Tidak Likuifaksi



7.6	0.1099	1.196	10.88229	Tidak Likuifaksi
7.8	0.1103	1.604	14.54503	Tidak Likuifaksi
8	0.1107	2.105	19.02256	Tidak Likuifaksi
8.2	0.1094	2.945	26.93053	Tidak Likuifaksi

Tabel 4. 16 Analisis potensi likuifaksi magnitudo gempa 7.2 SR pada titik bor 2

Depth	CSR	CRR	FS	Potensi Likuifaksi
0	0	0	-	-
0.2	0.0733	0.449	-	-
0.4	0.0732	0.196	-	-
0.6	0.0731	0.255	-	-
0.8	0.0730	0.183	-	-
1	0.0728	0.150	-	-
1.2	0.0727	0.183	-	-
1.4	0.0726	0.155	-	-
1.6	0.0725	0.138	-	-
1.8	0.0724	0.127	-	-
2	0.0723	0.120	-	-
2.2	0.0777	0.119	-	-
2.4	0.0829	0.117	-	-
2.6	0.0879	0.116	-	-
2.8	0.0926	0.115	-	-
3	0.0876	0.186	2.124731	Tidak Likuifaksi
3.2	0.0900	0.178	1.973568	Tidak Likuifaksi
3.4	0.0908	0.510	5.612203	Tidak Likuifaksi
3.6	0.0926	0.472	5.092757	Tidak Likuifaksi
3.8	0.0943	0.439	4.648579	Tidak Likuifaksi
4	0.0968	0.149	1.535297	Tidak Likuifaksi
4.2	0.0984	0.144	1.467926	Tidak Likuifaksi
4.4	0.0998	0.141	1.408519	Tidak Likuifaksi
4.6	0.1011	0.137	1.355862	Tidak Likuifaksi
4.8	0.1037	0.111	1.071765	Tidak Likuifaksi
5	0.1049	0.110	1.047168	Tidak Likuifaksi
5.2	0.1061	0.109	1.024915	Tidak Likuifaksi
5.4	0.1071	0.108	1.004714	Tidak Likuifaksi
5.6	0.1082	0.107	0.986316	Likuifaksi
5.8	0.1091	0.106	0.969511	Likuifaksi
6	0.1100	0.105	0.954118	Likuifaksi
6.2	0.1108	0.104	0.939985	Likuifaksi
6.4	0.1116	0.103	0.926977	Likuifaksi
6.6	0.1124	0.108	0.965291	Likuifaksi
6.8	0.1131	0.108	0.950703	Likuifaksi
7	0.1101	0.149	1.349443	Tidak Likuifaksi

7.2	0.1106	0.145	1.314118	Tidak Likuifaksi
7.4	0.1111	0.142	1.281647	Tidak Likuifaksi
7.6	0.1116	0.204	1.830922	Tidak Likuifaksi
7.8	0.1120	0.198	1.770693	Tidak Likuifaksi
8	0.1107	0.269	2.427047	Tidak Likuifaksi
8.2	0.1110	0.260	2.337337	Tidak Likuifaksi
8.4	0.1114	0.370	3.318309	Tidak Likuifaksi
8.6	0.1117	0.356	3.18553	Tidak Likuifaksi
8.8	0.1120	1.068	9.531806	Tidak Likuifaksi
9	0.1123	1.285	11.44835	Tidak Likuifaksi
9.2	0.1126	1.424	12.64971	Tidak Likuifaksi
9.4	0.1128	1.570	13.91463	Tidak Likuifaksi
9.6	0.1112	1.655	14.88776	Tidak Likuifaksi
9.8	0.1114	1.923	17.26601	Tidak Likuifaksi



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Penulisan Tugas akhir ini bertujuan untuk meninjau ada tidaknya potensi likuifaksi pada wilayah Gedung Telkom Gorontalo berdasarkan data CPT (*Cone Penetration Test*) pada 2 titik pengeboran di wilayah tersebut. Berdasarkan analisis data, didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Data rekaman gempa pada wilayah Gorontalo yang didapat dari laman *Incorporated Research Institutions for Seismology (IRIS)* menunjukkan gempa terbesar yang pernah terjadi adalah pada magnitude 7,4 M dengan jarak epicenter 134,136 km dan kedalaman 30 km menghasilkan nilai PGA sebesar 71,659 gal. Penulis melakukan analisis kembali PGA maksimum dengan mengasumsikan besaran magnitude gempa bumi menjadi 7,5 M dan 7,2 M, didapat PGA maksimum pada jarak epicenter 40,3306 km dan kedalaman 69,5 km masing-masing sebesar 134,1984 gal dan 110,7509 gal menunjukkan bahwa besar nilai PGA dipengaruhi oleh kedalaman dan epicenter gempa. Berdasarkan nilai PGA 71,695 gal dan data CPT tanah dilakukan analisa potensi likuifaksi dengan hasil perbandingan  $CRR/CSR > 1$  menunjukkan tidak berpotensi terjadi likuifaksi sedangkan berdasarkan analisis menggunakan nilai PGA 134,1984 gal dan 110,77509 gal menunjukkan adanya potensi likuifaksi pada kedalaman tertentu.
2. Magnitude gempa tidak bisa dijadikan tolak ukur untuk memprediksi terjadinya likuifaksi di wilayah Gedung Telkom Gorontalo. Berdasarkan analisis, akan terjadi likuifaksi di wilayah Gedung Telkom Gorontalo jika terjadi gempa yang menghasilkan nilai PGA paling tidak sebesar 110,77509 gal.
3. Berdasarkan sejarah, lapisan tanah di Gedung Telkom Gorontalo belum pernah terjadi likuifaksi.

#### 5.2 Saran

Dari hasil analisis diatas, diharapkan bisa menjadi referensi untuk menganalisis zona potensi likuifaksi yang nantinya dapat dilakukan pemetaan zona bahaya likuifaksi di kota Gorontalo.

Untuk setiap rencana pembangunan di kota Gorontalo, penulis menyarankan agar dilakukan pengkajian awal terhadap potensi terjadinya likuifaksi sehingga jika terdapat lapisan tanah yang berpotensi likuifaksi bisa dilakukan langkah pencegahan awal missal berupa pemadatan dan pengeluaran air yang berada di lapisan tanah (konsolidasi) pada lapisan tanah yang berpotensi likuifaksi.





## DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional (2012). *Standar Perencanaan Ketahanan Gempa untuk Struktur Bangunan Gedung*. Departemen Perencanaan Umum. SNI-1726-2012.
- Casagrande, A., 1976, *Liquefaction and Cyclic Deformation of Sands: A Critical Review*, Pierce Hall, Cambridge, Massachusetts.
- Das, Braja M. (2008). *Advanced Soil Mechanics Third Edition*, New York, Taylor & Francis Library.
- Das, Braja M. (1993). *Principles Of Soil Dynamic*, Boston, PWS-KENT Publishing Company.
- Das, Braja M. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis) I*, Jakarta, Erlangga.
- Housner, George W. (1985). *Liquefaction of Soils During Earthquakes*, National Academy Press. Washington DC.
- Ibrahim, G. & Subarjo. (2005). *Pengetahuan Seismologi*, Badan Meteorologi dan Geofisika. Jakarta.
- Idriss, I. M., Boulanger, R. W., (2008). *Soil Liquefaction During Earthquakes*. EERI
- Kramer, Steven L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*, Prentice Hall. New Jersey.
- Lastaruna, Dody. (2009). *Analisa Potensi Likuifaksi berdasarkan Data Pengujian Sondir (studi Kasus GOR Haji Agus Salim dan Lapai, Padang)*. Jurnal Rekayasa Sipil Vol.5.
- Lune, T., Robertson, P.K., and Jhon J.M. Powel, (1997), *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*, T.J. International, UK.
- Robertson, P. K., and Wride, C. E., (1997). *Cyclic liquefaction and its evaluation based on SPT and CPT*. in Proceedings, NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils.
- Robertson, P.K. and Wride, C.E., (1998). *Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test*. Canadian Geotechnical Journal, 35:442-459
- Seed, H. Bolton, (1982), *Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes*, Earthquake Engineering Research Institute.
- Seed, H. B. dan Idriss, I. M. (1971). Simplified Procedures for Evaluating Soil Liquefaction Potential. *Journal Geotechnical Engineering Division, ASCE*, New York. 1249-1273.
- Soebowo, dkk. (2009). "Potensi Likuifaksi Akibat Gempa Bumi Berdasarkan Data CPT dan SPT Di Daerah Patalan Bantul, Yogyakarta". *Jurnal Riset Geologi dan*
- USGS National Earthquake Information Center.

Halaman ini sengaja dikosongkan



Lampiran 1. Data CPT di wilayah Gedung Telkom Gorontalo Titik 1

Depth	Manometer Road		qc (kg/cm2)	sleeve = Fs (kg/cm2)	Local Fale	cumulative total fric (kg/cm2)	Ratio (fs/qc)*100
	M1	M2					
0	0	0	0	0.00	0	0	0
0.2	5	10	5.36	0.44	8.8	8.8	8.22
0.4	10	15	10.71	0.44	8.8	17.6	4.11
0.6	10	15	10.71	0.44	8.8	26.4	4.11
0.8	10	15	10.71	0.44	8.8	35.2	4.11
1	10	15	10.71	0.44	8.8	44	4.11
1.2	15	20	16.07	0.44	8.8	52.8	2.74
1.4	15	20	16.07	0.44	8.8	61.6	2.74
1.6	15	20	16.07	0.44	8.8	70.4	2.74
1.8	15	20	16.07	0.44	8.8	79.2	2.74
2	15	20	16.07	0.44	8.8	88	2.74
2.2	15	20	16.07	0.44	8.8	96.8	2.74
2.4	12	15	12.85	0.26	5.28	102.08	2.05
2.6	15	20	16.07	0.44	8.8	110.88	2.74
2.8	15	20	16.07	0.44	8.8	119.68	2.74
3	15	20	16.07	0.44	8.8	128.48	2.74
3.2	15	20	16.07	0.44	8.8	137.28	2.74
3.4	35	40	37.49	0.44	8.8	146.08	1.17
3.6	60	65	64.26	0.44	8.8	154.88	0.68
3.8	60	65	64.26	0.44	8.8	163.68	0.68
4	60	65	64.26	0.44	8.8	172.48	0.68
4.2	42	45	44.98	0.26	5.28	177.76	0.59
4.4	17	20	18.21	0.26	5.28	183.04	1.45
4.6	17	20	18.21	0.26	5.28	188.32	1.45
4.8	17	20	18.21	0.26	5.28	193.6	1.45
5	20	25	21.42	0.44	8.8	202.4	2.05
5.2	35	40	37.49	0.44	8.8	211.2	1.17
5.4	35	40	37.49	0.44	8.8	220	1.17
5.6	32	35	34.27	0.26	5.28	225.28	0.77
5.8	60	65	64.26	0.44	8.8	234.08	0.68
6	32	35	34.27	0.26	5.28	239.36	0.77
6.2	35	40	37.49	0.44	8.8	248.16	1.17
6.4	35	40	37.49	0.44	8.8	256.96	1.17
6.6	35	40	37.49	0.44	8.8	265.76	1.17
6.8	40	45	42.84	0.44	8.8	274.56	1.03
7	40	45	42.84	0.44	8.8	283.36	1.03
7.2	75	80	80.33	0.44	8.8	292.16	0.55
7.4	145	150	155.30	0.44	8.8	300.96	0.28
7.6	175	180	187.43	0.44	8.8	309.76	0.23



7.8	195	200	208.85	0.44	8.8	318.56	0.21
8	215	220	230.27	0.44	8.8	327.36	0.19
8.2	245	250	262.40	0.44	8.8	336.16	0.17
8.4							

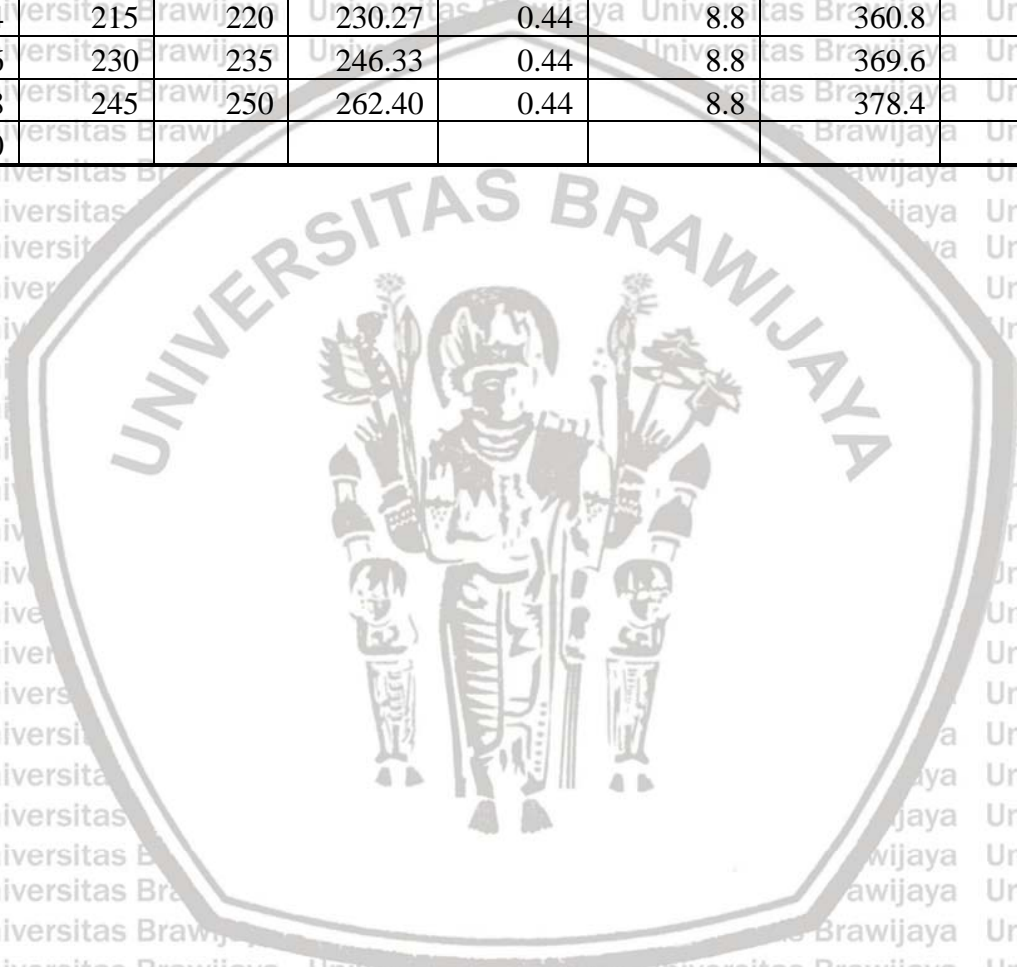


Lampiran 2. Data CPT di wilayah Gedung Telkom Gorontalo Titik 2

Depth	Manometer Road		qc (kg/cm <sup>2</sup> )	sleeve = Fs (kg/cm <sup>2</sup> )	Local Fale	cumulative total fric (kg/cm <sup>2</sup> )	Ratio (fs/qc)*100
	M1	M2					
0	0	0	0	0.00	0	0	0
0.2	2	5	2.14	0.26	5.28	5.28	12.32
0.4	2	5	2.14	0.26	5.28	10.56	12.32
0.6	5	10	5.36	0.44	8.8	19.36	8.22
0.8	5	10	5.36	0.44	8.8	28.16	8.22
1	5	10	5.36	0.44	8.8	36.96	8.22
1.2	10	15	10.71	0.44	8.8	45.76	4.11
1.4	10	15	10.71	0.44	8.8	54.56	4.11
1.6	10	15	10.71	0.44	8.8	63.36	4.11
1.8	10	15	10.71	0.44	8.8	72.16	4.11
2	10	15	10.71	0.44	8.8	80.96	4.11
2.2	10	15	10.71	0.44	8.8	89.76	4.11
2.4	10	15	10.71	0.44	8.8	98.56	4.11
2.6	10	15	10.71	0.44	8.8	107.36	4.11
2.8	10	15	10.71	0.44	8.8	116.16	4.11
3	35	40	37.49	0.44	8.8	124.96	1.17
3.2	35	40	37.49	0.44	8.8	133.76	1.17
3.4	70	75	74.97	0.44	8.8	142.56	0.59
3.6	70	75	74.97	0.44	8.8	151.36	0.59
3.8	70	75	74.97	0.44	8.8	160.16	0.59
4	32	35	34.27	0.26	5.28	165.44	0.77
4.2	32	35	34.27	0.26	5.28	170.72	0.77
4.4	32	35	34.27	0.26	5.28	176	0.77
4.6	32	35	34.27	0.26	5.28	181.28	0.77
4.8	22	25	23.56	0.26	5.28	186.56	1.12
5	22	25	23.56	0.26	5.28	191.84	1.12
5.2	22	25	23.56	0.26	5.28	197.12	1.12
5.4	22	25	23.56	0.26	5.28	202.4	1.12
5.6	22	25	23.56	0.26	5.28	207.68	1.12
5.8	22	25	23.56	0.26	5.28	212.96	1.12
6	22	25	23.56	0.26	5.28	218.24	1.12
6.2	22	25	23.56	0.26	5.28	223.52	1.12
6.4	22	25	23.56	0.26	5.28	228.8	1.12
6.6	30	35	32.13	0.44	8.8	237.6	1.37
6.8	30	35	32.13	0.44	8.8	246.4	1.37
7	55	60	58.91	0.44	8.8	255.2	0.75
7.2	55	60	58.91	0.44	8.8	264	0.75
7.4	55	60	58.91	0.44	8.8	272.8	0.75
7.6	75	80	80.33	0.44	8.8	281.6	0.55



7.8	75	80	80.33	0.44	8.8	290.4	0.55
8	95	100	101.75	0.44	8.8	299.2	0.43
8.2	95	100	101.75	0.44	8.8	308	0.43
8.4	115	120	123.17	0.44	8.8	316.8	0.36
8.6	115	120	123.17	0.44	8.8	325.6	0.36
8.8	180	185	192.78	0.44	8.8	334.4	0.23
9	195	200	208.85	0.44	8.8	343.2	0.21
9.2	205	210	219.56	0.44	8.8	352	0.20
9.4	215	220	230.27	0.44	8.8	360.8	0.19
9.6	230	235	246.33	0.44	8.8	369.6	0.18
9.8	245	250	262.40	0.44	8.8	378.4	0.17
10							



**Lampiran 3. Data sejarah Gempa Kota Gorontalo tahun 2008-2019**

time	latitude	longitude	depth	mag	magType	nst	gap	dmin	rms	net
2019-02-24/T13:29:33.487Z	0.4927	122.1832	97.67	5.1	mww		23	1.53	1.01	us
2018-12-19/T11:25:09.500Z	-0.147	124.3753	65.83	5	mb		43	1.833	0.75	us
2018-12-14/T19:27:26.640Z	-0.0399	122.9645	147.89	5.2	mww		29	1.013	0.93	us
2018-12-11/T11:23:24.150Z	-0.1177	124.482	46.4	5.1	mww		32	1.941	0.88	us
2018-07-10/T15:33:21.730Z	0.2864	122.1082	196.54	5.1	mww		31	1.476	0.95	us
2018-03-18/T11:35:05.850Z	0.488	121.4659	104.61	5.3	mww		24	0.922	1.1	us
2018-01-15/T06:31:50.920Z	0.4389	123.6688	237.71	5.3	mww		30	1.722	0.97	us
2017-11-22/T01:11:21.660Z	0.4157	124.4387	88.65	5.3	mb		26	2.207	1.16	us
2017-10-18/T13:40:55.610Z	-0.2383	122.9492	92.61	5.6	mb		44	0.817	0.95	us
2017-09-25/T22:07:03.500Z	0.8223	124.3318	219.8	5	mb		28	2.421	0.88	us
2017-07-15/T12:12:21.490Z	0.4098	121.9844	113	5.9	mww		15	1.389	1.07	us
2017-03-31/T11:21:01.040Z	0.3086	120.5802	94	5.5	mww		17	0.822	1.1	us
2017-03-29/T08:20:12.110Z	0.0513	123.3717	137.95	5	mb		32	1.24	0.97	us
2017-03-14/T05:55:21.510Z	0.6515	121.1465	75.46	5.4	mww		22	0.584	1.17	us
2017-02-10/T18:28:02.970Z	-0.185	123.0199	81.13	5	mww		20	0.886	0.86	us
2016-12-23/T19:15:39.190Z	-0.2458	124.4794	73.18	5	mb		40	1.881	0.95	us
2016-07-29/T08:29:26.170Z	0.0828	123.4107	141.98	5.4	mb		45	1.287	0.93	us
2016-07-20/T03:58:30.420Z	0.0371	122.9509	166.59	5.3	mb		27	1.086	0.88	us
2016-06-30/T11:43:11.500Z	0.4991	123.6178	253.49	5	mb		43	1.748	1.09	us
2015-10-09/T16:28:25.360Z	-0.0241	123.8928	96.26	5.1	mb		33	1.509	1.28	us
2015-09-25/T08:47:47.000Z	1.2844	122.6907	6.57	5	mb		83	1.916	0.88	us
2015-09-13/T01:13:14.640Z	-0.0422	123.4494	143	5.4	mww		13	1.272	1.25	us
2015-09-12/T09:49:27.030Z	-0.0177	124.3731	58.85	5	mb		22	3.085	1.13	us
2015-06-13/T23:45:45.130Z	-0.2268	124.4263	64.21	5.1	mb		37	1.841	0.85	us
2015-04-24/T05:28:07.920Z	-0.196	124.2485	79.43	5.1	mb		30	1.699	1.03	us

2015-03-28/T22:28:50.780Z	0.4002	121.9895	118	5.9	mww		12	1.399	0.88	us
2015-03-02/T01:40:52.350Z	-0.0463	124.5345	71.49	5	mb		50	2.021	0.74	us
2015-03-01/T03:32:33.780Z	0.0241	124.4702	62	5.6	mwb		18	2.001	1.03	us
2015-01-03/T08:03:31.370Z	0.007	123.7942	118.15	5	mb		35	1.459	1.05	us
2014-11-15/T03:08:04.590Z	-0.1448	123.8891	90.28	5.9	mww		14	1.429	1	us
2014-11-04/T04:19:10.360Z	0.0782	123.6538	129.16	5.1	mb		24	1.419	0.58	us
2014-06-26/T11:28:21.890Z	0.0232	123.4569	141.74	5.4	mb		27	1.26	1.33	us
2014-06-21/T21:51:50.490Z	-0.099	122.939	117	5.4	mwb		13	0.951	0.93	us
2014-03-06/T00:23:19.290Z	-0.1817	122.9097	140.88	5.1	mb		34	0.865	1.21	us
2014-02-25/T01:49:04.720Z	0.6015	120.5041	89.29	5	mb		77	2.793	0.95	us
2013-12-29/T14:29:52.780Z	0.0094	123.3694	155.67	5	mb		34	1.203	0.99	us
2013-12-04/T17:43:24.390Z	0.0238	123.5477	136.82	5.2	mb		20	1.312	0.86	us
2013-11-22/T05:37:18.080Z	-0.1938	122.9498	92.72	5.2	mb		25	0.86	1.06	us
2013-10-12/T14:30:09.700Z	0.7452	122.2107	96.63	5.5	mwc		37	1.861	1.17	us
2013-09-10/T01:12:40.290Z	1.4292	122.2569	35.17	5.2	mwb		42	2.507	1.37	us
2013-09-09/T21:41:33.180Z	1.3814	122.2235	22.5	5.6	mww		23	2.468	1.34	us
2013-08-15/T04:05:55.760Z	0.0081	123.1864	151	5.3	mwb		13	1.122	1.12	us
2012-12-28/T17:32:18.070Z	-0.145	122.918	112.1	5.5	mww	373	17		0.97	us
2012-11-06/T01:42:26.330Z	1.357	122.167	35	5.6	mww	163	28.2		0.91	us
2012-11-06/T01:38:20.120Z	1.281	122.088	17.4	5	mb	44	79.5		0.93	us
2012-11-06/T01:36:21.630Z	1.374	122.2	25	5.7	mww	308	12.2		1.09	us
2012-11-01/T23:37:18.240Z	1.229	122.105	35	5.4	mwb	162	14.7		0.97	us
2012-10-25/T10:09:45.000Z	0.69	124.55	174.2	5	mb	113	62.9		0.91	us
2012-07-09/T12:25:47.340Z	-0.171	122.791	94.4	5.3	mb	242	26.3		0.94	us
2012-06-20/T21:55:53.810Z	0.102	123.426	142.3	5.4	mb	391	17.2		0.95	us
2012-05-13/T04:46:05.930Z	-0.115	122.996	92.1	5.3	mb	232	41.5		1.08	us
2012-01-16/T08:26:17.390Z	0.002	123.09	168.5	5.2	mb	252	26.6		1.01	us



2011-12-13/T07:52:11.930Z	0.041	123.03	161	6	mww	536	13.9	0.95	us
2011-12-02/T05:19:26.890Z	0.121	120.499	75	5.5	mwb	408	16.5	0.99	us
2011-11-23/T22:06:00.410Z	1.339	121.662	48.6	5	mwc	67	79	1.13	us
2011-11-15/T10:43:51.850Z	-0.095	121.914	276.2	5.7	mww	436	12.6	0.9	us
2011-11-02/T06:33:29.680Z	-0.012	123.352	138.8	5	mb	156	33.6	0.99	us
2011-11-01/T01:03:53.480Z	0.048	123.366	143.3	5.3	mwc	380	14.1	0.99	us
2011-07-08/T05:22:40.820Z	0.131	123.244	159.3	5.3	mww	448	12.2	0.89	us
2011-07-01/T02:38:49.430Z	0.938	121.743	59.6	5	mwc	93	55.6	0.9	us
2011-05-27/T05:39:30.630Z	1.545	123.899	286.1	5.1	mwc	175	49.5	1.04	us
2011-05-06/T06:46:23.470Z	-0.065	122.948	82	5.5	mww	416	24.1	0.92	us
2011-05-05/T08:45:29.000Z	-0.199	124.483	73	5	mwc	131	24.5	0.99	us
2010-12-11/T07:58:43.170Z	0.257	122.031	210	5.1	mb	96	32.6	1	us
2010-10-07/T01:42:51.880Z	1.038	124.395	188	5.1	mb	45	69.7	0.94	us
2010-08-25/T06:25:15.470Z	0.397	123.844	210.7	5	mwc	100	63.2	1.02	us
2010-03-18/T08:36:23.590Z	0.849	120.731	28.7	5	mb	66	53.6	1.32	us
2010-02-26/T04:41:28.990Z	0.893	123.181	69.5	5	mb	55	39.6	1.01	us
2010-01-24/T23:37:04.260Z	0.26	120.653	93	5	mb	38	112	0.9	us
2010-01-21/T17:00:51.100Z	1.446	122.201	32.5	5.2	mwc	66	66.3	1.25	us
2010-01-10/T08:09:45.030Z	-0.019	123.169	176.2	5	mwc	174	24	1.04	us
2009-12-23/T18:13:18.810Z	0.457	121.646	123.2	5	mb	82	61.5	0.88	us
2009-12-20/T13:25:48.050Z	-0.176	124.477	56.6	5	mb	100	33.7	0.99	us
2009-10-31/T00:14:05.850Z	1.16	120.818	19.5	5.2	mwc	62	42.6	1.07	us
2009-09-08/T18:51:22.890Z	1.118	120.897	22.5	5.8	mwc	167	19.8	0.83	us
2009-08-26/T23:27:53.330Z	0.13	123.521	141	5.2	mwc	184	31.5	0.91	us
2009-08-15/T12:30:12.490Z	0.1	123.411	160.3	5.3	mwc	217	25.6	0.86	us
2009-07-10/T03:48:06.780Z	0.251	123.295	253.7	5.3	mwc	188	23.2	0.88	us
2009-06-28/T14:19:30.000Z	1.381	122.204	36.7	5.7	mwc	120	25.2	1.04	us

2009-06-28/T14:18:44.480Z	1.342	122.286	35.2	5	mb	78	62.4	0.77	us
2009-02-11/T04:17:31.270Z	-0.084	124.285	62.7	5	mwc	119	57.3	0.97	us
2009-02-09/T10:47:49.440Z	1.317	123.467	23.5	5.4	mwc	77	76.5	0.93	us
2009-01-20/T04:06:57.220Z	0.47	120.993	88	5.1	mb	58	92.3	0.77	us
2009-01-04/T07:09:02.360Z	1.095	121.856	50.4	5	mb	48	74.7	0.81	us
2009-01-01/T10:35:34.280Z	1.319	121.838	33.1	5.1	mwc	83	52.3	0.96	us
2008-12-11/T21:40:51.870Z	0.063	123.433	129	5.9	mwc	357	25.3	0.92	us
2008-11-16/T18:20:32.430Z	1.127	121.775	35	5.5	mb	104	42	0.9	us
2008-11-16/T17:34:38.650Z	1.291	122.106	35	5.6	mb	156	40.9	0.92	us
2008-11-16/T17:02:32.700Z	1.271	122.091	30	7.4	mww	365	33.7	1.1	us
2008-10-26/T09:08:34.690Z	-0.141	123.015	81	5.6	mwc	211	38.9	1	us
2008-10-20/T04:54:19.240Z	0.109	120.681	96	5.9	mwc	294	35.1	1.02	us
2008-08-29/T10:20:55.480Z	1.022	121.024	566.7	5.2	mwc	191	69.4	0.84	us
2008-06-02/T19:47:16.200Z	-0.029	123.282	153	5.3	mwb	168	51.4	1	us
2008-02-09/T14:37:49.460Z	-0.122	124.368	35	5.1	mwc	100	62.9	0.95	us
2008-02-07/T07:50:55.250Z	1.228	122.653	35.6	5.8	mwc	86	47	1.08	us
2008-01-24/T20:04:15.550Z	-0.114	124.001	107.9	5	mwc	104	69.1	1.11	us

#### Lampiran 4. Perhitungan Epicenter Gempa Gorontalo

time	latit ude	longit ude	latitude Telkom	Longitude Telkom	radians(latitude)		G-F	F-G	radians (longitude)		M-L	L-M	earth radius	distance (km)
2019-02-24/T13:29:33.487 Z	0.49 27	122.1 832	0.552151	123.058187	0.008599 237	0.00963 6853	0.001037 616	0.001037 616	2.13249 9131	2.14777 0535	0.015271 404	0.015271 404	6378.14	97.62368 214
2018-12-19/T11:25:09.500 Z	- 0.14 7	- 124.3 753	0.552151	123.058187	- 0.002565 634	0.00963 6853	0.012202 487	0.012202 487	2.17075 8493	2.14777 0535	- 0.022987 958	- 0.022987 958	6378.14	165.9951 535
2018-12-14/T19:27:26.640 Z	- 0.03 99	- 122.9 645	0.552151	123.058187	- 0.000696 386	0.00963 6853	0.010333 239	0.010333 239	2.14613 5388	2.14777 0535	- 0.001635 147	- 0.001635 147	6378.14	66.72688 669
2018-12-11/T11:23:24.150 Z	- 0.11 77	- 124.4 82	0.552151	123.058187	- 0.002054 253	0.00963 6853	0.011691 105	0.011691 105	2.17262 0759	2.14777 0535	- 0.024850 225	- 0.024850 225	6378.14	175.1609 24
2018-07-10/T15:33:21.730 Z	- 0.28 64	- 122.1 082	0.552151	123.058187	- 0.004998 623	0.00963 6853	0.004638 23	0.004638 23	2.13119 0134	2.14777 0535	- 0.016580 401	- 0.016580 401	6378.14	109.8092 08
2018-03-18/T11:35:05.850 Z	- 0.48 8	- 121.4 659	0.552151	123.058187	- 0.008517 207	0.00963 6853	0.001119 646	0.001119 646	2.11997 9884	2.14777 0535	- 0.027790 651	- 0.027790 651	6378.14	177.3891 528
2018-01-15/T06:31:50.920 Z	- 0.43 89	- 123.6 688	0.552151	123.058187	- 0.007660 25	0.00963 6853	0.001976 603	0.001976 603	2.15842 7742	2.14777 0535	- 0.010657 207	- 0.010657 207	6378.14	69.12988 585
2017-11-22/T01:11:21.660 Z	- 0.41 57	- 124.4 387	0.552151	123.058187	- 0.007255 334	0.00963 6853	0.002381 519	0.002381 519	2.17186 5032	2.14777 0535	- 0.024094 497	- 0.024094 497	6378.14	154.4214 399
2017-10-18/T13:40:55.610 Z	- 0.23 83	- 122.9 492	0.552151	123.058187	- 0.004159 12	0.00963 6853	0.013795 973	0.013795 973	2.14586 8353	2.14777 0535	- 0.001902 182	- 0.001902 182	6378.14	88.82509 056
2017-09-25/T22:07:03.500 Z	- 0.82 23	- 124.3 318	0.552151	123.058187	- 0.014351 842	0.00963 6853	0.004714 99	0.004714 99	2.16999 9275	2.14777 0535	- 0.022228 74	- 0.022228 74	6378.14	144.9222 352
2017-07-15/T12:12:21.490 Z	- 0.40 98	- 121.9 844	0.552151	123.058187	- 0.007152 359	0.00963 6853	0.002484 494	0.002484 494	2.12902 9416	2.14777 0535	- 0.018741 119	- 0.018741 119	6378.14	120.5750 725
2017-03-31/T11:21:01.040 Z	- 0.30 86	- 120.5 802	0.552151	123.058187	- 0.005386 086	0.00963 6853	0.004250 767	0.004250 767	2.10452 1503	2.14777 0535	- 0.043249 032	- 0.043249 032	6378.14	277.1695 88

2017-03-29/T08:20:12.110 Z	0.05 13	123.3 717	0.552151	123.058187	0.000895 354	0.00963 6853	0.008741 499	0.008741 499	2.15324 2369	2.14777 0535	0.005471 834	0.005471 834	6378.14	65.77645 391
2017-03-14/T05:55:21.510 Z	0.65 15	121.1 465	0.552151	123.058187	0.011370 82	0.00963 6853	0.001733 967	0.001733 967	2.11440 5302	2.14777 0535	0.033365 232	0.033365 232	6378.14	213.0835 551
2017-02-10/T18:28:02.970 Z	- 0.18 5	123.0 199	0.552151	123.058187	- 0.003228 859	0.00963 6853	0.012865 712	0.012865 712	2.14710 23	2.14777 0535	0.000668 234	0.000668 234	6378.14	82.16992 006
2016-12-23/T19:15:39.190 Z	- 0.24 58	124.4 794	0.552151	123.058187	- 0.004290 019	0.00963 6853	0.013926 872	0.013926 872	2.17257 5381	2.14777 0535	0.024804 846	0.024804 846	6378.14	181.4380 533
2016-07-29/T08:29:26.170 Z	0.08 28	123.4 107	0.552151	123.058187	0.001445 133	0.00963 6853	0.008191 72	0.008191 72	2.15392 3047	2.14777 0535	0.006152 513	0.006152 513	6378.14	65.34289 028
2016-07-20/T03:58:30.420 Z	0.03 71	122.9 509	0.552151	123.058187	0.000647 517	0.00963 6853	0.008989 336	0.008989 336	2.14589 8023	2.14777 0535	0.001872 511	0.001872 511	6378.14	58.56589 31
2016-06-30/T11:43:11.500 Z	0.49 91	123.6 178	0.552151	123.058187	0.008710 938	0.00963 6853	0.000925 915	0.000925 915	2.15753 7624	2.14777 0535	0.009767 089	0.009767 089	6378.14	62.57254 987
2015-10-09/T16:28:25.360 Z	- 0.02 41	123.8 928	0.552151	123.058187	- 0.000420 624	0.00963 6853	0.010057 477	0.010057 477	2.16233 728	2.14777 0535	0.014566 745	0.014566 745	6378.14	112.9014 755
2015-09-25/T08:47:47.000 Z	1.28 44	122.6 907	0.552151	123.058187	0.022417 009	0.00963 6853	0.012780 156	0.012780 156	2.14135 6677	2.14777 0535	0.006413 858	0.006413 858	6378.14	91.20045 202
2015-09-13/T01:13:14.640 Z	0.04 22	123.4 494	0.552151	123.058187	0.000736 529	0.00963 6853	0.008900 324	0.008900 324	2.15459 849	2.14777 0535	0.006827 955	0.006827 955	6378.14	71.54760 055
2015-09-12/T09:49:27.030 Z	0.01 77	124.3 731	0.552151	123.058187	0.000308 923	0.00963 6853	0.009327 93	0.009327 93	2.17072 0096	2.14777 0535	0.022949 561	0.022949 561	6378.14	158.0023 485
2015-06-13/T23:45:45.130 Z	- 0.22 68	124.4 263	0.552151	123.058187	- 0.003958 407	0.00963 6853	0.013595 26	0.013595 26	2.17164 8611	2.14777 0535	0.023878 076	0.023878 076	6378.14	175.2515 388
2015-04-24/T05:28:07.920 Z	- 0.19 6	124.2 485	0.552151	123.058187	- 0.003420 845	0.00963 6853	0.013057 698	0.013057 698	2.16854 5416	2.14777 0535	0.020774 881	0.020774 881	6378.14	156.5036 044

2015-03-28/T22:28:50.780 Z	0.40 02	121.9 895	0.552151	123.058187	0.006984 808	0.00963 6853	0.002652 045	0.002652 045	2.12911 8428	2.14777 0535	0.018652 107	0.018652 107	6378.14	120.1581 651
2015-03-02/T01:40:52.350 Z	- 04 63	124.5 345	0.552151	123.058187	0.000808 087	0.00963 6853	0.010444 94	0.010444 94	2.17353 7057	2.14777 0535	0.025766 523	0.025766 523	6378.14	177.3296 697
2015-03-01/T03:32:33.780 Z	0.02 41	124.4 702	0.552151	123.058187	0.000420 624	0.00963 6853	0.009216 229	0.009216 229	2.17241 4811	2.14777 0535	- 276	0.024644 276	6378.14	167.8141 296
2015-01-03/T08:03:31.370 Z	0.00 7	123.7 942	0.552151	123.058187	0.000122 173	0.00963 6853	0.009514 68	0.009514 68	2.16061 6385	2.14777 0535	0.012845 85	0.012845 85	6378.14	101.9584 783
2014-11-15/T03:08:04.590 Z	- 014 48	123.8 891	0.552151	123.058187	0.002527 237	0.00963 6853	0.012164 09	0.012164 09	2.16227 2702	2.14777 0535	0.014502 168	0.014502 168	6378.14	120.7260 251
2014-11-04/T04:19:10.360 Z	0.07 82	123.6 538	0.552151	123.058187	0.001364 847	0.00963 6853	0.008272 005	0.008272 005	2.15816 5943	2.14777 0535	0.010395 408	0.010395 408	6378.14	84.73250 213
2014-06-26/T11:28:21.890 Z	0.02 32	123.4 569	0.552151	123.058187	0.000404 916	0.00963 6853	0.009231 937	0.009231 937	2.15472 9389	2.14777 0535	0.006958 855	0.006958 855	6378.14	73.73657 977
2014-06-21/T21:51:50.490 Z	- 009 9	122.9 39	0.552151	123.058187	0.001727 876	0.00963 6853	0.011364 729	0.011364 729	2.14569 0329	2.14777 0535	0.002080 206	0.002080 206	6378.14	73.69007 268
2014-03-06/T00:23:19.290 Z	- 018 17	122.9 097	0.552151	123.058187	0.003171 263	0.00963 6853	0.012808 116	0.012808 116	2.14517 8948	2.14777 0535	0.002591 587	0.002591 587	6378.14	83.34742 922
2014-02-25/T01:49:04.720 Z	0.60 15	120.5 041	0.552151	123.058187	0.010498 155	0.00963 6853	0.000861 303	0.000861 303	2.10319 3307	2.14777 0535	0.044577 228	0.044577 228	6378.14	284.3584 478
2013-12-29/T14:29:52.780 Z	0.00 94	123.3 694	0.552151	123.058187	0.000164 061	0.00963 6853	0.009472 792	0.009472 792	2.15320 2226	2.14777 0535	0.005431 692	0.005431 692	6378.14	69.64628 989
2013-12-04/T17:43:24.390 Z	0.02 38	123.5 477	0.552151	123.058187	0.000415 388	0.00963 6853	0.009221 465	0.009221 465	2.15631 4148	2.14777 0535	0.008543 614	0.008543 614	6378.14	80.17866 929
2013-11-22/T05:37:18.080 Z	- 019 38	122.9 498	0.552151	123.058187	0.003382 448	0.00963 6853	0.013019 301	0.013019 301	2.14587 8825	2.14777 0535	0.001891 71	0.001891 71	6378.14	83.91089 323

2013-10-12/T14:30:09.700 Z	0.74 52	122.2 107	0.552151	123.058187	0.013006 194	0.00963 6853	0.003369 341	0.003369 341	2.13297 9096	2.14777 0535	0.014791 439	0.014791 439	6378.14	96.75259 136
2013-09-10/T01:12:40.290 Z	1.42 92	122.2 569	0.552151	123.058187	0.024944 246	0.00963 6853	0.015307 393	0.015307 393	2.13378 5438	2.14777 0535	0.013985 096	0.013985 096	6378.14	132.2348 413
2013-09-09/T21:41:33.180 Z	1.38 14	122.2 235	0.552151	123.058187	0.024109 978	0.00963 6853	0.014473 125	0.014473 125	2.13320 2498	2.14777 0535	0.014568 036	0.014568 036	6378.14	130.9671 364
2013-08-15/T04:05:55.760 Z	0.00 81	123.1 864	0.552151	123.058187	0.000141 372	0.00963 6853	0.009495 481	0.009495 481	2.15000 8274	2.14777 0535	0.002237 739	0.002237 739	6378.14	62.22250 127
2012-12-28/T17:32:18.070 Z	- 0.14 5	122.9 18	0.552151	123.058187	- 0.002530 727	0.00963 6853	0.012167 58	0.012167 58	2.14532 381	2.14777 0535	0.002446 725	0.002446 725	6378.14	79.15996 985
2012-11-06/T01:42:26.330 Z	1.35 7	122.1 67	0.552151	123.058187	0.023684 118	0.00963 6853	0.014047 265	0.014047 265	2.13221 6387	2.14777 0535	0.015554 147	0.015554 147	6378.14	133.6651 854
2012-11-06/T01:38:20.120 Z	1.28 1	122.0 88	0.552151	123.058187	0.022357 668	0.00963 6853	0.012720 815	0.012720 815	2.13083 7577	2.14777 0535	0.016932 958	0.016932 958	6378.14	135.0701 132
2012-11-06/T01:36:21.630 Z	1.37 4	122.2	0.552151	123.058187	0.023980 824	0.00963 6853	0.014343 971	0.014343 971	2.13279 2346	2.14777 0535	0.014978 189	0.014978 189	6378.14	132.2642 955
2012-11-01/T23:37:18.240 Z	1.22 9	122.1 05	0.552151	123.058187	0.021450 097	0.00963 6853	0.011813 244	0.011813 244	2.13113 4283	2.14777 0535	0.016636 252	0.016636 252	6378.14	130.1277 349
2012-10-25/T10:09:45.000 Z	- 0.69	124.5 5	0.552151	123.058187	0.012042 772	0.00963 6853	0.002405 919	0.002405 919	2.17380 7583	2.14777 0535	0.026037 049	0.026037 049	6378.14	166.7656 596
2012-07-09/T12:25:47.340 Z	0.17 1	122.7 91	0.552151	123.058187	0.002984 513	0.00963 6853	0.012621 366	0.012621 366	2.14310 7242	2.14777 0535	0.004663 293	0.004663 293	6378.14	85.81968 077
2012-06-20/T21:55:53.810 Z	0.10 2	123.4 26	0.552151	123.058187	0.001780 236	0.00963 6853	0.007856 617	0.007856 617	2.15419 0083	2.14777 0535	0.006419 548	0.006419 548	6378.14	64.71077 155
2012-05-13/T04:46:05.930 Z	- 0.11 5	122.9 96	0.552151	123.058187	- 0.002007 129	0.00963 6853	0.011643 982	0.011643 982	2.14668 5167	2.14777 0535	0.001085 368	0.001085 368	6378.14	74.58887 716

2012-01-16/T08:26:17.390 Z	0.00 2	123.0 9	0.552151	123.058187	3.49066 E-05	0.00963 6853	0.009601 946	0.009601 946	2.14832 5776	2.14777 0535	0.000555 242	0.000555 242	6378.14	61.34486 2
2011-12-13/T07:52:11.930 Z	0.04 1	123.0 3	0.552151	123.058187	0.000715 585	0.00963 6853	0.008921 268	0.008921 268	2.14727 8579	2.14777 0535	0.000491 956	0.000491 956	6378.14	56.98754 195
2011-12-02/T05:19:26.890 Z	0.12 1	120.4 99	0.552151	123.058187	0.002111 848	0.00963 6853	0.007525 005	0.007525 005	2.10310 4295	2.14777 0535	0.044666 239	0.044666 239	6378.14	288.8966 777
2011-11-23/T22:06:00.410 Z	1.33 9	121.6 62	0.552151	123.058187	0.023369 959	0.00963 6853	0.013733 106	0.013733 106	2.12340 2475	2.14777 0535	0.024368 06	0.024368 06	6378.14	178.3861 529
2011-11-15/T10:43:51.850 Z	- 0.09 5	121.9 14	0.552151	123.058187	- 0.001658 063	0.00963 6853	0.011294 916	0.011294 916	2.12780 0704	2.14777 0535	0.019969 83	0.019969 83	6378.14	146.3305 262
2011-11-02/T06:33:29.680 Z	- 0.01 2	123.3 52	0.552151	123.058187	- 0.000209 44	0.00963 6853	0.009846 292	0.009846 292	2.15289 8539	2.14777 0535	0.005128 004	0.005128 004	6378.14	70.80743 916
2011-11-01/T01:03:53.480 Z	0.04 8	123.3 66	0.552151	123.058187	0.000837 758	0.00963 6853	0.008799 095	0.008799 095	2.15314 2885	2.14777 0535	0.005372 35	0.005372 35	6378.14	65.75526 438
2011-07-08/T05:22:40.820 Z	0.13 1	123.2 44	0.552151	123.058187	0.002286 381	0.00963 6853	0.007350 472	0.007350 472	2.15101 3583	2.14777 0535	0.003243 049	0.003243 049	6378.14	51.24246 106
2011-07-01/T02:38:49.430 Z	0.93 8	121.7 43	0.552151	123.058187	0.016371 188	0.00963 6853	0.006734 335	0.006734 335	2.12481 6191	2.14777 0535	0.022954 343	0.022954 343	6378.14	152.5645 307
2011-05-27/T05:39:30.630 Z	1.54 5	123.8 99	0.552151	123.058187	0.026965 337	0.00963 6853	0.017328 484	0.017328 484	2.16244 549	2.14777 0535	0.014674 955	0.014674 955	6378.14	144.8207 434
2011-05-06/T06:46:23.470 Z	- 0.06 5	122.9 48	0.552151	123.058187	- 0.001134 464	0.00963 6853	0.010771 317	0.010771 317	2.14584 7409	2.14777 0535	0.001923 126	0.001923 126	6378.14	69.78733 896
2011-05-05/T08:45:29.000 Z	- 0.19 9	124.4 83	0.552151	123.058187	- 0.003473 205	0.00963 6853	0.013110 058	0.013110 058	2.17263 8213	2.14777 0535	0.024867 678	0.024867 678	6378.14	179.2995 22
2010-12-11/T07:58:43.170 Z	0.25 7	122.0 31	0.552151	123.058187	0.004485 496	0.00963 6853	0.005151 357	0.005151 357	2.12984 274	2.14777 0535	0.017927 795	0.017927 795	6378.14	118.9699 359

2010-10-07/T01:42:51.880 Z	1.03 8	124.3 95	0.552151	123.058187	0.018116 518	0.00963 6853	0.008479 665	0.008479 665	2.17110 2323	2.14777 0535	0.023331 788	0.023331 788	6378.14	158.3229 819
2010-08-25/T06:25:15.470 Z	0.39 7	123.8 44	0.552151	123.058187	0.006928 957	0.00963 6853	0.002707 896	0.002707 896	2.16148 5559	2.14777 0535	0.013715 024	0.013715 024	6378.14	89.16210 104
2010-03-18/T08:36:23.590 Z	0.84 9	120.7 31	0.552151	123.058187	0.014817 845	0.00963 6853	0.005180 992	0.005180 992	2.10715 3459	2.14777 0535	0.040617 075	0.040617 075	6378.14	261.1409 563
2010-02-26/T04:41:28.990 Z	0.89 3	123.1 81	0.552151	123.058187	0.015585 79	0.00963 6853	0.005948 937	0.005948 937	2.14991 4026	2.14777 0535	0.002143 491	0.002143 491	6378.14	40.33066 191
2010-01-24/T23:37:04.260 Z	0.26	120.6 53	0.552151	123.058187	0.004537 856	0.00963 6853	0.005098 997	0.005098 997	2.10579 2102	2.14777 0535	0.041978 432	0.041978 432	6378.14	269.7053 043
2010-01-21/T17:00:51.100 Z	1.44 6	122.2 01	0.552151	123.058187	0.025237 461	0.00963 6853	0.015600 608	0.015600 608	2.13280 9799	2.14777 0535	0.014960 735	0.014960 735	6378.14	137.8519 523
2010-01-10/T08:09:45.030 Z	0.01 9	123.1 69	0.552151	123.058187	0.000331 613	0.00963 6853	0.009968 465	0.009968 465	2.14970 4586	2.14777 0535	0.001934 052	0.001934 052	6378.14	64.76584 206
2009-12-23/T18:13:18.810 Z	0.45 7	121.6 46	0.552151	123.058187	0.007976 155	0.00963 6853	0.001660 698	0.001660 698	2.12312 3222	2.14777 0535	0.024647 313	0.024647 313	6378.14	157.5543 491
2009-12-20/T13:25:48.050 Z	0.17 6	124.4 77	0.552151	123.058187	0.003071 779	0.00963 6853	0.012708 632	0.012708 632	2.17253 3493	2.14777 0535	0.024762 958	0.024762 958	6378.14	177.5253 706
2009-10-31/T00:14:05.850 Z	1.16	120.8 18	0.552151	123.058187	0.020245 819	0.00963 6853	0.010608 966	0.010608 966	2.10867 1896	2.14777 0535	0.039098 639	0.039098 639	6378.14	258.3656 983
2009-09-08/T18:51:22.890 Z	1.11 8	120.8 97	0.552151	123.058187	0.019512 781	0.00963 6853	0.009875 928	0.009875 928	2.11005 0706	2.14777 0535	0.037719 829	0.037719 829	6378.14	248.6661 36
2009-08-26/T23:27:53.330 Z	0.13	123.5 21	0.552151	123.058187	0.002268 928	0.00963 6853	0.007367 925	0.007367 925	2.15584 8145	2.14777 0535	0.008077 611	0.008077 611	6378.14	69.73250 068
2009-08-15/T12:30:12.490 Z	0.1	123.4 11	0.552151	123.058187	0.001745 329	0.00963 6853	0.007891 524	0.007891 524	2.15392 8283	2.14777 0535	0.006157 748	0.006157 748	6378.14	63.84278 793



2009-07-10/T03:48:06.780 Z	0.25 1	123.2 95	0.552151	123.058187	0.004380 776	0.00963 6853	0.005256 076	0.005256 076	2.15190 3701	2.14777 0535	0.004133 167	0.004133 167	6378.14	42.64707 311
2009-06-28/T14:19:30.000 Z	1.38 1	122.2 04	0.552151	123.058187	0.024102 997	0.00963 6853	0.014466 144	0.014466 144	2.13286 2159	2.14777 0535	0.014908 376	0.014908 376	6378.14	132.4845 555
2009-06-28/T14:18:44.480 Z	1.34 2	122.2 86	0.552151	123.058187	0.023422 319	0.00963 6853	0.013785 466	0.013785 466	2.13429 3329	2.14777 0535	0.013477 206	0.013477 206	6378.14	122.9545 319
2009-02-11/T04:17:31.270 Z	0.08 4	124.2 85	0.552151	123.058187	0.001466 077	0.00963 6853	0.011102 929	0.011102 929	2.16918 2461	2.14777 0535	0.021411 926	0.021411 926	6378.14	153.8352 977
2009-02-09/T10:47:49.440 Z	1.31 7	123.4 67	0.552151	123.058187	0.022985 986	0.00963 6853	0.013349 133	0.013349 133	2.15490 5668	2.14777 0535	0.007135 133	0.007135 133	6378.14	96.53882 864
2009-01-20/T04:06:57.220 Z	0.47	120.9 93	0.552151	123.058187	0.008203 047	0.00963 6853	0.001433 805	0.001433 805	2.11172 6222	2.14777 0535	0.036044 313	0.036044 313	6378.14	230.0683 318
2009-01-04/T07:09:02.360 Z	1.09 5	121.8 56	0.552151	123.058187	0.019111 355	0.00963 6853	0.009474 502	0.009474 502	2.12678 8413	2.14777 0535	0.020982 121	0.020982 121	6378.14	146.8249 157
2009-01-01/T10:35:34.280 Z	1.31 9	121.8 38	0.552151	123.058187	0.023020 893	0.00963 6853	0.013384 04	0.013384 04	2.12647 4254	2.14777 0535	0.021296 281	0.021296 281	6378.14	160.4119 835
2008-12-11/T21:40:51.870 Z	0.06 3	123.4 33	0.552151	123.058187	0.001099 557	0.00963 6853	0.008537 295	0.008537 295	2.15431 2256	2.14777 0535	0.006541 721	0.006541 721	6378.14	68.59927 044
2008-11-16/T18:20:32.430 Z	1.12 7	121.7 75	0.552151	123.058187	0.019669 861	0.00963 6853	0.010033 008	0.010033 008	2.12537 4697	2.14777 0535	0.022395 838	0.022395 838	6378.14	156.5080 286
2008-11-16/T17:34:38.650 Z	1.29 1	122.1 06	0.552151	123.058187	0.022532 201	0.00963 6853	0.012895 348	0.012895 348	2.13115 1736	2.14777 0535	0.016618 798	0.016618 798	6378.14	134.1532 505
2008-11-16/T17:02:32.700 Z	1.27 1	122.0 91	0.552151	123.058187	0.022183 135	0.00963 6853	0.012546 282	0.012546 282	2.13088 9937	2.14777 0535	0.016880 598	0.016880 598	6378.14	134.1363 785
2008-10-26/T09:08:34.690 Z	0.14 1	123.0 15	0.552151	123.058187	0.002460 914	0.00963 6853	0.012097 767	0.012097 767	2.14701 6779	2.14777 0535	0.000753 755	0.000753 755	6378.14	77.31087 205

2008-10-20/T04:54:19.240 Z	0.10 9	120.6 81	0.552151	123.058187	0.001902 409	0.00963 6853	0.007734 444	0.007734 444	2.10628 0795	2.14777 0535	0.041489 74	0.041489 74	6378.14	269.1812 56
2008-08-29/T10:20:55.480 Z	1.02 2	121.0 24	0.552151	123.058187	0.017837 265	0.00963 6853	0.008200 412	0.008200 412	2.11226 7274	2.14777 0535	0.035503 261	0.035503 261	6378.14	232.3852 656
2008-06-02/T19:47:16.200 Z	- 9	123.2 82	0.552151	123.058187	- 145	0.00963 6853	0.010142 998	0.010142 998	2.15167 6808	2.14777 0535	- 274	0.003906 274	6378.14	69.32511 315
2008-02-09/T14:37:49.460 Z	- 2	124.3 68	0.552151	123.058187	0.002129 302	0.00963 6853	0.011766 155	0.011766 155	2.17063 1084	2.14777 0535	0.022860 549	0.022860 549	6378.14	163.9856 536
2008-02-07/T07:50:55.250 Z	1.22 8	122.6 53	0.552151	123.058187	0.021432 643	0.00963 6853	0.011795 79	0.011795 79	2.14069 8687	2.14777 0535	0.007071 847	0.007071 847	6378.14	87.71717 617
2008-01-24/T20:04:15.550 Z	- 4	124.0 01	0.552151	123.058187	- 675	0.00963 6853	0.011626 528	0.011626 528	2.16422 5726	2.14777 0535	- 191	0.016455 191	6378.14	128.5068 534