

**ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI BERDASARKAN DATA  
SPT PADA PROYEK PEMBANGUNAN RUMAH SUSUN  
SILANGKITANG**

**SKRIPSI**

**OLEH:**

**ANDIKA LEONARDO LUMBAN BATU**

**208110036**



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MEDAN AREA**

**2024**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

i

Document Accepted 19/11/24

1. Dilarang Mengutip sebagian atau seluruh dokumen ini tanpa mencantumkan sumber
2. Pengutipan hanya untuk keperluan pendidikan, penelitian dan penulisan karya ilmiah
3. Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh karya ini dalam bentuk apapun tanpa izin Universitas Medan Area

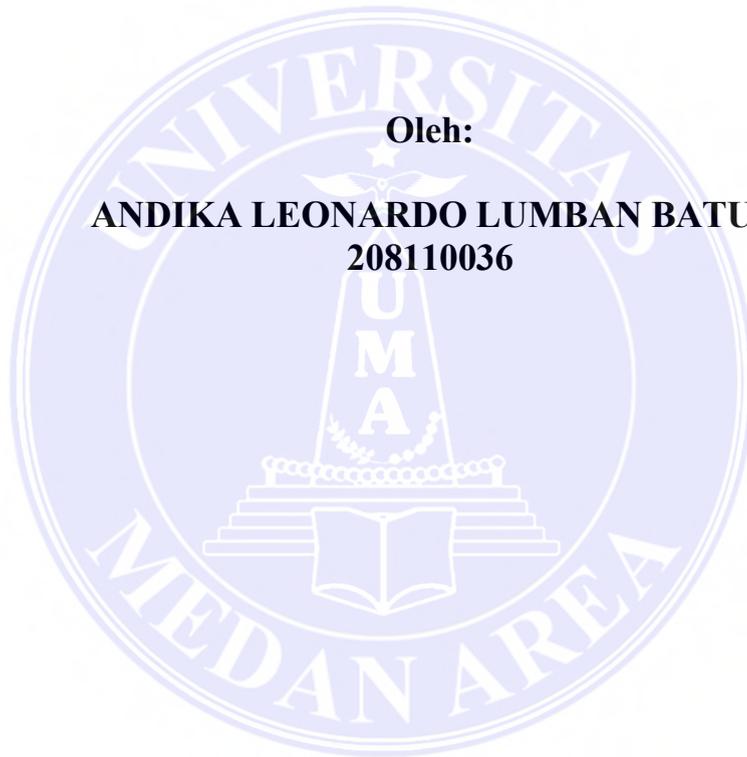
# **ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI BERDASARKAN DATA SPT PADA PROYEK PEMBANGUNAN RUMAH SUSUN SILANGKITANG**

## **SKRIPSI**

Diajukan sebagai Salah Satu Syarat  
untuk Memperoleh Gelar Sarjana di Fakultas Teknik  
Universitas Medan Area

**Oleh:**

**ANDIKA LEONARDO LUMBAN BATU  
208110036**



**PROGRAM STUDI TEKNIK  
SIPIIL FAKULTAS TEKNIK  
UNIVERSITAS MEDAN  
AREA MEDAN  
2024**

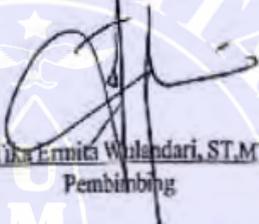
UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

**HALAMAN PENGESAHAN**

Judul Skripsi : Analisis Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data Spt Pada  
Proyek Pembangunan Rumah Susun Silangkitang  
Nama : Andika Leonardo Lumban Batu  
NPM : 208110036  
Fakultas : Teknik

Disetujui Oleh:  
Komisi Pembimbing

  
Ir. Tika Ernita Wulandari, ST, MT  
Pembimbing

  
Dr. Gita Subianto, ST., MT  
Dekan

  
Ir. Tika Ernita Wulandari, S.T., M.T  
Pembimbing

Tanggal Lulus : 29 Agustus 2024

### HALAMAN PERNYATAAN

Saya menyatakan bahwa skripsi yang saya susun, sebagai syarat memperoleh gelar sarjana merupakan hasil karya tulis sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan skripsi ini yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan sumbernya secara jelas sesuai dengan norma, kaidah, dan etika penulisan ilmiah. Saya bersedia menerima saksi pencabutan gelar akademik yang saya peroleh dan saksi- sanksi lainnya dengan peraturan yang berlaku, apabila di kemudian hari ditemukan adanya plagiat dalam skripsi ini.



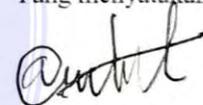
## HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai sivitas akademik Universitas Medan Area, saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Andika Leonardo Lumban Batu  
NPM : 208110036  
Program Studi : Teknik Sipil  
Fakultas : Teknik  
Jenis karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area **Hak Bebas Royalti Noneklusif (Non Exclusive Royalty Free-Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul : Analisis Potensi Likuiifikasi Berdasarkan Data Spt Pada Proyek Pembangunan Rumah Susun Silangkitang. Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan hak Bebas Royalti Noneklusif ini Universitas Medan Area berhak menyimpan, mengalihmedia/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (database), merawat, dan mempublikasikan skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta. Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Medan, 29 Agustus 2024  
Yang menyatakan



( Andika Lumban Batu )

## RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Hutajulu Pada tanggal 04 september 2002 dari Ayah S Lumban Batu dan Ibu R Lumban Gaol. Penulis merupakan putra ke 6 dari 6 bersudara. Tahun 2020 Penulis lulus dari SMA Negeri 1 Pollung dan pada tahun 2020 terdaftar sebagai Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Medan Area. Pada tahun 2023 Penulis melaksanakan Praktek Kerja Lapangan (PKL) di Pembangunan Gedung Kolaborasi UMKM Square Universitas Sumatra Utara.



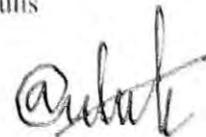
## KATA PENGANTAR

Puji dan syukur Penulis panjatkan kepada Tuhan Yang Maha Esa, atas berkat karunia dan rahmatnya penulis dapat menyelesaikan Penelitian ini. Judul yang diangkat dalam skripsi yaitu "Analisis Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data Spt Pada Proyek Pembangunan Rumah Susun Silangkitang". Ini merupakan salah satu persyaratan kelulusan guna mencapai gelar sarjana (S1) di Jurusan Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Medan Area. Untuk itu saya mengucapkan rasa terimakasih kepada Ibu Ir. Tika Ermita Wulandari S.T, M.T. Sebagai Ka.Prodi Teknik Sipil sekaligus sebagai Dosen pembimbing yang telah banyak memberikan kritik dan Saran. Sekaligus juga mengucapkan banyak terima kasih kepada seluruh Dosen dan Pegawai di Fakultas Teknik Sipil Universitas Medan Area yang memberikan ilmu dan pengetahuan selama Penulis menjalani jenjang pendidikan.

Teristimewa kepada kedua orang tua tercinta penulis, Bapak Sabar Lumban Batu dan Ibu Ramdi Lumban Gaol, untuk beliau berdua skripsi ini penulis persembahkan. Terimakasih atas segala kasih sayang yang diberikan dalam membesarkan dan membimbing penulis selama ini sehingga penulis dapat terus berjuang dalam meraih mimpi dan cita-cita. Untuk Abang dan Kakak tersayang dan seluruh keluarga yang tercinta, terimakasih atas segala dukungan dan semangat yang telah kalian berikan selama penulis menempuh ilmu di bangku perkuliahan ini. Untuk sahabat seperjuangan Michael R Panjaitan, Aldi Lumban Gaol, Sikon Hutagaol, Rikki Silaban, Sion Ritonga, Agus P Sibagariang, yang telah menjadi rekan dan saudara selama proses pembimbingan penulisan serta memberikan motivasi, dukungan dan bantuan kepada penulis. Untuk pacar saya Dearti Sirait terimakasih jadi penyemangat serta Support System saya dalam proses skripsi ini. Teruntuk rekan juang Keluarga Besar Ikatan Mahasiswa Sipil Universitas Medan Area (IMS UMA), yang telah menjadi wadah tempat penulis berproses dan banyak belajar pengalaman baik akademik dan non akademik, serta belajar tentang organisasi dan juga memberikan dukungan kepada penulis.

Skripsi ini tentunya masih jauh dari kesempurnaan, untuk itu penulis berharap kritik dan saran yang konstruktif untuk menjadi bahan pembelajaran penulis di masa depan. Semoga Tuhan senantiasa melimpahkan berkatnya kepada semua pihak yang telah membantu dalam menyelesaikan skripsi ini. Penulis berharap semoga karya ini bisa bermanfaat bagi pembacanya.

Medan, 29 Agustus 2024  
Penulis



Andika Lumban Batu

## ABSTRAK

Potensi likuifaksi di Tapanuli Utara, terutama pada area pembangunan Rumah Susun Silangkitang akan dianalisis menggunakan beberapa besaran magnitudo gempa berdasarkan data riwayat gempa 50 tahun kebelakang dan hasil data uji *Boring Log*. *Boring Log* merupakan pengujian statis menggunakan mesin bor untuk mengambil sampel tanah dan untuk mengetahui nilai SPT tanah. Nilai SPT tersebut kemudian akan dihitung untuk mendapatkan nilai *cyclic stress ratio* (CSR), *cyclic resistance ratio* (CRR), dan nilai faktor keamanan (FS). Jika nilai FS tersebut kurang dari satu, maka besar potensi likuifaksi dapat terjadi di sekitar area pembangunan Rumah susun Silangkitang. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui potensial likuifaksi dengan menggunakan kekuatan gempa 6.5 SR, 7.5 SR, 8SR. Analisis penelitian menggunakan data primer dari data *bore log* proyek, kemudian data sekunder menggunakan data dari SNI 1726 : 2019 dan *website* Desain Spektra Puskim PU. Hasil analisis diperoleh bahwa semua lapisan tanah pada *bore hole* 1 menurut refrensi SNI 1726:2019 dan Desain Spektra Puskim PU dengan magnitudo 6.5 SR, 7.5 SR, 8.0 SR memiliki nilai  $F_s > 1$ . Dari hasil tersebut dapat disimpulkan bahwa tanah di area pembangunan Rumah Susun Silangkitang tidak mengalami potensi Likuifaksi.

**Kata Kunci :** Likuifaksi, *Bore Hole*, SNI 1726 : 2019, Puskim.

### ABSTRACT

The liquefaction potential in North Tapanuli, especially in the Silangkitang Apartment construction area, was analyzed using several earthquake magnitudes based on the seismic history data of the past 50 years and the results of Boring Log test data. Boring Log is a static test using a drilling machine to collect soil samples and determine the SPT value of the soil. The SPT value was then calculated to obtain the cyclic stress ratio (CSR), cyclic resistance ratio (CRR), and safety factor (FS) values. If the FS value was less than one, the high potential for liquefaction could occur around the Silangkitang Apartment construction area. The purpose of this research was to determine the liquefaction potential using earthquake strengths of 6.5 SR, 7.5 SR, and 8.0 SR. The research analysis used primary data from the bore log project, and secondary data from SNI 1726:2019 and the Puskim PU Design Spectrum website. The analysis results showed that all soil layers in bore hole 1, according to SNI 1726:2019 and the Puskim PU Design Spectrum with magnitudes of 6.5 SR, 7.5 SR, and 8.0 SR, had FS values  $>1$ . Based on these results, it could be concluded that the soil in the Silangkitang Apartment construction area did not experience liquefaction potential.

**Keywords:** Liquefaction, Bore Hole, SNI 1726:2019, Puskim

## DAFTAR ISI

	Halaman
COVER .....	i
HALAMAN JUDUL.....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
HALAMAN PERNYATAAN.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI .....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
RIWAYAT HIDUP .....	v
KATA PENGHANTAR.....	<b>Error! Bookmark not defined.</b>
ABSTRAK .....	viii
ABSTRACT.....	xiv
DAFTAR ISI.....	x
DAFTAR TABEL .....	xii
DAFTAR GAMBAR .....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xiv
DAFTAR NOTASI.....	xiv
BAB I PENDAHULUAN .....	1
1.1. Latar Belakang .....	1
1.2. Rumusan Penelitian.....	2
1.3. Maksud dan Tujuan penelitian .....	3
1.4. Batasan Masalah.....	3
1.5. Manfaat Penelitian .....	3
BAB II LANDASAN TEORI .....	5
2.1. Peneliti terdahulu .....	5
2.2. Tanah .....	8
2.2.1 USDA <i>Texture Triangle</i> .....	9
2.2.2 Data N-SPT .....	13
2.3 Gempa Bumi .....	14
2.3.1. Jenis-Jenis Sesar (Patahan) .....	14
2.3.2. Jenis-Jenis Gempa Bumi .....	15
2.3.3. Besar Kekuatan Gempa .....	17
2.3.4. Riwayat Gempa Bumi di Sumatera Utara .....	19
2.4. Likuifaksi.....	20
2.4.1. Syarat Terjadinya Likuifaksi .....	21
2.4.2. Jenis-Jenis Likuifaksi .....	21
2.4.3 Metode Evaluasi Potensi Likuifaksi.....	22
2.4.4 Proses Terjadinya Likuifaksi.....	23
2.4.5 Dampak Terjadinya Likuifaksi.....	24
2.5 Histori Kasus Likufaksi di Indonesia.....	26
2.6 Tegangan Tanah.....	29
2.6.1 Percepatan Gempa Dasar ( <i>amax</i> ).....	36
2.6.3 <i>Stress Reduction Factor (rd)</i> .....	37
2.6.4 <i>Cyclic Stress Ratio (CSR)</i> .....	38
2.7 <i>Cyclic Resistance Ratio (CRR)</i> .....	39

2.7.1. <i>Factor of Safety (FS)</i> .....	42
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	43
3.1 Deskripsi Penelitian .....	43
3.2. Lokasi Penelitian .....	43
3.3. Kondisi Tanah Ekisting .....	44
3.4. Teknik Pegempulan Data .....	44
3.4.1. Metode Pengumpulan Data .....	45
3.5. Alur Penelitian .....	45
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b> .....	47
4.1. Perhitungan Tegangan Tanah .....	47
4.1.1 Perhitungan Tegangan Tanah Pada BH.01 .....	47
4.2. Nilai N-SPT $(N1)_{60}$ dan $(N1)_{60cs}$ .....	50
4.2.1 Perhitungan $(N1)_{60}$ , dan $(N1)_{60cs}$ Pada BH.01 .....	50
4.3. Percepatan Gempa Dasar ( $\alpha_{max}$ ) .....	54
4.3.1. Berdasarkan SNI 1726:2019 .....	54
4.4. Perhitungan <i>Stress Reduction Factor</i> (rd) .....	56
4.5. Perhitungan CSR Berdasarkan SNI 1726:2019 .....	58
4.5.1 Perhitungan CSR Pada BH.01 .....	58
4.5.2 Perhitungan CSR Berdasarkan Desain Spektra Indonesia Puskim PU .....	60
4.6. Perhitungan <i>Cyclic Resistance Ratio</i> .....	61
4.6.1. Perhitungan CRR6,5, CRR7,5, CRR8, Pada BH.02 .....	61
4.7. Perhitungan <i>Factor of Safety</i> (FS) .....	67
4.8. Pembahasan .....	69
<b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	71
5.1 Kesimpulan .....	71
5.2 Saran .....	71
<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	72
<b>LAMPIRAN</b>	

## DAFTAR TABEL

Tabel 1. Jenis Gempa Tektonik Berdasarkan Kedalaman Gempa .....	16
Tabel 2. Data Gempa Bumi di Sumatera Utara dalam 50 Tahun Terakhir .....	19
Tabel 3. Histori Kejadian Likuifaksi di Pulau Sumatera.....	28
Tabel 4. Nilai Korelasi Parameter Tanah dengan N-SPT untuk Jenis Tanah Pasir (Sand) dan Lempung .....	30
Tabel 5. Faktor Koreksi Uji SPT.....	32
Tabel 6. Tabel Nilai Korelasi.....	35
Tabel 7. Nilai <i>Standar Penetrasi Test</i> (SPT) BH-01 .....	43
Tabel 8. Hasil Perhitungan Interpolasi Berat Isi Tanah Pada BH.01.....	47
Tabel 9. Hasil Perhitungan Tegangan Vertikal Total Tanah, Tekanan Air Pori Tanah, dan Tegangan Vertikal Efektif Tanah Pada BH.01 .....	49
Tabel 10. Hasil Perhitungan Tegangan Vertikal Total Tanah, Tekanan Air Pori Tanah, dan Tegangan Vertikal Efektif Tanah Pada BH.01 .....	51
Tabel 11. Hasil Perhitungan Nilai $(N_1)_{60sc}$ Pada BH.01 .....	53
Tabel 12. Hasil Perhitungan <i>Stress Reduction Factor</i> pada BH.01 .....	57
Tabel 13. Hasil Perhitungan CSR pada BH.01 berdasarkan SNI 1726:2019.....	59
Tabel 14. Hasil Perhitungan CSR Berdasarkan Desain Spektra Indonesia Purkim PU.....	60
Tabel 15. Hasil Perhitungan $CRR_{7,5}$ Pada BH.01 .....	62
Tabel 16. Hasil Perhitungan $CRR_{6,5}$ Pada BH.01 .....	64
Tabel 17. Hasil Perhitungan $CRR_8$ Pada BH.01 .....	66
Tabel 18. Hasil Perhitungan <i>factor of safety</i> Dengan Magnitudo 6.5 SR Pada BH- 01 .....	67
Tabel 19. Hasil Perhitungan <i>factor of safety</i> Dengan Magnitudo 7.5 SR Pada BH- 01 .....	68
Tabel 20. Hasil Perhitungan <i>factor of safety</i> Dengan Magnitudo 8.0 SR Pada BH- 01 .....	69

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. <i>The Soil Texture Triangle</i> .....	10
Gambar 2. Tekstur Tanah <i>Clay, Loam, Sand, dan Silt</i> .....	11
Gambar 3. <i>Soil Texture Triangle</i> .....	12
Gambar 4. <i>Normal Fault</i> .....	14
Gambar 5. <i>Reverse Fault</i> .....	15
Gambar 6. <i>Strike Fault</i> .....	15
Gambar 7. Skala <i>MMI Modified Mercally Intensity</i> .....	17
Gambar 8. Besaran magnitudo.....	18
Gambar 9. Tanah Dalam Keadaan Normal, Likuifaksi dan Setelah Likuifaksi .....	23
Gambar 10. Jarak Kab. Donggala ke Kab.....	27
Gambar 11. Grafik Korelasi <i>Measured Fines Content</i> dengan <i>Soil BehaviourType Index</i> .....	33
Gambar 12. Hubungan antara <i>Measured Fines Content (%)</i> , <i>Soil BehaviourIndex (Ic)</i> dan Klasifikasi Tanah USCS. ....	34
Gambar 13. Halaman Puskim Desain Spektra Indonesia.....	36
Gambar 14. Percepatan Gempa Dasar SNI 03-1726-2002. ....	36
Gambar 15. Kurva Hubungan antara <i>N-SPT Clean Sand</i> dengan Gempa Bumi Magnitudo 7.5 SR. ....	40
Gambar 16. Lokasi Penelitian.....	42
Gambar 17. Alur Penelitian.....	45
Gambar 18. Spektrum Respon Desain.....	54
Gambar 19. Parameter untuk membuat Grafik Desain Spektra .....	55
Gambar 20. Gempa ulang periode ulang.....	55

## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. *Drilling Log*.....72



## DAFTAR NOTASI

$\sigma_v$	= Tegangan vertikal total tanah
$\sigma'_v$	= Tegangan vertikal efektif tanah
$\gamma$	= Berat isi lapisan tanah
$z$	= Kedalaman tanah yang ditinjau
$\mu$	= Tekanan air pori tanah
$\gamma_w$	= Berat volume air
$(N1)_{60}$	= Nilai SPT yang dikoreksi terhadap pengaruh efisiensi tenaga 60%
$(N1)_{60cs}$	= Nilai SPT yang dikoreksi terhadap pengaruh <i>finer content</i>
$N_m$	= Nilai N-SPT yang diperoleh dari pengujian lapangan
$C_N$	= Faktor normalisasi $N_m$ terhadap tegangan <i>overburden</i> pada umumnya
$C_E$	= Koreksi rasio energi <i>hammer</i>
$C_B$	= Koreksi untuk diameter lubang bor
$C_R$	= Faktor koreksi dari panjang batang
$C_S$	= Koreksi untuk sampel
$p_a$	= Tegangan atmosfer 100 kPa
$F_C$	= <i>Fines content</i>
$r_d$	= Faktor reduksi terhadap tegangan
$CSR$	= Tegangan siklik yang menyebabkan likuifaksi
$\alpha_{max}$	= Percepatan gempa dasar
$g$	= Percepatan gravitasi bumi

## **BAB I PENDAHULUAN**

### **1.1. Latar Belakang**

Proyek pembangunan rumah susun di Silangkitang menghadapi tantangan geoteknik yang signifikan, terutama terkait dengan risiko likuifaksi tanah. Likuifaksi merupakan fenomena di mana tanah jenuh air kehilangan kekuatan dan kestabilannya selama gempa bumi, yang dapat menyebabkan kerusakan serius pada struktur bangunan. Dalam konteks ini, penting untuk memahami potensi likuifaksi agar desain dan konstruksi rumah susun dapat dilakukan dengan aman dan efektif.

Data SPT (*Standard Penetration Test*) merupakan salah satu metode utama untuk menentukan karakteristik kekuatan dan kestabilan tanah di lokasi proyek. SPT memberikan informasi tentang kepadatan dan konsolidasi tanah yang sangat berguna dalam penilaian potensi likuifaksi. Melalui data SPT, para insinyur dapat mengidentifikasi lapisan tanah yang mungkin berisiko terhadap likuifaksi, sehingga langkah-langkah mitigasi dapat dirancang dengan tepat.

Area Silangkitang memiliki kondisi geologi yang variatif dengan lapisan tanah berpasir yang berpotensi tinggi mengalami likuifaksi. Keberadaan tanah berpasir yang jenuh air, terutama jika berada pada kedalaman yang dangkal, dapat memperbesar kemungkinan terjadinya likuifaksi selama kejadian gempa. Oleh karena itu, analisis mendalam mengenai kondisi tanah berdasarkan data SPT sangat penting untuk memastikan bahwa desain rumah susun dapat menahan risiko tersebut. Peristiwa likuifaksi pernah terjadi di Kota Padang pada tahun 2009 yang dipicu oleh gempa bumi dengan magnitudo 7.6 SR. Dalam peristiwa

tersebut, perpindahan tanah lateral diikuti oleh semburan pasir (*sand boiling*) dan tidak terdapat korban jiwa, namun menyebabkan kerusakan pada lantai-lantai rumah serta penurunan pondasi bangunan rumah baik bangunan tempat tinggal hingga bangunan tinggi seperti perkantoran.

Dengan melakukan analisis potensi likuifaksi berdasarkan data SPT, proyek pembangunan rumah susun di Silangkitang dapat menghadapi tantangan geoteknik secara proaktif. Penilaian yang tepat akan mendukung perancangan struktur yang lebih aman dan tahan terhadap risiko likuifaksi. Oleh karena itu, analisis ini tidak hanya bermanfaat untuk memastikan keberhasilan proyek tetapi juga untuk meningkatkan keselamatan penghuni dan ketahanan bangunan terhadap bencana alam.

Berdasarkan latar belakang di atas, potensi likuifaksi di Kabupaten Tapanuli Utara, terutama pada area pembangunan Rumah Susun Silangkitang akan dianalisis menggunakan beberapa besaran magnitudo gempa berdasarkan data riwayat gempa 50 tahun kebelakang dan hasil data uji *Boring Log*. *Boring Log* merupakan pengujian statis menggunakan mesin bor untuk mengambil sampel tanah dan untuk mengetahui nilai SPT tanah. Nilai SPT tersebut kemudian akan dihitung untuk mendapatkan nilai *cyclic stress ratio* (CSR), *cyclic resistance ratio* (CRR), dan nilai faktor keamanan (FS). Jika nilai FS tersebut kurang dari satu, maka besar potensi likuifaksi dapat terjadi di sekitar area pembangunan Rumah susun Silangkitang.

## 1.2. Rumusan Penelitian

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah Apakah lapisan tanah pada Proyek Proyek Pembangunan Rumah susun

Silangkitang berpotensi mengalami likuifaksi apabila terjadi gempa dengan magnitudo 6.5 SR, 7.5 SR, 8.0 SR?

### 1.3. Maksud dan Tujuan penelitian

Adapun maksud dari penulisan skripsi ini yaitu untuk menganalisis potensi likuifaksi pada Proyek Pembangunan Rumah susun Silangkitang menggunakan data SPT berdasarkan data riwayat gempa yang terjadi di Sumatera Utara dalam rentang waktu 50 tahun kebelakang.

Sedangkan Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah Untuk mengetahui potensial likuifaksi dengan menggunakan kekuatan gempa 6.5 SR, 7.5 SR, 8.0 SR

### 1.4. Batasan Masalah

Berdasarkan latar belakang dan rumusan masalah di atas, perlu ada batasan masalah agar menghindari adanya pelebaran pembahasan maupun masalah pada penelitian ini. Adapun dalam penelitian ini pembahasan akan dibatasi pada :

1. Titik *boring* yang akan diteliti adalah *bore hole* dengan nomor BH.01.
2. Penelitian ini tidak menganalisis penurunan tanah (*settlement*)
3. Nilai percepatan gempa dasar ( $\alpha_{max}$ ) yang digunakan didasarkan pada *website* Desain Spektra Indonesia Puskim PU.
4. Magnitudo gempa yang akan digunakan dalam analisis ini adalah 6.5 SR, 7.5 SR, 8.0SR

### 1.5. Manfaat Penelitian

Manfaat dilakukannya penelitian ini adalah:

1. Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat menambah wawasan pembaca tentang potensi likuifaksi yang terjadi di Indonesia.
2. Menambah pengetahuan mengenai penyebab terjadinya likuifaksi.

3. Mengetahui potensi likuifaksi apabila terjadi gempa bumi dan adanya bahaya yang bisa terjadi pada area tersebut yang ditinjau.
4. Dapat menjadi rujukan atau referensi bagi instansi atau perusahaan terkait yang membutuhkan informasi mengenai potensi likuifaksi di Indonesia



## BAB II LANDASAN TEORI

### 2.1. Peneliti terdahulu

Penulis memanfaatkan penelitian terdahulu sebagai sumber dalam melakukan penelitian untuk menyempurnakan teori dalam mengevaluasi penelitian yang dilakukan. Penelitian sebelumnya sangat penting untuk digunakan sebagai panduan untuk penelitian masa depan karena penelitian semacam ini telah dilakukan sebelumnya. Penelitian terdahulu sebagai sumber dalam melakukan penelitian untuk menyempurnakan teori dalam mengevaluasi penelitian yang dilakukan. Penelitian sebelumnya sangat penting untuk digunakan sebagai panduan untuk penelitian masa depan karena penelitian semacam ini telah dilakukan sebelumnya. Beberapa investigasi sebelumnya menjadi dasar untuk investigasi ini.

1. Penelitian yang dilakukan Eden dkk (2018) yang berjudul Analisa Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data SPT (Studi Kasus proyek Pembangunan Gedung Baru Untirta Sindang Sari) Likuifaksi adalah suatu kejadian dimana tanah kehilangan kekuatan geser karena meningkatnya tegangan air pori akibat terjadinya beban siklik (beban gempa) yang sangat cepat dalam waktu yang singkat. Lokasi pembangunan gedung baru Universitas Sultan Ageng Tirtayasa yang terletak di Desa Sindang Sari Kab. Serang dipilih sebagai lokasi penelitian evaluasi potensi likuifaksi dengan menggunakan metode pendekatan data *Standart Penetration Test* (SPT). Analisa potensi likuifaksi ini bertujuan untuk mengetahui nilai faktor keamanan (FS)

yang diperoleh dengan membandingkan nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dan nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR), likuifaksi akan terjadi untuk FS lebih kecil dari satu. Berdasarkan hasil analisa profil tanah pada lokasi penelitian, tanah tersebut dominan tanah pasir keras dan padat, hal tersebut dapat dibuktikan dengan nilai rata-rata nilai N-SPT yang tinggi sehingga menghasilkan nilai CRR yang besar. Nilai CSR pada lokasi penelitian memiliki nilai cukup besar, hal tersebut diakibatkan oleh nilai percepatan gempa yang diperoleh dari perhitungan NERA memiliki nilai rata-rata lebih dari 0,2 g. Faktor keamanan (FS) pada Lokasi Pembangunan Proyek Kampus Baru Universitas Sultan Ageng Tirtayasa yang terletak di Desa Sindang Sari, Kab. Serang hanya pada titik BH-1 kedalaman 17,5-19,5 m yang terjadi likuifaksi yaitu dengan nilai 0,91 (FS1).

2. Penelitian yang dilakukan Muchammad Fikri Alfaqikh (2018) yang berjudul Analisis Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data SPT dan CPT (Studi Kasus : Binjeita, Sulawesi Utara) Gempa bumi rawan terjadi di Indonesia dikarenakan letak Indonesia yang dilalui oleh 3 lempeng tektonik. Salah satu peristiwa yang disebabkan gempa yaitu likuifaksi, likuifaksi merupakan hilangnya kekuatan lapisan tanah akibat getaran. Dalam kesempatan ini yang menjadi lokasi penelitian yaitu Binjeita yang berada di Sulawesi Utara. Pada penelitian ini dalam menganalisis potensi likuifaksi berdasarkan data *Standard Penetration Test* (SPT) dan *Cone Penetration Test* (CPT). Diperlukan nilai acuan untuk mengetahui apakah berpotensi likuifaksi atau tidak, yaitu dengan nilai

faktor keamanan (FS). Nilai FS didapatkan dari perbandingan nilai *Cyclic Resistance Rasio* (CRR) dengan nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR). Jika nilai FS yang didapatkan melebihi dari 1 maka tidak berpotensi terjadi likuifaksi, begitu juga sebaliknya. Dari penelitian yang telah dilakukan didapatkan bahwa secara keseluruhan dari titik yang diuji memiliki nilai FS kurang dari 1 sehingga dapat disimpulkan bahwa kawasan ini berpotensi terjadi likuifaksi. Selain itu didapatkan juga bahwa yang mempengaruhi nilai faktor keamanan ada 3 yaitu letak muka air tanah, percepatan gempa ( $a_{max}$ ), dan nilai magnitude gempa ( $M_w$ ).

3. Penelitian Yang Dilakukan Jack (2018) Yang Berjudul Analisis Potensi Likuifaksi Tanah Berdasarkan Data *Standart Penetration Test* (SPT) Studi Kasus : Dermaga Bitung, Sulawesi Utara Salah satu dampak yang disebabkan oleh gempa bumi adalah fenomena hilangnya kekuatan lapisan tanah akibat getaran yang disebut dengan likuifaksi. Likuifaksi biasanya terjadi pada tanah pasir yang bersifat lepas (*loose*). Analisis ini bertujuan untuk mengetahui potensi terjadinya likuifaksi pada Dermaga Bitung, Sulawesi Utara. Analisis potensi likuifaksi dilakukan dengan menggunakan metode yang diusulkan oleh Seed dan Idriss (1981), yaitu pertama mengumpulkan data pengujian tanah SPT di lokasi tersebut, serta melihat data percepatan gempa di lokasi tersebut. berdasarkan data tersebut kemudian dihitung nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) yang merupakan nilai perbandingan antara tegangan geser rata-rata yang diakibatkan oleh gempa dengan tegangan vertikal efektif di

setiap lapisan serta nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) yaitu besarnya ketahanan tanah terhadap likuifaksi. Dari nilai-nilai tersebut ditarik satu angka keamanan yang menentukan apakah lapisan tanah yang ditinjau itu berpotensi terjadi likuifaksi atau tidak. Berdasarkan analisis perhitungan yang dilakukan melalui dua titik hasil pengujian tanah yaitu titik bor BH-01 dan titik bor BH-02, dapat disimpulkan bahwa kondisi tanah di Dermaga Bitung, Sulawesi Utara tidak memiliki lapisan tanah yang berpotensi terjadi likuifaksi.

## 2.2. Tanah

Menurut (Das, 1995), tanah didefinisikan sebagai suatu zat atau material yang terdiri atas butiran-butiran (*agregat*) padat ataupun halus yang tidak terikat secara kimiawi satu sama lain dan terbuat dari bahan-bahan organik yang telah lapuk (berpartikel padat) disertai dengan zat cair dan gas yang mengisi kekosongan diantara partikel-partikel padat tersebut. Menurut Bowles (1989) dalam (Purba, 2020), tanah merupakan campuran partikel-partikel yang terdiri dari salah satu atau semua jenis berikut:

1. Kerikil (*gravel*), merupakan partikel batuan dengan ukuran 5 - 150 mm.
2. Berangkal (*boulders*), merupakan potongan batu yang berukuran besar, ukurannya biasanya >250 mm hingga 300 mm. Untuk *boulders* dengan ukuran antara 150 mm – 250 mm disebut dengan kerakal (*cobbles*).
3. Pasir (*sand*), merupakan partikel batuan dengan ukuran 0.075 mm hingga 5 mm, untuk partikel kasar ukurannya berkisar 3 mm – 5 mm sedangkan

partikel halus ukurannya kurang dari 1 mm.

4. Lanau (*silt*), merupakan partikel batuan dengan ukuran 0.002 mm hingga 0.075 mm. Biasanya tanah lanau tersedimentasi di dalam danau atau di dekat pinggir pantai pada muara sungai.

5. Lempung (*clay*), merupakan partikel mineral dengan ukuran  $<0.002$  mm. Partikel ini merupakan sumber utama dari kohesi pada jenis tanah yang kohesif.

6. Koloid (*colloids*), merupakan partikel yang berukuran  $<0.001$  mm.

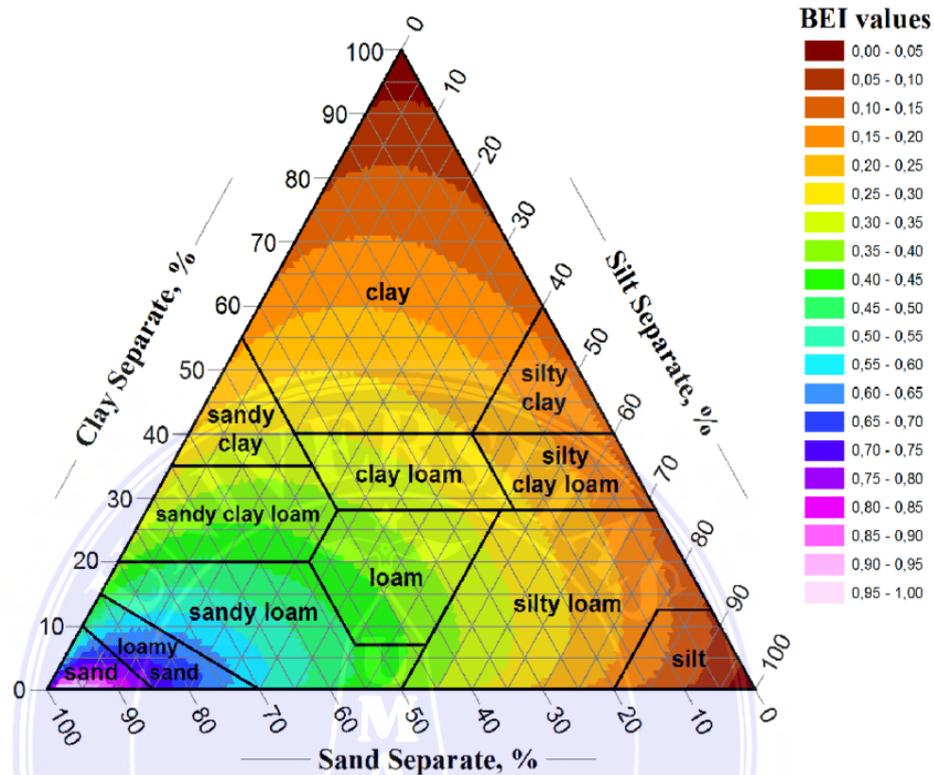
Selain klasifikasi tanah yang dijabarkan menurut Bowles (1989) diatas, terdapat beberapa cara lain yang digunakan dalam mengklasifikasikan jenis-jenis tanah, yaitu sebagai berikut :

### 2.2.1 USDA *Texture Triangle*

USDA (*U.S. Department of Agriculture*) merupakan sebuah badan atau departemen yang bertanggung jawab atas hal-hal yang melibatkan program pertanian, pangan, kehutanan, keamanan pangan, pengelolaan sumber daya alam, program nutrisi dan pertumbuhan ekonomi dengan tujuan untuk menjamin keselamatan makanan, melindungi sumber daya lingkungan kehidupan serta mengakhiri kelaparan di Amerika Serikat.

Seperti yang tertera pada Gambar 1 dibawah ini, tanah partikel diberi nama sesuai dengan diameternya. Diameter dari partikel-partikel ini secara drastis mengubah sifat dari tanah tersebut. Untuk pasir (*sand*) sendiri, terbuat dari partikel-partikel terbesar dengan ada banyak ruang diantaranya. Hal ini menandakan bahwa

jenis tanah pasir tersebut memiliki aerasi yang baik dan dapat mengalirkan air dengan cepat.



Gambar 1. *The Soil Texture Triangle* (Butts, 1994)

Untuk partikel tanah liat (*clay*) jauh lebih kecil dibandingkan partikel pasir, mereka dapat menyatu dengan sangat rapat. Sedangkan untuk jenis tanah lumpur (*silt*) yang memiliki ukuran diantara pasir dan tanah liat hanya dapat mempertahankan air dengan cukup baik dan tidak terlalu terlihat seperti tanah liat. Selain itu, jenis tanah lumpur tidak memiliki banyak udara dan ruang di antara partikel seperti halnya jenis tanah pasir (*sand*).

Perbedaan tekstur pada jenis tanah *sand*, *clay*, dan *silt* juga dapat dibedakan berdasarkan *visualnya* seperti yang terlihat pada Gambar 2 di bawah ini



Gambar 2. Tekstur Tanah *Clay*, *Loam*, *Sand*, dan *Silt* (Gill, 2022)

Tanah berpasir (*sand*) memiliki presentase tanah dengan 18% lempung dan lebih dari 68% partikel pasir. Tanah berpasir merupakan jenis tanah yang paling ringan dari semua tanah, rentan terhadap angin dan mengalirkan air dengan cepat serta dibedakan oleh tekstur berpasir yang disebabkan oleh potongan-potongan batu yang hampir tidak terlihat ukurannya. Tanah berpasir lebih cepat panas pada musim semi dibandingkan dengan tanah liat namun juga memiliki kecenderungan cepat mengering di musim panas dan memiliki nutrisi yang rendah saat terkena hujan.

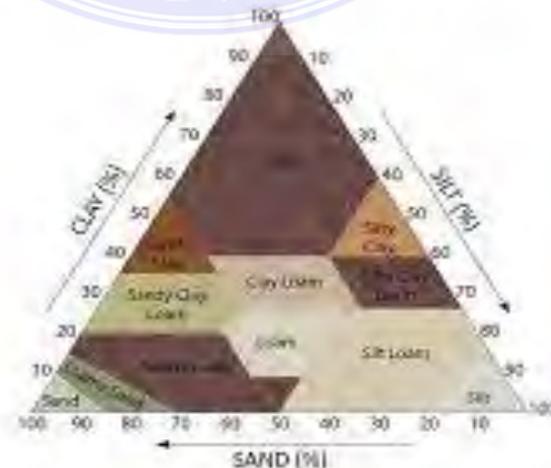
Pasir halus (*fine sand*) memiliki ukuran partikel 0.075 mm hingga 0.425 mm, pasir sedang (*medium sand*) memiliki ukuran 0.425 mm hingga 2 mm, dan pasir kasar (*coarse sand*) berukuran 2 mm hingga 4.75 mm. Tanah berpasir mudah diidentifikasi yaitu dengan menggenggam tanah kering kemudian teteskan sedikit air ke tanah tersebut secara perlahan. Tanah tersebut kemudian diperas hingga terasa seperti dempul yang lembab, jika terasa berpasir dan potongannya jatuh diantara jari jari tangan, maka tanah tersebut merupakan tanah berpasir.

Tanah lanau (*silt*) merupakan zat sedimen lepas yang terdiri dari partikel batuan kecil yang terbentuk secara alami. Tanah lanau merupakan tanah yang secara umum menahan kelembapan dan memiliki nilai kesuburan yang tinggi serta biasanya digunakan dalam bidang pertanian seperti untuk keperluan budidaya

tanaman. Karena kehalusannya, tanah lanau memiliki sedikit ataupun tidak ada plastisitas. Saat basah, tanah lanau akan dengan mudah membentuk bola atau bentuk lainnya.

Tanah liat (*clay*) terdiri dari partikel yang sangat kecil atau kurang dari 0.002 mm dan mengandung 50% tanah liat. Saat basah, tanah liat menjadi lebih berat dan lengket, sedangkan saat mengering, tanah liat akan mengeras dan menjadi seperti beton. Karena ukurannya *mikroskopis*, partikelnya memiliki kecenderungan untuk menggumpal dan hanya sedikit udara yang dapat melewati celah-celah partikelnya.

Tanah lempung (*loam*) terdiri dari 40% pasir (*sand*), 40% lumpur (*silt*) dan 20% tanah liat (*clay*). Jenis tanah ini merupakan jenis tanah yang biasanya digunakan untuk berkebun atau menanam sayuran dikarenakan mengandung banyak nutrisi. Keempat jenis-jenis tanah diatas tidak hanya dikelompokkan menjadi 4 bagian, namun keempat jenis tersebut dapat bercampur satu sama lain sehingga teksturnya berbeda dan tidak mudah dibedakan seperti pada 3 di bawah ini.



Gambar 3. Soil Texture Triangle (Gill M., Soil Texture Triangle, 2022)

Pada Gambar 3 diatas, terlihat perbedaan warna, tekstur hingga ukuran jika keempat jenis tanah tersebut tercampur. Untuk jenis tanah lempung (*loam*) sendiri dapat berwarna abu-abu, coklat, merah hingga kuning.

## 2.2.2 Data N-SPT

*Standart Penetration Test* (SPT) telah memperoleh popularitas dimana-mana sejak tahun 1927 dan telah diterima sebagai uji tanah rutin di lapangan . SPT dapat dilakukan dengan cara yang relatif mudah sehingga tidak membutuhkan keterampilan khusus dari pemakainnya. Metode pengujian tanah dengan SPT termasuk cara yang cukup ekonomis untuk memperoleh informasi mengenai kondisi di bawah permukaan tanah dan diperkirakan 80% dari desain pondasi untuk gedung bertingkat menggunakan cara ini. Karena banyaknya data SPT, korelasi empiris telah banyak memperoleh kemajuan.

Alat uji ini terdiri dari beberapa komponen yang sederhana, mudah ditransportasikan, dipasang dan mudah memeliharanya. Pandangan para ahli masih sama yaitu bahwa alat ini akan terus dipakai untuk penyelidikan tanah rutin karena relative masih ekonomis dan dapat diandalkan (Rahardjo, 2000). *Standart Penetration Test* (SPT) adalah sejenis percobaan dinamis dengan memasukan suatu alat yang dinamakan *split spoon* ke dalam tanah. Dengan percobaan ini akan diperoleh kepadatan relative (*relative density*), sudut geser tanah ( $\theta$ ) berdasarkan nilai jumlah pukulan (N). Perkiraan kapasitas daya dukung pondasi bore pile pada tanah pasir dan silt didasarkan pada data uji lapangan SPT, ditentukan dengan perumusan *Meyerhoff*. Data tanah sangat diperlukan dalam merencanakan kapasitas daya dukung (*bearing capacity*) dari tiang sebelum

pembangunan dimulai.

## 2.3 Gempa Bumi

Gempa bumi merupakan suatu peristiwa dimana dua blok pada bumi saling tumpang tindih melewati satu sama lain. Titik lokasi dimana gempa bumi dimulai di bawah permukaan bumi disebut titik hiposenter. Sedangkan titik lokasi dimana gempa terjadi di atas permukaan bumi disebut episenter.

### 2.3.1. Jenis-Jenis Sesar (Patahan)

Permukaan dimana kedua blok tersebut saling tumpang tindih disebut sesar atau bidang sesar. *Footwall* merupakan bagian patahan yang lebih memanjang sedangkan *hanging wall* merupakan bagian yang bagian bawahnya lebih pendek daripada *footwall*. Terdapat 3 (tiga) jenis patahan atau sesar, yaitu:

#### 1. Patahan Normal (*Normal Fault*)

Merupakan jenis patahan pada Gambar 4 yang arah gerak bloknnya (*footwall*) relatif naik terhadap blok lainnya (*hanging wall*). Sudut kemiringan untuk patahan ini biasanya mencapai 90 derajat

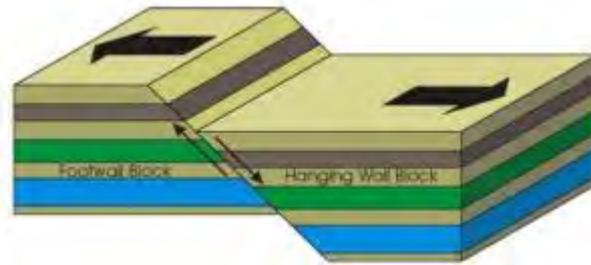


Gambar 4. Normal *Fault* (Baxter, S.J, Delaware, 2000)

#### 2. Reverse *Fault*

Merupakan jenis patahan pada Gambar 5 dengan arah gerak *hanging*

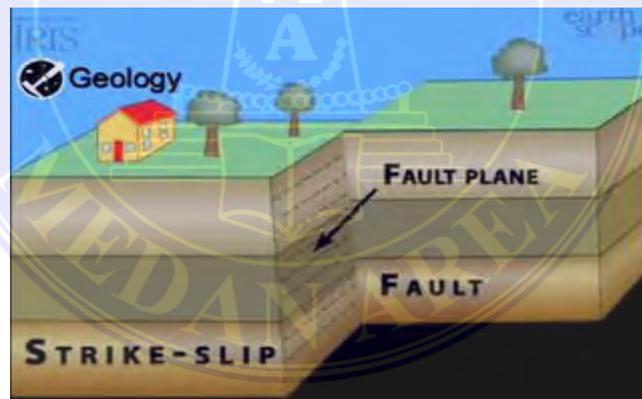
*wall* relatif naik daripada *footwall*. Sudut kemiringan *reverse fault* adalah kurang dari 45 derajat.



Gambar 5. *Reverse Fault* (Baxter, S.J, Delware, 2000)

### 3. *Strike Fault*

Merupakan jenis patahan pada Gambar 6 dengan arah gerak yang relatif mendatar ke arah kiri atau kanan. Penyebab patahan ini adalah karena adanya gaya yang mengenai sebuah batuan dari arah samping.



Gambar 6. *Strike Fault* (Baxter, S.J, Delware, 2000)

## 2.3.2. Jenis-Jenis Gempa Bumi

### 1. Gempa Vulkanik

Merupakan jenis gempa bumi yang disebabkan oleh aktivitas magma atau pelepasan energi yang terjadi pada gunung berapi. Gempa bumi ini dapat terjadi sebelum, selama maupun setelah erupsi dari gunung berapi ataupun ketika terdapat aktivitas pada inti bumi. Dampak yang dapat

ditimbulkan akibat dari gempa bumi vulkanik yaitu adanya kabut asap dan semburan abu vulkanik yang dapat menghalangi sinar matahari gelap hinggamenimbulkan masalah pada pernapasan.

## 2. Gempa Tektonik

Merupakan jenis gempa bumi yang disebabkan oleh pergeseran dua atau lebih lempeng tektonik secara tiba-tiba. Pergeseran pada lempeng tektonik tersebut dinamakan sesargan jenis yang berbeda-beda sesuai dengan arah gerakannya. Biasanya jika terjadi gempa tektonik maka akan terjadi gempa- gempa susulan lainnya tergantung dari kedalaman gempunya Pembagian gempa tektonik berdasarkan kedalaman gempa dapat dilihat tabel

Tabel 1. Jenis Gempa Tektonik Berdasarkan Kedalaman Gempa (Malik, 2013)

Jenis Gempa	Kedalaman
Gempa Bumi Dangkal	0 – 70km
Gempa Bumi Menengah	71 – 300 km
Gempa Bumi Dalam	>300 km

Dampak yang ditimbulkan dari gempa bumi tektonik ini salah satunya ialah tsunami. Selain itu, gempa tektonik juga dapat menyebabkan likuifaksi dan menyebabkan bangunan yang berada di atasnya runtuh seketika.

## 3. Runtuhan

Merupakan jenis gempa bumi yang disebabkan oleh longsornya tanah atau runtuhnya gua-gua yang ada di sekitar area terdampak. Dampak dari

gempabumi ini biasanya tidak sebesar efek gempa bumi tektonik dan hanyamempengaruhi area-area kecil di sekitarnya.

### 2.3.3. Besar Kekuatan Gempa

Terdapat 2 (dua) cara yang biasanya digunakan dalam mengklasifikasikan besar kekuatan gempa, yaitu dengan menggunakan metode MMI (*Modified MMI Intensity*) dan dengan parameter magnitudo (skala *ritcher*).

#### 1. Skala MMI (*Modified Mercalli Intensity*)

Merupakan satuan yang diciptakan oleh seorang ahli vulkanologis yang berasal dari Italia yang bernama Giuseppe Mercalli pada tahun 1902. Dalam metode pembagian skala MMI ini dibagi menjadi 12 jenis yang diambil berdasarkan informasi dari orang-orang yang selamat dari gempa bumi dan kemudian hasilnya dibandingkan untuk mengetahui tingkat kerusakan yang diperoleh akibat dari adanya gempa bumi tersebut. Karena hasilnya dihitung berdasarkan tempat, maka hasilnya tidak sama di setiap tempat. Pembagian pengaruh resiko gempa terhadap skala MMI tabel gambar di bawah ini.

MMI	MAGNITUDE	OBSERVASI SAKSI MATA
<b>I. Instrumental</b>	1-2	Dirasakan oleh sedikit orang; hampir tak terasa.
<b>II. Lemah</b>	2-3	Dirasakan oleh sedikit orang, terutama di lantai teratas bangunan.
<b>III. Sedikit</b>	3-4	Dirasakan didalam ruangan, terutama di lantai teratas bangunan, tetapi mungkin dianggap bukan merupakan gempa.
<b>IV. Menengah</b>	4	Dirasakan oleh banyak orang di dalam ruangan, beberapa orang di luar ruangan. Dirasakan seperti guncangan truk berat yang lewat.
<b>V. Agak Kuat</b>	4-5	Dirasakan oleh hampir semua orang, beberapa orang terbangun. Benda-benda kecil bergerak. Pepohonan dan kolam renang dapat bergetar.
<b>VI. Kuat</b>	5-6	Dirasakan oleh setiap orang. Sulit untuk berdiri. Perabotan rumah berat tergeser, beberapa plafon jatuh. Atap mungkin mengalami kerusakan.
<b>VII. Sangat Kuat</b>	6	Kerusakan ringan - sedang terjadi pada bangunan dng kualitas sedang. Kerusakan serius terjadi pada bangunan dengan kualitas buruk. Beberapa tembok runtuh.
<b>VIII. Merusak</b>	6-7	Kerusakan kecil terjadi pada bangunan yang special. Kerusakan sedang pada bangunan dengan kualitas sedang dan banyak kerusakan pada bangunan dengan kualitas buruk. Beberapa dinding runtuh.
<b>IX. Habis</b>	7	Kerusakan sedang pada bangunan yang special, Bangunan mengalami pergeseran fundasi, terlihat ada retakan di permukaan tanah. Kerusakan parah. Longsoran lereng.
<b>X. Sangat Habis</b>	7-8	Kebanyakan bangunan batu, kolom dan fundasi hancur. Retakan lebar di permukaan. Longsoran lereng. Kerusakan parah
<b>XI. Hampir Total</b>	8	Kerusakan total. Hanya sedikit bangunan utuh. Jembatan hancur. Retakan lebar di permukaan gelombang terlihat di permukaan.
<b>XII. Total</b>	>8	Kerusakan total. Gelombang terlihat di permukaan. Benda terlempar di udara.

Gambar 7. Skala MMI *Modified Mercally Intensity* (Wardhiny, B.K , Kajian Analisis Resiko Bencana Sesar, 2014)

Penggunaan skala MMI jarang digunakan dibandingkan dengan skala richter dikarenakan skala MMI hanya digunakan jika tidak terdapat peralatan seismometer yang dapat mengukur kekuatan gempa di area kejadian.

## 2. Skala Rithcer

Skala Richter atau SR merupakan salah satu metode yang paling sering digunakan dalam mengklasifikasi skala gempa. Satuan ini diciptakan oleh vulkanologis bernama DR. Charles F. Richter yang bekerja sama dengan Beno Gutenberg yang berasal dari *California Institute of Technology* pada tahun 1935. Satuan ini dinyatakan dengan nama *magnitude* dengan simbol Mw. Pembagian besar pengaruh gempa berdasarkan besaran *magnitude* skala richter dapat dilihat pada Tabel 8

No	Intensitas	Akibat Yang Ditimbulkan
1	I	Getaran tidak dapat dirasakan oleh semua orang, kecuali orang yang sangat peka terhadap getaran
2	II	Getaran dirasakan oleh beberapa orang dan benda tergantung bergoyang
3	III	Getaran dirasakan nyata di dalam rumah, terutama rumah berlantai lebih dari satu. Kendaraan yang sedang berhenti agak bergerak
4	IV	Getaran dirasakan oleh banyak orang. Pecah belah dan daun jendela bergetar, serta dinding berbunyi karena pecah
5	V	Getaran dirasakan oleh setiap penduduk. Barang banyak yang berjatuhan, tiang tampak bergoyang, dan bandul jam dinding berhenti
6	VI	Getaran dirasakan oleh setiap penduduk dan pada umumnya terkejut. Meja dan kursi bergerak, serta cerobong asap pabrik menjadi rusak
7	VII	Getaran terasa agak kuat dan setiap orang berlari keluar rumah. Bangunan banyak yang rusak, cerobong asap pabrik pecah, dan getaran yang dapat dirasakan oleh orang yang sedang naik kendaraan
8	VIII	Getaran terasa kuat. Dinding bangunan lepas dari rangka rumah, meja dan kursi terlempar, serta orang yang sedang naik kendaraan menjadi terganggu keseimbangannya
9	IX	Getaran terasa sangat kuat. Kerangka rumah banyak yang lepas, rumah tampak bergeser, dan instalasi air minum banyak yang putus
10	X	Getaran agak dahsyat. Dinding rumah tergeser dari pondasinya, tanah terbelah, rel kereta api tampak melengkung, dan banyak terjadi tanah longsor
11	XI	Getaran terasa dahsyat. Bangunan roboh, jembatan putus, rel kereta api semua melengkung, dan pipa dalam tanah bengkak
12	XII	Getaran sangat dahsyat. Bangunan hancur sama sekali, permukaan tanah bergelombang, dan banyak benda-benda yang terlempar ke udara

Gambar 8. Besaran magnitude (Wardhiny, B.K , Kajian Analisis Resiko Bencana Sesar, 2014)

*Skala Richter* sendiri dibuat untuk memudahkan penentuan megnitudo gempa tanpa melakukan perhitungan matematis yang rumit. *Skala richter*

biasanya digunakan untuk gempa yang berkekuatan kecil atau lokasinya kurang dari 600 km, sehingga penggunaan skala richter ini tidak terlalu akurat untuk perhitungan gempa bumi dengan skala yang besar. *Magnitude* gempa dapat menunjukkan kondisi yang sebenarnya dari besaran gempa yang terjadi. Namun, *magnitude* gempa tidak dapat menunjukkan derajat kerusakan yang disebabkan oleh gempa dikarenakan jika lokasi terjadinya gempa tersebut di tengah samudera, tentunya akan berdampak berbeda jika gempa tersebut terjadi di tengah kota dengan *magnitude* yang sama. Bangunan konstruksi yang berada dekat maupun jauh dari *epicentre* gempa, keduanya sama-sama dapat mempengaruhi struktur bangunan tergantung dari intensitas besar kecilnya getaran.

#### **2.3.4. Riwayat Gempa Bumi di Sumatera Utara**

Sumatera Utara dilewati oleh tiga segmen patahan dan ketiga segmen tersebut merupakan sumber dan jalur perambatan gempa bumi yang berbasis di darat. Segmen patahan tersebut adalah sesar renun, sesar toru, dan sesar ancora sepanjang 475 km. Selin itu, terdapat sesar semangko, yaitu merupakan jenis sesar yang memotong Pulau Sumatera dari ujung barat Aceh hingga Provinsi Lampung. Sesar ini dikenal dengan sesar Sumatera dengan panjang hingga 1.900 kilometer.

Berdasarkan data riwayat gempa pada Tabel 2. di bawah, gempa terbesar yang pernah terjadi di Sumatera Utara terjadi pada tahun 2005 dengan skala 8,6 SR dan baru-baru ini juga terjadi gempa di Kabupaten Nias dengan kekuatan gempa 5,1 SR.

Tabel 2. Data Gempa Bumi di Sumatera Utara dalam 50 Tahun Terakhir (RSA PUPR, 2024)

Tanggal	Bujur	Lintang	Magtudo	Lokasi kejadian
04 Dec 1967	97,3°	BT 5,3°	LU 6,2	Lhokseumawe, Aceh
27 Apr 1987	98,8°	BT 2,1°	LU 6,6	Tarutung, Sumatera Utara
15 Nov 1990	97,457°	BT 3,908°	LU 6,8	Blangkajeren, Aceh
15 Feb 1994	104,302°	BT 4,967°	LS 7,0	Liwa, Lamoung
10 Jul 1995	101,3°	BT 2,1°	LS 7,0	Kec. Sitingau Laut
06 Apr 2000	102,407°	BT 4,734°	LS 7,9	Kota Bengkulu
28 Mar 2005	97,01°	BT 2,07°	LU 8,7	Gunung Sitoli, Sumatera Utara
03 Jul 2007	100,498°	BT 0,536°	LS 6,3	Solok, Sumatera Barat
09 Dec 2007	101,382°	BT 4,517°	LS 8,4	Bengkulu, Seblat
13 Sep 2007	100,964°	BT 2,525°	LS 7,9	Pesisir Selatan, Sumatera Barat
30 Sep 2009	99,961°	BT 0,789°	LS 7,9	Padang Pariaman, Sumatera Barat
12 Jul 2016	96,24°	BT 5,25°	LU 6,5	Pidie Jaya, Aceh

### 2.4.1 Likuifaksi

Menurut Marcuson (1978) dalam (Kusumawardani,), likuifaksi merupakan proses berubahnya sifat-sifat tanah, dari yang bersifat *solid* menjadi *liquid*. Dalam hal ini, *liquid* ini tidak diartikan sebagai air, namun cenderung seperti air. Likuifaksi terjadi pada tanah dengan kondisi jenuh. Biasanya likuifaksi merupakan jenis bencana susulan akibat dari bencana utama, yaitu gempa. *Magnitude* gempa yang besar dan terjadi secara terus-menerus dapat berdampak serius bagi wilayah di sekitarnya atau bahkan hingga ratusan kilometer jauhnya

Likuifaksi ditandai dengan adanya lumpur pasir di permukaan tanah berupa semburan pasir atau *sand boil*, rembesan air melalui retakan pada tanah, dan juga bisa dalam bentuk tenggelamnya struktur bangunan di atas permukaan tanah. Karena tanah tersebut berubah menjadi seperti cairan, maka akan beresiko jika terdapat bangunan yang memiliki tipe tanah pasir, karena jenis tanah pasir sendiri biasanya memiliki rongga yang mudah untuk terkena tarikan.

### 2.4.1. Syarat Terjadinya Likuifaksi

Secara umum, identifikasi awal untuk mengetahui apakah terdapat potensi likuifaksi di suatu wilayah dapat diketahui dari syarat-syarat berikut :

1. Lapisan tanah berupa pasir atau lanau
2. Lapisan tanah jenuh air
3. Muka air tanah (*ground water level*) dangkal  $<10$  m
4. Terjadi gempa ber *magnitude* minimal 5.0 SR.
5. *Peak ground acceleration* lebih dari 0.1 g

Selain syarat-syarat di atas, terdapat beberapa faktor-faktor yang dapat meningkatkan potensi terjadinya likuifaksi seperti gradasi ukuran partikel, kondisi-kondisi drainase, bentuk partikel, lamanya waktu konsolidasi, sejarah tanah hingga beban bangunan.

### 2.4.2. Jenis-Jenis Likuifaksi

Umumnya likuifaksi dapat diartikan sebagai transformasi dari sifat tanah yang semula berbutir kasar dan dalam keadaan padat menjadi cair akibat dari peningkatan tekanan hidrostatis karena adanya beban siklik (gempa) dan non siklik yang tinggi secara terus menerus dan tiba-tiba. Likuifaksi terbagi menjadi 2 (dua) macam kategori, yaitu likuifaksi akibat beban siklik dan non siklik.

1. Likuifaksi Akibat Beban Siklik (*Cyclic Liquefaction*)

*Cyclic liquefaction* merupakan jenis likuifaksi yang disebabkan oleh beban siklik yang terjadi pada tanah. Beban siklik merupakan beban yang terjadi karena gempa. Tegangan geser pada tanah tersebut menjadi lebih kecil daripada daya dukung tanah yang mengakibatkan tanah kehilangan

kekuatannya untuk menopang beban yang terdapat di atasnya. Dalam hal ini, beban siklik atau *cyclic load* merupakan siklus pembebanan yang terjadi secara berulang dan intensitasnya teratur seperti gempa bumi. Besar deformasi yang disebabkan selama pembebanan siklik terjadi tergantung pada kepadatan tanah, besar kecilnya *magnitude* gempa, dan jumlah pembalikan tegangan geser pada struktur bawah.

## 2. Likuifaksi Akibat Beban Non-Siklik (*Flow Liquefaction*)

*Flow liquefaction* merupakan jenis likuifaksi yang terjadi apabila tegangan geser statik lebih besar dari pada tegangan geser tanah yang terlikuifaksi. Kuat geser tanah adalah gaya perlawanan yang dilakukan oleh butir-butir tanah terhadap desakan dan tarikan. Pada kondisi ini tanah akan sepenuhnya kehilangan kuat gesernya sehingga akan menyebabkan bangunan di atasnya menjadi runtuh. *Flow liquefaction* biasanya ditandai dengan adanya pergerakan tanah secara cepat dan dengan skala yang cukup besar.

### 2.4.3 Metode Evaluasi Potensi Likuifaksi

Dalam menganalisis potensi likuifaksi, perlu dilakukan beberapa tahapan evaluasi awal mengenai syarat-syarat terjadinya likuifaksi. Tahapan evaluasi bahaya likuifaksi tersebut yaitu :

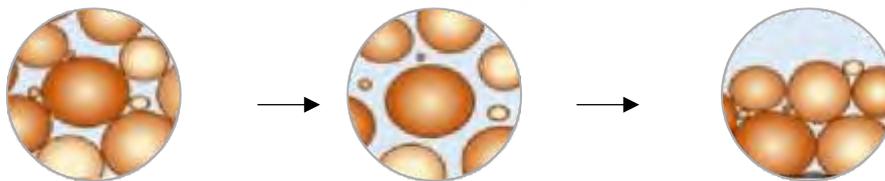
1. Mengevaluasi jenis tanah pada lokasi penelitian tersebut, apakah jenis tanah tersebut merupakan jenis tanah yang termasuk kedalam jenis tanah yang rentan terhadap likuifaksi, yaitu jenis tanah *sand* atau *silts*.
2. Jika syarat pertama terpenuhi, maka dapat dilakukan evaluasi kedua yaitu mengenai penyebab likuifaksi pada lokasi tersebut. Likuifaksi biasanya

disebabkan oleh gempa dengan magnitudo  $> 5.0$  SR. Jika pada riwayat histori gempa pernah terjadi gempa dengan magnitudo  $>5.0$  SR, maka dapat dilakukan analisis potensi likuifaksi menggunakan riwayat magnitudo gempa yang pernah terjadi tersebut.

3. Jika kedua syarat diatas terpenuhi, maka perlu dilakukan evaluasi selanjutnya yaitu mengenai kerugian yang akan didapat ketika likuifaksi tersebut terjadi. Jika likuifaksi terjadi pada area dengan gedung-gedung tinggi atau terjadi di tengah kota maka akan lebih berbahaya karena dapat menimbulkan korban jiwa yang tidak terduga hingga jalan raya.

#### 2.4.4 Proses Terjadinya Likuifaksi

Dalam memahami proses terjadinya likuifaksi, perlu dipahami bahwa suatu endapan tanah terdiri dari partikel-partikel. Jika diperhatikan dengan seksama, partikel-partikel tersebut terletak saling berdekatan dan menopang satu sama lain. Dengan adanya kontak antar partikel tersebut, tanah menjadi memiliki kekuatan untuk memikul beban di atasnya. Kondisi ini akan menguntungkan tanah karena beban yang berada di atas tanah akan dipikul secara bersamaan oleh seluruh partikel.



Gambar 9. Tanah Dalam Keadaan Normal, Likuifaksi dan Setelah Likuifaksi (Perspektif Geologi, 2020)

Pada Gambar 9 terlihat bahwa terdapat banyak rongga di antara partikel tanah yang telah dipenuhi oleh air. Pada kondisi normal, air pada tanah memiliki

tekanan air pori yang relatif rendah. Saat menerima tekanan dari getaran secara tiba-tiba, partikel air tersebut akan terdesak keluar hingga ia akan menaikkan tekanannya. Namun pada saat terjadi gempa, karena getaran gempa yang berlangsung secara berulang-ulang dan terjadi secara cepat, air tersebut kemudian tidak memiliki cukup waktu untuk keluar dari tanah melalui rongga-rongga tanah, sehingga kemudian air tersebut mendorong partikel tanah hingga menjadi menjauh.

#### 2.4.5 Dampak Terjadinya Likuifaksi

Menurut (Idriss, 1982), terdapat 8 (delapan) dampak atau bahaya umum yang terjadi akibat terjadinya bencana likuifaksi. Dampak-dampak tersebut antara lain :

##### 1. *Sand Boils*

*Sand boils* dapat diartikan juga dengan semburan pasir. *Sand boils* merupakan fenomena dimana bagian bawah tanah mendapatkan tekanan hingga menembus lapisan berpasir. Air tanah tersebut kemudian keluar dan akan terlihat seperti mendidih yang berbentuk kerucut dan bercampur dengan pasir.

##### 2. *Flow Failures*

Biasanya terjadi pada talud dengan kemiringan lereng yang curam. Aliran pasir kemudian akan bergerak dari posisi talud dengan elevasi tinggi ke elevasi yang lebih rendah. *Flow failures* dapat terjadi pada talud dengan kemiringan lebih dari  $3^{\circ}$  dan biasanya juga dapat disebut juga dengan *landslide* atau longsor.

##### 3. *Lateral Spreads*

Merupakan gerakan tanah yang terjadi akibat dari respon tanah terhadap

kombinasi gravitasi dan inersia yang ditimbulkan akibat gempa. *Lateral spreads* biasanya terjadi pada lereng yang landai dengan kemiringan antara  $0.3$  hingga  $3^\circ$ . Pada kondisi ini, tanah bergerak menuju permukaan bebas seperti aliran sungai. Pergerakan dari permukaan tanah tersebut dapat menyebabkan kerusakan pada struktur bangunan bagian bawah.

#### 4. *Ground Oscillation*

Merupakan peristiwa dimana likuifaksi terjadi pada deposit tanah yang berada di bawah suatu area yang mengalami pergerakan. Biasanya berupa suatu massa tanah yang berupa blok utuh di bawah permukaan tanah. Jika tanah di bawahnya mengalami likuifaksi sedangkan lapisan tanah di atasnya tidak, maka akan terjadi pergerakan bolak-balik dan naik turun pada lapisan tanah di atasnya sebagai akibat dari lapisan bawahnya yang telah mencair. Kondisi ini akan menyebabkan munculnya retakan-retakan besar dan akan terjadi tabrakan antar *section* satu dengan yang lainnya. tidak, maka akan terjadi pergerakan bolak-balik dan naik turun pada lapisan tanah di atasnya sebagai akibat dari lapisan bawahnya yang telah mencair. Kondisi ini akan menyebabkan munculnya retakan-retakan besar dan akan terjadi tabrakan antar *section* satu dengan yang lainnya.

#### 5. *Loss of Bearing Capacity*

Ketika tanah mengalami likuifaksi, tanah tersebut akan kehilangan kekuatannya dalam menahan suatu beban struktur yang ada di atasnya sehingga sistem struktur bangunan tersebut akan terbangun tidak dengan struktur pondasi yang kuat. Pada kondisi ini bangunan yang berada dalam tanah seperti *basement* hingga jaringan pipa bawah tanah pun dapat

terangkat keluar hingga muncul ke permukaan atau biasa disebut juga dengan istilah *buoyant rise of buried structure*.

#### 6. *Buoyant Rise of Buried Structure*

Pada kondisi tanah mencair, tangka, pipa, kayu hingga bangunan di atasnya akan terkubur ke dalam tanah. Kondisi kerusakan ini dapat dikatakan hampir mirip dengan *loss of bearing capacity*.

### 2.5 **Histori Kasus Likufaksi di Indonesia**

Sejarah mencatat bahwa likuifaksi di Indonesia pernah terjadi di Flores (1992), Maumere (1992), Yogyakarta (2006) dan Palu (2018). Namun dikarenakan keterbatasan informasi yang beredar di internet, hanya terdapat beberapa detail informasi lengkap mengenai kronologi kejadian likuifaksi yang terjadi di Indonesia.

#### 1. Likuifaksi di Jogjakarta Tahun 2006

Wilayah Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta dan sekitarnya terletak pada jalur subduksi lempeng, yaitu Lempeng Indo-Australia yang menyusup di bawah Lempeng Eurasia. Dengan demikian, wilayah DIY termasuk kedalam wilayah yang rawan gempa bumi. Gempa bumi dengan skala 6.2 SR terjadi di Jogjakarta pada hari Sabtu, tanggal 27 Mei 2006. Gempa bumi tersebut kemudian menimbulkan bencana geologi seperti longsor, rekahan tanah dan likuifaksi pada area kurang lebih yang berarah timur laut – barat daya yang sejajar dengan patahan Opak.

#### 2. Likuifaksi di Palu Tahun 2018

Wilayah Palu merupakan wilayah kota yang berada di ujung teluk dekat pesisir yang menyempit ke daratan. Berdasarkan penelitian sebelumnya,

wilayah Palu memiliki tanah dengan kontur yang mudah terjadi likuifaksi dikarenakan ketebalan sedimennya mencapai 170 meter dan menjadikan wilayah tersebut tidak aman untuk dijadikan tempat tinggal. Gempa bumi dengan *magnitude* 7.4 SR mengguncang Kota Palu dan Donggala pada tanggal 28 September 2018. Pusat gempa berada di kedalaman 10 km dengan jarak 27 km sebelah timur laut Donggala. Dengan *magnitude* tersebut, getaran yang ada akan sangat besar sehingga menyebabkan tsunami dan likuifaksi di wilayah tersebut. Untuk bencana likufaksinya sendiri terjadi di daerah Sigi, Petabo, dan kawasan Palu Selatan.



Gambar 10. Jarak Kab. Donggala ke Kab. Sigi (rsa.ciptakarya.pu.go.id, 2024)

Berdasarkan Gambar 8 di atas, jarak dari pusat gempa Donggala ke Kab. Sigi mencapai  $\pm 100$  kilometer yang berarti meskipun pusat gempa berada jauh dari kawasan tersebut tetap memungkinkan adanya potensi bencana likuifaksi.

### 3. Likuifaksi Aceh Pidie Jaya Tahun 2016

Pada tanggal 07 Desember 2016, Provinsi Aceh tepatnya di kawasan Kabupaten Pidie Jaya diguncang gempa dengan *magnitude* 6.5 SR yang berpusat di daratan. Gempa tersebut mengakibatkan jatuhnya korban jiwa sedikitnya 104 orang meninggal dunia. Selain itu, gempa tersebut juga

menyebabkan adanya bencana susulan yaitu likuifaksi. Likuifaksi terjadi di arah utara hingga selatan, yaitu ditandai dengan munculnya retakan pada jalan serta munculnya pasir halus berwarna abu-abu kehijauan diantara celah-celah retakan tersebut. Retakan tersebut menyebabkan hancurnya bangunan-bangunan yang ada di sekitarnya. Likuifaksi tersebut juga menunjukkan adanya gunung pasir (*sand boil*).

Di Pulau Sumatera sendiri pernah beberapa kali terjadi likuifaksi dengan rata-rata gempa diatas 5.0 SR. Berikut data Tabel histori likuifaksi yang terjadi di Pulau Sumatera. Berdasarkan Tabel 3 di dapat dilihat bahwa Sumatera Utara memiliki

Tabel 3. Histori Kejadian Likuifaksi di Pulau Sumatera (Badan Geologi ESDM, Atlas Zona Likuefaksi Indonesia, 2019)

	Kejadian LikuifaksiBujur				Magnitudo Lintang	Lokasi
04 Dec 1967	97,3°	BT	5,3°	LU	6,2	Lhokseumawe, Aceh
27 Apr 1987	98,8°	BT	2,1°	LU	6,6	Tarutung, Sumatera Utara
15 Nov 1990	97,457°	BT	3,908°	LU	6,8	Blangkajeren, Aceh
15 Feb 1994	104,302°	BT	4,967°	LS	7,0	Liwa, Lamoung
10 Jul 1995	101,3°	BT	2,1°	LS	7,0	Kec. Sitinjau Laut
06 Apr 2000	102,407°	BT	4,734°	LS	7,9	Kota Bengkulu
28 Mar 2005	97,01°	BT	2,07°	LU	8,7	Gunung Sitoli, Sumatera Utara
03 Jul 2007	100,498°	BT	0,536°	LS	6,3	Solok, Sumatera Barat
09 Dec 2007	101,382°	BT	4,517°	LS	8,4	Bengkulu, Seblat
13 Sep 2007	100,964°	BT	2,525°	LS	7,9	Pesisir Selatan, Sumatera Barat
30 Sep 2009	99,961°	BT	0,789°	LS	7,9	Padang Pariaman, Sumatera Barat
12 Jul 2016	96,24°	BT	5,25°	LU	6,5	Pidie Jaya, Aceh

2 kali histori kejadian likuifaksi pada tahun 1987 dan 2005. Lokasi yang pernah mengalami likuifaksi, kedepannya berkemungkinan akan mengalami likuifaksi kembali. Maka dari itu, diperlukan penanganan seperti injeksi semen yang bertujuan untuk memperkuat kepadatan pasir lepas menjadi pasir padat.

## 2.6 Tegangan Tanah

Tegangan pada lapisan tanah yang diakibatkan oleh adanya beban dari tanah yang terdapat di atasnya tanpa memperhitungkan tegangan air pori yang diakibatkan oleh air ( $\mu$ ) disebut tegangan vertikal total. Tegangan vertikal total dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\sigma_v = \sum (\gamma \cdot z) \dots \dots \dots (1)$$

Dimana :

- $\sigma_v$  = Tegangan vertikal total tanah (kN/m<sup>2</sup>)
- $\gamma$  = Berat isi lapisan tanah (kN/m<sup>2</sup>)
- $z$  = Kedalaman tanah yang ditinjau (m)

Jika tanah dibebani (dan karena air) disebut *incompressible*, maka beban pertama yang diterima air dan timbul adalah tekanan air pori. Tekanan air pori dapat dihitung dengan rumus berikut :

$$\mu = \gamma_w \cdot z \dots \dots \dots (2)$$

Dimana :

- $\mu$  = Tekanan air pori tanah (kN/m<sup>2</sup>)
- $\gamma_w$  = Berat volume air = 9.81 (kN/m<sup>2</sup>)
- $z$  = Kedalaman tanah yang ditinjau (m)

Air yang bertekanan kemudian akan mengalir keluar sehingga tekanan air pori akan berkurang. Setelah tekanan air pori hilang, maka seluruh beban akan dipikul oleh bidang kontak antar butiran tanah yang disebut tegangan vertikal efektif. Tegangan vertikal efektif tanah dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$\sigma'v = \sigma v - \mu \dots\dots\dots(3)$$

Dimana :

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

$\sigma v$  = Tegangan vertikal total tanah (kN/m<sup>2</sup>)

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

Perhitungan manual di atas dapat digunakan jika terdapat data hasil pengujian *sieve analysis*, namun jika tidak terdapat data hasil pengujian *sieve anaylis*, maka perhitungan nilai tegangan tanah dapat menggunakan nilai korelasi pada Tabel 4 di bawah ini.

Tabel 4 .Nilai Korelasi Parameter Tanah dengan N-SPT untuk Jenis Tanah Pasir (*Sand*) dan Lempung (*Clays*) (Kouretzis, *Fundamentals of Foundation Engineering and Their Applications*, 2018)

Soil Nilai SPT Sand	Parameter	Relative density Dr %	Nilai Koreksi Y(Kn/M2)	deq
0 - 3	<i>Very Loose</i>	0	11.0 - 15.7	25 - 30
4 - 9	<i>Loose</i>	15	14.1 - 18.1	27 - 32
10 - 29	<i>Medium</i>	35	17.3 - 20.4	30 - 35
30 - 49	<i>Dense</i>	65	18.8 - 22.0	35 - 40
> 50	<i>Very Dense</i>	85	20.4 - 23.6	38 - 43

Clay	Parameter	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	S <sub>u</sub> (Kpa)
0 - 1	<i>Very Soft</i>	15,7-18,8	0
2 - 3	<i>Soft</i>		12
4 - 7	<i>Medium</i>	17,3-20,4	25
8 - 15	<i>Stift</i>		50
16 - 31	<i>Very stift</i>	18,8-22,0	200
32	<i>Hard</i>		

Pada Tabel nilai korelasi diatas, untuk mendapatkan nilai berat isi tanah ( $\gamma$ ) dapat digunakan rumus interpolasi sesuai dengan jenis tanah pasir (*sand*) maupun lempung (*clay*) dan nilai N-SPT yang didapatkan dari hasil pengujian *soil investigation* SPT sebagai berikut :

Dimana :

$\gamma$  = Berat isi tanah ( $\text{kN/m}^3$ )

$y$  = Selisih nilai N-SPT  $\longrightarrow$  Batas atas – batas bawah

$x$  = Selisih nilai N-SPT  $\longrightarrow$  Nilai N-SPT pengujian-batas

$z$  = Selisih nilai  $\gamma$   $\longrightarrow$   $\gamma_{\text{atas}} - \gamma_{\text{bawah}}$

$\gamma_1$  = Batas bawah nilai  $\gamma$

### 2.5.2 Nilai N-SPT, $(N_1)_{60}$ dan $(N_1)_{60cs}$

Nilai N-SPT merupakan nilai yang diperoleh berdasarkan pengujian *boring log* atau biasa disebut *Standart Penetration Test*. *Standart Penetration Test* merupakan metode uji tanah *in-situ* dan dilaksanakan bersamaan dengan proses pengeboran untuk mengetahui sifat perlawanan tanah serta pengambilan sampel tanah *undisturbed* dengan teknik penumbukan.

Menurut Youd dan Idriss (2001) dan Cetin dll (2004) dalam (Lonteng et al., 2013), koreksi-koreksi yang diperlukan untuk mendapatkan nilai  $(N_1)_{60}$  yaitu :

$$(N_1)_{60} = N_m C_N C_E C_B C_R C_S \dots \dots \dots (5)$$

Dimana :

$(N_1)_{60}$  = Nilai SPT yang dikoreksi terhadap pengaruh efisiensi tenaga 60%

$N_m$  = Nilai N-SPT yang diperoleh dari pengujian lapangan

$C_N$  = Faktor normalisasi  $N_m$  terhadap tegangan *overburden* pada umumnya

$C_E$  = Koreksi rasio energi *hammer*

$C_B$  = Koreksi untuk diameter lubang bor

$C_R$  = Faktor koreksi dari panjang batang

$C_S$  = Koreksi untuk sampel

Dimana setelah didapatkan nilai  $N_m$  yang telah dikoreksi 60% efisiensi energi, maka akan dihitung pula nilai koreksi tegangan *overburden* dikarenakan adanya peningkatan nilai N-SPT. Faktor normalisasi koreksi dihitung dengan persamaan sebagai berikut :

$$C_N = \frac{2,2}{(1,2 + \frac{\sigma'v}{Pa})} \dots\dots\dots(6)$$

Dimana :

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

$pa$  = Tegangan atmosfer 100 kPa (1 atm)

Dimana nilai  $C_N$  tidak boleh melebihi 1.8, sedangkan untuk nilai faktor koreksi lain dapat dilihat berdasarkan Tabel berikut :

Tabel 5. Faktor Koreksi Uji SPT (Skempton (BSN, Cara Uji Penetrasi Lapangan dengan SPT SNI 4153:2008, 2008)

Faktor	Jenis Alat	Parameter	Koreksi
Tegangan Vertikal	$C_N$	$2,2 / (1,2 + (\sigma'v/pa))$	Tegangan Vertikal
Tegangan Vertikal	$C_N$	$C_N < 1,7$	Tegangan Vertikal
Rasio Tenaga Palu Donat ( <i>Donut Hammer</i> )	$C_E$	0,5 - 1,0	Rasio Tenaga Palu Donat ( <i>Donut Hammer</i> )
Diameter Bor	65 s/d 115 mm	$C_B$	1,0
Diameter Bor	150 mm	$C_B$	1,05
Diameter Bor	200 mm	$C_B$	1,15
Panjang Batang	< 3 m	$C_R$	0,75
Panjang Batang	3 s/d 4 m	$C_R$	0,8
Panjang Batang	4 s/d 6 m	$C_R$	0,85
Panjang Batang	6 s/d 10 m	$C_R$	0,95
Panjang Batang	10 s/d 30 m	$C_R$	1,0
Pengambilan Contoh	Tabung Standar	$C_S$	1,0

Berdasarkan Tabel 5 di atas, harus diketahui terlebih dahulu spesifikasi dari alat bor untuk mengetahui nilai  $C_E$ ,  $C_B$ ,  $C_R$ , dan  $C_S$ . Dalam menentukan nilai  $(N_1)_{60cs}$ , perlu diketahui juga nilai *finest content* (FC) yang merupakan nilai % lolos

saringan No. 200. Faktor koreksi  $(N_1)_{60cs}$  penyetaraan nilai dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta \cdot (N_1)_{60} \dots \dots \dots (7)$$

$$(N_1)_{60cs} = (N_1)_{60} + \Delta(N_1)_{60} \dots \dots \dots (8)$$

Persamaan (7) dipakai ketika tanah tersebut merupakan jenis tanah dimana lempungnya dominan, sedangkan persamaan (8) dan (9) dipakai ketika jenis tanah tersebut merupakan jenis tanah pasir atau lanaunya dominan.

Dimana nilai koefisien  $\alpha$  dan  $\beta$  dipengaruhi oleh presentase *finer content* (FC). Koefisien tersebut didapatkan dari persamaan sebagai berikut :

$$\alpha = 0, \text{ dan } \beta = 1,0 \dots \dots \dots \text{apabila } FC \leq 5\%$$

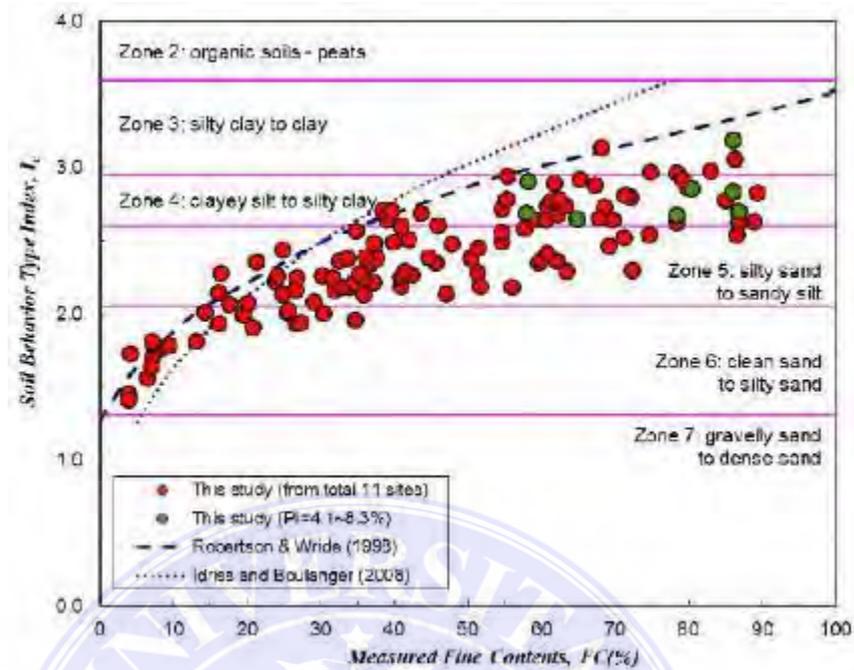
$$\alpha = \exp \left[ 1,76 - \left( \frac{190}{FC^2} \right) \right] \dots \dots \dots \text{apabila } 5\% < FC < 35\%$$

$$\beta = \left[ 0,99 + \left( \frac{FC^{1,5}}{1000} \right) \right] \dots \dots \dots \text{apabila } 5\% < FC < 35\%$$

$$\alpha = 5,0 \dots \dots \dots \text{apabila } FC \geq 35\%$$

$$\beta = 1,2 \dots \dots \dots \text{apabila } FC \geq 35\%$$

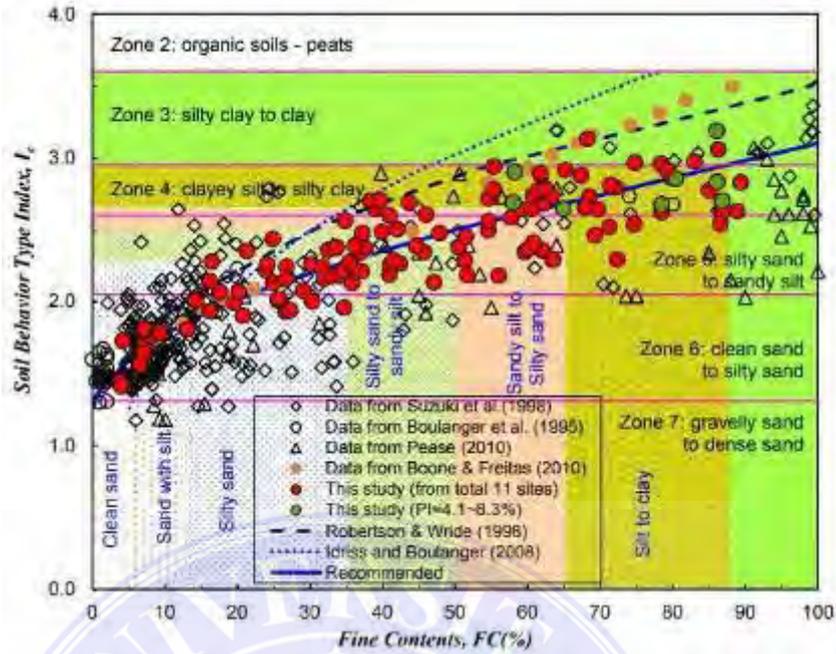
Nilai *finer content* dapat diketahui dari pengujian *sieve analysis* dengan melihat nilai % lolos saringan No. 200. Namun jika tidak ada data pengujian tersebut dapat digunakan nilai korelasi *measured finer content* (FC %) yang dikemukakan oleh (Robertson, 1990) dalam (Yi, 2014) pada Gambar 11 di bawah.



Gambar 11 Grafik Korelasi *Measured Fines Content* dengan *Soil Behaviour Type Index* (Yi, F., *Estimating Soil Fines Contents From CPT Data*, 2014)

Dalam menghasilkan nilai korelasi yang lebih representatif, data tersebut dikumpulkan dan dimanfaatkan sebanyak 133 sampel kandungan kemudian dibagi kembali menjadi 7 bagian atau zona berdasarkan jenis-jenis tanah yang ada pada area tersebut. Pada semua penelitian tersebut, secara geologis terdiri dari endapan aluvial berumur sangat muda dan tanah dengan plastisitas rendah yang mencakup jenis tanah *clean sand*.

Selain itu, peneliti (Yi, 2014) juga mengumpulkan data yang dikumpulkan dari total 11 lokasi proyek dan berbagai lokasi penelitian yang diterbitkan. Persamaan pada Gambar 11 menunjukkan hubungan antara *fines content*, zona *soil behaviour index* dan jenis tanah yang dibagi menjadi 7 bagian berdasarkan klasifikasi USCS.



Gambar 12 Hubungan antara *Measured Fines Content (%)*, *Soil Behaviour Index (Ic)* dan Klasifikasi Tanah USCS (Yi, F., *Estimating Soil Fines Contents From CPT Data*, 2014)

Berdasarkan Gambar grafik hubungan di atas, dapat dilakukan pembacaan Tabel sebagai berikut :

Tabel 6. Tabel Nilai Korelasi Hubungan antara *Soil Behaviour Type Index (Ic)*, *Fines Content (%)* dan Jenis Tanah Klasifikasi USC (CPT Data, 2014)

<i>Soil Behaviour Type Index, Ic</i>	<i>Zone</i>	<i>USCS Classification</i>	<i>Fines Content (%)</i>
$Ic < 1.31$	7	<i>Gravelly sand to dense sand</i>	0
$1.31 \leq Ic < 1.59$	6c	<i>Clean sand</i>	0 - 5.0
$1.59 \leq Ic < 1.83$	6b	<i>Sandy with silt</i>	5.0 - 12.0
$1.83 \leq Ic < 2.276$	6a - 5c	<i>Silty sand</i>	12.0 - 35.0
$2.276 \leq Ic < 2.50$	5b	<i>Silty sand to sandy silt</i>	35.0 - 50.0
$2.50 \leq Ic < 2.68$	5a - 4b	<i>Sandy silt to silty sand</i>	50.0 - 65.0

Tabel 6 di atas dapat digunakan dengan mengkorelasikan jenis tanah sesuai dengan klasifikasi USCS yang terdapat pada data hasil pengujian *boring log* dengan nilai *fines content* yang ada pada Tabel tanpa harus menghitung nilai *Ic* terlebih dahulu dikarenakan patokan untuk nilai *fines content* yaitu hanya 5%, 15% dan 35%.

### 2.6.1 Percepatan Gempa Dasar ( $\alpha_{max}$ )

Percepatan gempa dasar atau *Peak Ground Accerleration* (PGA) atau bisa dilambangkan dengan  $\alpha_{max}$  merupakan percepatan puncak muka tanah akibat dari getaran gempa bumi yang terjadi. Perhitungan PGA untuk wilayah Indonesia dapat menggunakan data literatur yang sudah ada sebelumnya seperti Peta Zona Gempa Indonesia (SNI 03-1726-2002), SNI 2012, perhitungan fungsi atenuase (tergantung pada kondisi alam suatu area), data puskim, dan *software* NERA.

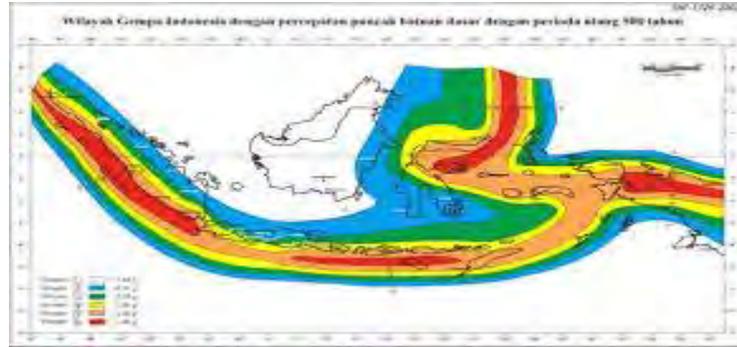
Pada penelitian ini, penulis menggunakan data Aplikasi Spektrum Respons Desain Indonesia 2021 Puskim PU pada Gambar 13 yang dikembangkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) bersama dengan Institut Teknologi Bandung (ITB) dalam menentukan percepatan gempa ( $\alpha_{max}$ ) berdasarkan koordinat lokasi.



Gambar 13. Halaman Puskim Desain Spektra Indonesia  
(<https://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/2024>)

Pada halaman depan puskim akan ditemui kolom pengisian koordinat lintang dan bujur. Untuk mendapatkan nilai PGA, kolom lintang dan bujur harus diisi sesuai dengan koordinat lokasi tanah yang akan diteliti. Koordinat lokasi yang akan diteliti dapat dicari melalui *google maps*. Selain itu, penulis juga menggunakan referensi nilai percepatan gempa dasar berdasarkan SNI 03-1726-

2002.



Gambar 14. Percepatan Gempa Dasar SNI 03-1726-2002 (BSN, SNI 03-1726-2002 Standar Perencanaan Ketahanan Gempa, 2002)

Berdasarkan Gambar 14 yaitu SNI 03-1726-2002, wilayah Tapanuli Utara termasuk kedalam wilayah 3 dengan nilai percepatan gempa dasar yaitu 0.326 g.

### 2.6.2 Stress Reduction Factor ( $r_d$ )

Secara umum, *stress reduction ractor* atau SRF ( $r_d$ ) menggambarkan hubungan antara tegangan dan kekuatan batuan di sekitar bawah permukaan tanah. Nilai SRF juga merupakan nilai yang dapat mengurangi tegangan di dalam tanah. Semakin jauh ke dalam tanah, maka nilai SRF akan semakin kecil. Nilai SRF berbeda pada setiap kedalaman sehingga harus dihitung pada tiap-tiap kedalaman.

Perhitungan *stress reduction factor* ( $r_d$ ) menurut (*Seed and Idriss, 1971*) harus menunjukkan fungsi dari kedalaman dan juga *earthquake magnitude* ( $M_w$ ) referensi. SFR dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$r_d = 1 - (0.00765) \cdot (z) \quad \text{untuk } z < 9.15 \text{ m} \dots \dots \dots (10)$$

$$r_d = 1.174 - (0.0267) \cdot (z) \quad \text{untuk } 9.15 \text{ m} < z < 23 \text{ m} \dots \dots \dots (11)$$

$$r_d = 0.744 - (0.008) \cdot (z) \quad \text{untuk } 23 \text{ m} < z < 30 \text{ m} \dots \dots \dots (12)$$

Persamaan (10), (11) dan (12) dapat digunakan untuk kedalaman tanah < 30 m, sedangkan untuk kedalaman > 30 m digunakan rumus berikut :

$$R_d = 0.5 \text{ untuk } z > 30 \text{ m} \dots\dots\dots (13)$$

Dimana :

$$Z = \text{Kedalaman tanah (m)}$$

Pada Persamaan (10) dan Persamaan (13), untuk nilai magnitudo gempa pada perhitungan SRF, digunakan magnitudo gempa referensi berdasarkan NCEER, yaitu 7.5 SR. Nilai  $r_d$  akan mempengaruhi besaran nilai perhitungan CSR karena semakin kecil nilai  $r_d$  maka semakin kecil pula nilai CSR yang berarti semakin kecil pula potensi terjadinya likuifaksi.

### 2.6.3 Cyclic Stress Ratio (CSR)

CSR merupakan nilai perbandingan antara tegangan geser rata-rata yang disebabkan oleh adanya gempa dengan tegangan vertikal efektif di tiap-tiap lapisan tanah. Perhitungan nilai CSR pada lapisan tanah dipengaruhi oleh nilai percepatan gempa yang telah didapatkan sebelumnya. Nilai *cyclic stress ratio* dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$CSR = 0.65 \cdot \frac{\alpha_{max}}{g} + \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \cdot r_d \dots\dots\dots (14)$$

Dimana :

$$CSR = \text{Tegangan siklik yang menyebabkan likuifaksi}$$

$$\alpha_{max} = \text{Percepatan gempa dasar}$$

$$g = \text{Percepatan gravitasi bumi} = 9.81$$

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

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

$r_d$  = Faktor reduksi terhadap tegangan

Untuk nilai  $\alpha_{max}$ , digunakan 2 referensi berbeda, yaitu menggunakan referensi PuskimPU dan SNI 03-1726-2002.

## 2.7 *Cyclic Resistance Ratio (CRR)*

CRR merupakan salah satu parameter fundamental dalam menghitung potensi likuifaksi. CRR sendiri adalah besaran nilai ketahanan lapisan tanah terhadap tegangan CSR atau likuifaksi. Sebelum menghitung nilai CRR, perlu dihitung terlebih dahulu nilai faktor skala gempa dan nilai faktor koreksi *overburden*. *Magnitude Scaling Factors (MSF)* merupakan faktor skala gempa yang dikemukakan oleh Seed dan Idriss pada tahun 1982 dikarenakan keterbatasan materi untuk membedakan kondisi tanah yang terkena likuifaksi dan tidak pada perhitungan CRR untuk gempa dengan magnitudo selain 7.5 SR. Nilai MSF dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$MSF = 6,9 \cdot \exp\left(\frac{-M_w}{4}\right) - 0,058 \leq 1,8 \dots \dots \dots (15)$$

Dimana :

MSF= *Magnitude scaling factors*

$M_w$  = Magnitudo gempa

Sedangkan untuk nilai faktor koreksi *overburden* dapat dihitung dengan

persamaan berikut :

$$K_{\sigma} = \left(\frac{\sigma_v}{p_a}\right)^f \dots \dots \dots (16)$$

Dimana :

$K\sigma$  = Faktor koreksi *overburden*

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

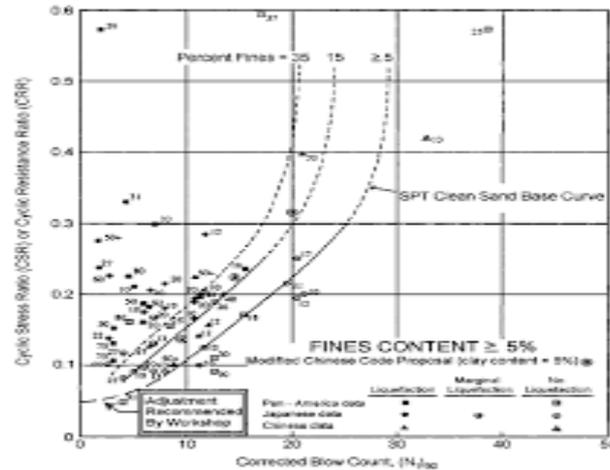
$P_a$  = Tegangan atmosfer 100 kPa(1 atm)

$F$  = Faktor kerapatan relatif tanah

$(N_1)_{60cs}$  = Nilai SPT yang dikoreksi terhadap pengaruh *finer content*

Perhitungan CRR didasarkan pada metode NCEER/NSF yang mendeskripsikan ketahanan tanah terhadap likuifaksi pada tahun 1998 atau dengan kata lain mengenai analisa potensi likuifaksi. Berdasarkan metode tersebut, didapatkan metode evaluasi nilai CRR dengan menggunakan nilai hasil SPT yang telah diuji selama bertahun-tahun sehingga didapatkan kurva hubungan antara *cyclic resistance ratio* (CRR) dengan N-spt yang telah terkoreksi dan hanya berlaku pada perhitungan dengan magnitudo 7.5 SR.

NCEER atau *National Center for Earthquake Engineer Research* merupakan sebuah workshop yang berisi 31 orang eksperts dan *observer* yang pertama kali dilakukan pada tahun 1985 dengan tujuan untuk membuat sebuah laporan mengenai pengetahuan tentang likuifaksi dan bahayanya. Hingga saat ini, laporan tersebut telah menjadi standar atau referensi dan digunakan secara umum dalam hal penelitian tentang bahaya likuifaksi



Gambar 15. Kurva Hubungan antara N-SPT *Clean Sand* dengan Gempa Bumi Magnitudo 7.5 SR (*Soil Liquefaction During Earthquakes 2<sup>nd</sup> Edition, 2008*)

Pada Gambar 15 terlihat bahwa kurva memisahkan data terkait area yang terdampak likuifaksi dengan lokasi yang tidak terdampak likuifaksi. Kurva tersebut dikembangkan untuk jenis tanah dengan FC 5% atau kurang, 15% dan 35%. Presentase kriteria tersebut merupakan dasar dalam perhitungan potensi likufaksi.

Berdasarkan metode tersebut, didapatkan metode evaluasi nilai CRR dengan menggunakan nilai hasil SPT yang telah diuji selama bertahun-tahun sehingga didapatkan kurva hubungan antara *cyclic resistance ratio* (CRR) dengan N-SPT yang telah terkoreksi dan hanya berlaku pada perhitungan dengan magnitudo 7.5 SR.

Pada skala gempa yang lebih kecil atau lebih besar dari 7.5 SR, maka rumus CRR yang digunakan yaitu :

$$CRR_{M_w} = CRR_{7.5} \cdot K_{\sigma} \cdot MSF \dots \dots \dots (18)$$

Dimana :

CRR = Kemampuan tanah untuk menahan likuifaksi

$CRR_{M_w}$  = *Cyclic resistance ratio* pada skala tertentu

$CRR_{7.5}$  = *Cyclic resistance ratio* pada skala 7.5 SR

### 2.7.1 Factor of Safety (FS)

Merupakan nilai untuk mengetahui faktor keamanan terhadap likuifaksi. Perhitungan faktor keamanan tanah terhadap likuifaksi dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \dots\dots\dots(20)$$

Dimana :

$$FS = \frac{CRR}{CSR} < 1 \text{ (terjadi likuifaksi)}$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} = 1 \text{ (kondisi kritis)}$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} > 1 \text{ (tidak terjadi likuifaksi)}$$

Jika hasil akhir perhitungan faktor keamanan kurang dari 1, dan jika sama dengan 1 maka kondisi tanah tersebut kritis sedangkan jika lebih dari 1 maka tidak terdapat potensi likuifaksi pada area tersebut.

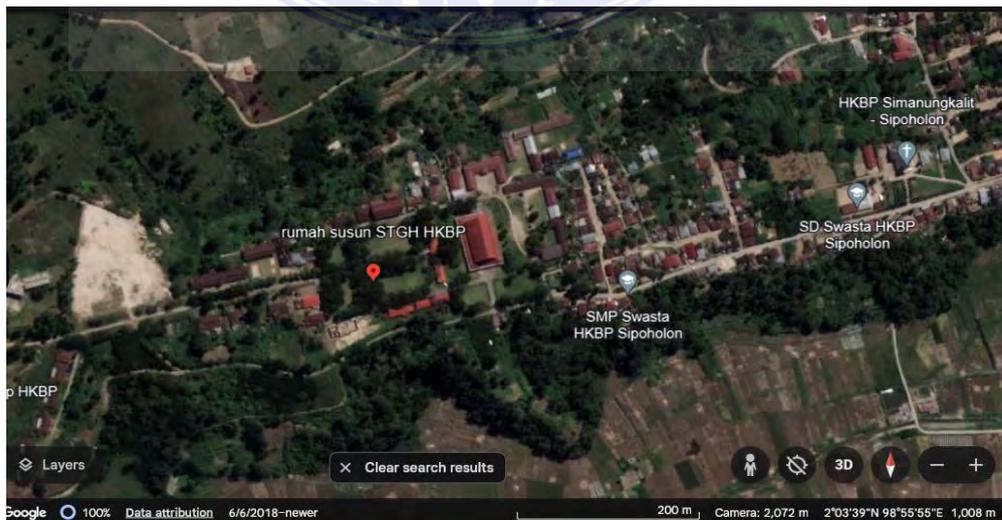
## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Deskripsi Penelitian

Lokasi yang dipilih untuk penelitian ini yaitu Proyek Pembangunan Rumah susun Silangkitang, Lokasinya yang terletak Kecamatan Sipoholon Kabupaten Tapanuli Utara, Provinsi Sumatera Utara merupakan salah satu daerah di pulau Sumatera. Dimana berdasarkan hasil penyelidikan tanah dilapangan yang berupa hasil uji alat sondir dan boring, pada lokasi tersebut termasuk jenis tanah dan diperlukan perbaikan tanah terlebih dahulu sebelum dilakukan pembangunan Rumah Susun Silangkitang.

### 3.2. Lokasi Penelitian

Lokasi yang dipilih untuk penelitian ini yaitu Proyek Pembangunan Rumah susun Silangkitang, Lokasinya yang terletak di Kecamatan Sipoholon Kabupaten Tapanuli Utara, Provinsi Sumatera Utara merupakan salah satu daerah di pulau Sumatera. Lokasi penelitian diambil dari Google Earth yang ditunjukkan pada Gambar 16 dibawah ini:



Gambar 16. Lokasi Penelitian (Google earth, 2024)

### 3.3. Kondisi Tanah Eksisting

Berdasarkan data BH-01 Jenis tanah kedalaman tanah keras Pada penelitian ini kondisi tanah memiliki kedalaman tanah keras 30 m dengan didominasi jenis tanah Lempung dan Pasir. Data kondisi tanah eksisting dapat dilihat dapat dilihat pada Tabel 7

Tabel 7. Nilai *Standar Penetrasi Test* (SPT) BH-01 (Data Lapangan, 2024)

No	Kedalaman	N-SPT	Jenis Tanah
1	0	0	Lempung Berpasir
2	2.0	6	Lempung Berpasir
3	4.0	4	Lempung Berpasir
4	6.0	7	Lempung Berpasir
5	8.0	18	Lempung Berpasir
6	10.0	6	Lempung Berpasir
7	12.0	6	Lempung Berpasir
8	14.0	9	Lempung Berpasir
9	16.0	14	Pasir
10	18.0	18	Pasir
11	20.0	24	Pasir
12	22.0	35	Pasir
13	24.0	60	Pasir
14	26.0	60	Pasir
15	28.0	60	Pasir
16	30.0	60	Pasir

### 3.4. Teknik Pengumpulan Data

Adapun metode pengumpulan data yang berkaitan dalam penyusunan skripsi ini dibagi kedalam 2 (dua) jenis data, yaitu data primer dan data sekunder.

### 3.4.1. Metode Pengumpulan Data

Adapun metode pengumpulan data yang dilakukan adalah:

#### 1. Metode Observasi

Data yang berhubungan dengan data teknis pondasi diperoleh langsung dari lokasi Proyek Pembangunan Rumah Susun Silangkitang.

#### 2. Pengambilan Data

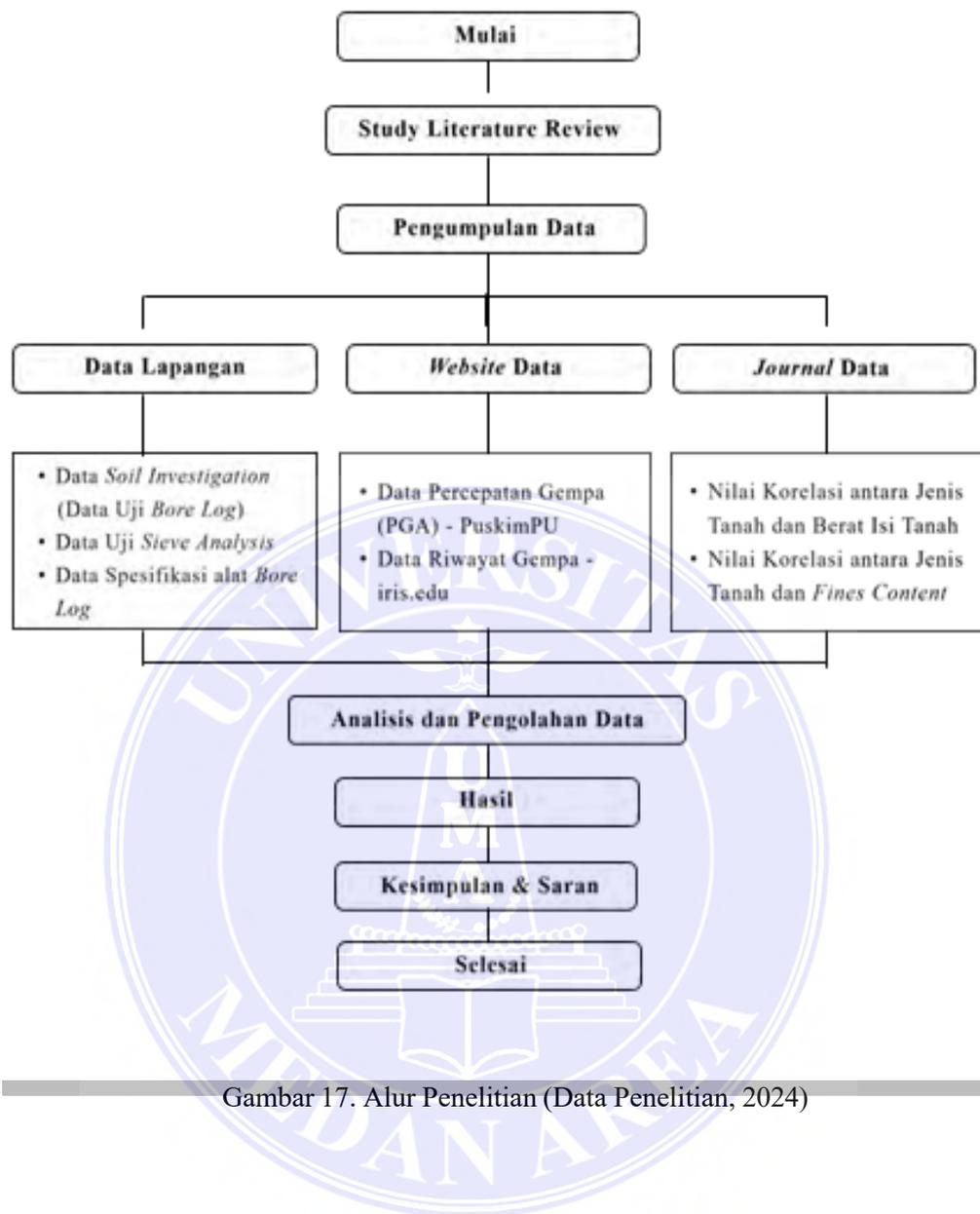
Adapun data yang diambil meliputi:

- a. Gambar lengkap (denah, potongan, detail-detail).
- b. Denah pondasi dan detail pondasi.
- c. Data penyelidikan tanah yaitu data SPT.

#### 3. Membaca dan mengutip isi buku yang berhubungan dengan permasalahan yang ditinjau untuk melengkapi dan menyelesaikan Tugas Akhir ini.

### 3.5. Alur Penelitian

Tahapan alur penelitian ini bertujuan untuk mempermudah dalam proses penelitian. Bagan alir kajian berikut menguraikan tahapan-tahapan penelitian skripsi ini:



Gambar 17. Alur Penelitian (Data Penelitian, 2024)

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

. Berdasarkan perhitungan dan pembahasan di atas, maka Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi potensi terjadinya likuifaksi tanah dengan mempertimbangkan kekuatan gempa yang berbeda, yaitu 6.5 SR, 7.5 SR, dan 8.0 SR. Diperoleh Kesimpulan bahwa semua lapisan tanah pada bore hole 1 tidak mengalami likuifaksi menurut referensi SNI 1726:2019 dengan magnitudo 6.5 SR, 7.5 SR, 8.0 SR. Tidak Mengalami Likuifaksi Selain itu juga menurut referensi Puskim PU diperoleh bahwa semua lapisan tanah pada bore hole 1 Tidak mengalami likuifaksi dengan magnitudo 6.5 SR, 7.5 SR dan 8.0 SR walaupun jenis tanahnya pasir (*sand*) dan lanau (*silt*) lebih dominan dan ada beberapa lapisan tanah yang memiliki karakteristik lempung (*clay*) tetap wajib dianalisis apakah adanya berpotensi terjadinya likuifaksi atau tidak.

#### **5.2 Saran**

Penelitian ini masih dapat dikembangkan dengan menghitung menggunakan berbagai aplikasi khusus seperti *Edu Shake* atau *Pro Shake* serta untuk memperoleh hasil yang lebih maksimal dapat digunakan hasil pengujian *sieve analysis* sebagai data tambahan perhitungan analisis potensi likuifaksi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Adhi, Bagas Wahyu. 2022. "Analisa Stabilitas Timbunan Di Daerah Rawa Menggunakan Penanganan Limestone Dengan Software Plaxis." *MoDuluS: Media Komunikasi Dunia Ilmu Sipil* 4(1): 40.
- Adinegoro, Chandra, Moch. Sholeh, and Dandung Novianto. 2021. "Metode Pelaksanaan Perbaikan Tanah Menggunakan Metode Preloading Dan Prefabricated Vertical Drain (Pvd) Pada Terminal Internasional Kijing Pontianak Kalimantan Barat." *Jurnal JOS- MRK* 2(2): 158–62.
- Braja, M. Das. 2008. *Advance Soil Mechanics*. Das, B. M. 1995. "Mekanika Tanah (Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknik." *Penerbit Erlangga*: 1–300.
- Das, Braja M. 1993. "Prinsip-Prinsip Rekayasa Geoteknis." *Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis*: 239.
- Dewaikar, J. Dixit, D. M. and R. S. Jangid. 2012. *Assessment of Liquefaction Poential Index for Mumbai City*. *Jurnal Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 12, 2759-2768, 2012 Earthquake Engineering Research Institute.
- Element, T. (2022). *Analisis Konsolidasi dengan Metode Preloading dikombinasikan dengan PVD berdasarkan Perhitungan Analitis dan Plaxis 2d Baby Purba*, Roesyanto, Gina Cyntia Raphita, Rudianto Surbakti Universitas Sumatera Utara, Indonesia Baby Purba, Roesyanto, Gina Cy. 3(12).Englewood Cliffs, N. J., 653.
- Hakam, A.(2020). Analisis Praktis Potensi Likuifaksi. Padang: Andalas Press Kampus UNAND - Limau Manis, 25176.
- Hutagalung, Mario and Simon Detha Tarigan. 2019. Analisis Potensi Likuifaksi Akibat Gempa (Studi Kasus : Reklamasi Pelabuhan Kontainer Belawan Fase-2). *Jurnal Rekayas Konstruksi Mekanika Sipil* Vol.2 No.1 Maret 2019.
- Idriss, I, M, and W Boulanger. 2008. *Soil liquefaction During Earthquakes*.
- Ikhsan, Rifa. 2011. Analisis Potensi Likuifaksi Dari Data CPT dan SPT dengan Studi Kasus PLTU Ende Nusa Tenggara Timur. Universitas Indonesia. Depok.
- Ishihara, K. 1996. *Behaviour in Earthquake Geotechnics*. Oxford Science

Publication.

Iwasaki, T., Tokida, K., Tatsuko, F., and Yasuda, S.: *A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan*, Proceedings of 2<sup>nd</sup> International Conference on Microzonation, San Frasisco, 885-896, 1978.

Kramer S. L. 1996. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall.

Kumar, Kamalesh. 2008. *Basic Geotechnical Earthquake Engineering*. New Delhi: New Age International (P) Ltd., Publishers

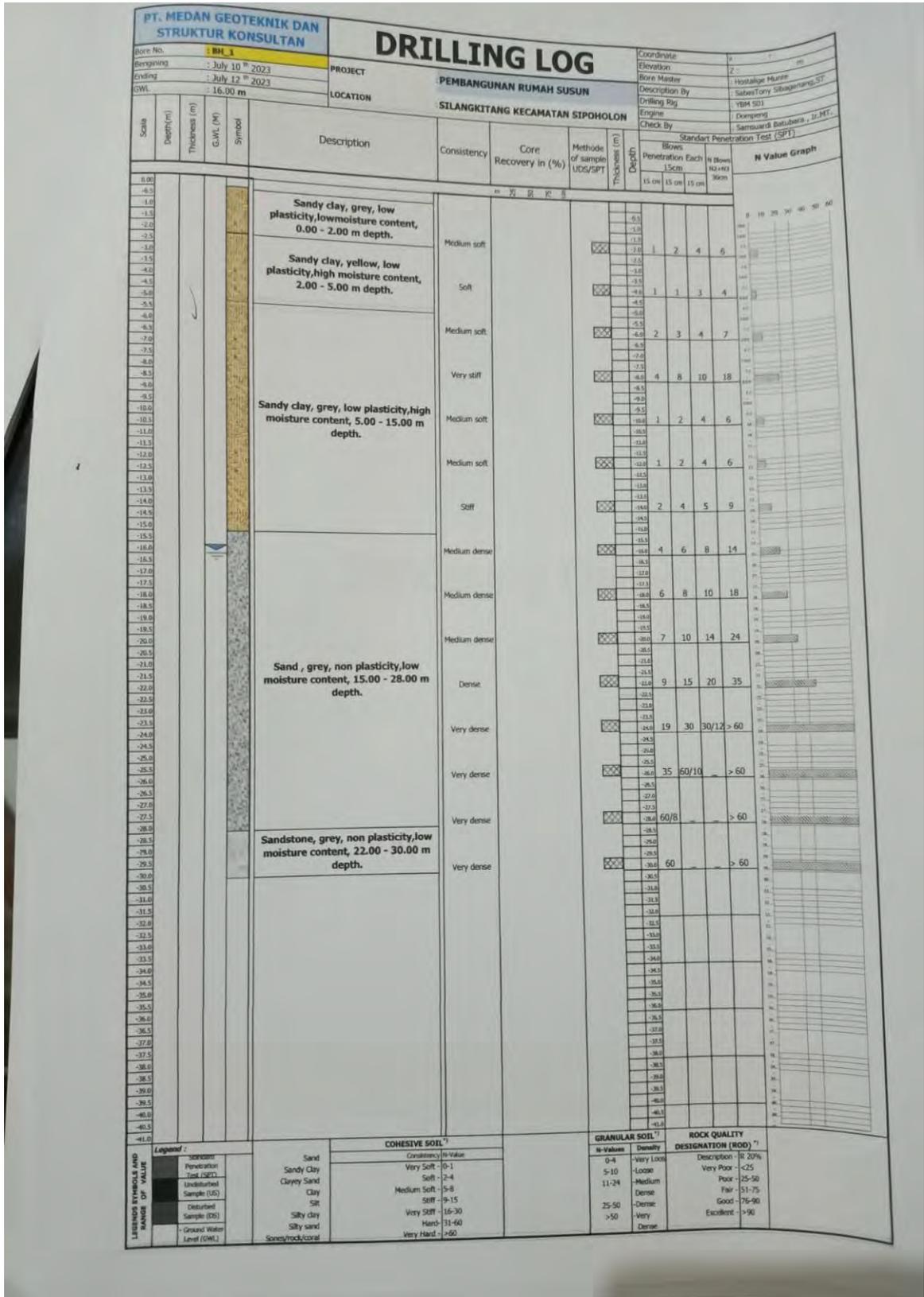
Luna, R. and Frost, J. D.: *Spatial Liquefaction analysis system*, J. Comput. Civil Eng., 12, 48-56, 1998.

Ohoimas, M. Y., and Indra Noer Hamdhan. 2014. "Analisis Konsolidasi Dengan Menggunakan Metode Preloading Dan Vertical Drain Pada Areal Reklamasi Proyek Pengembangan Pelabuhan Belawan Tahap II." *Reka Racana Jurnal Online Institut Teknologi Nasional* (x): 1–11.

P. K. Robertson : C E Wride. "Evaluating Cyclic Lliquefaction Potential Using The Cone Penetration Test". *Cannadian Geotechnical Journal*. Juni 1998.

Putri, R., Tyagita, E., & Hayati, J. (2022). *Analisis Perbaikan Tanah Lunak Metode Preloading dan Preloading Kombinasi Prefabricated Vertical Drain ( PVD ) dengan Variasi Panjang PVD ( Studi Kasus : Pembangunan Jalan Tol*. 2(February), 19–25.

LAMPIRAN



Lampiran 1. Data Driling log