

ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI BERDASARKAN DATA SPT PADA PROYEK PEMBANGUNAN GEDUNG ONKOLOGI

SKRIPSI

OLEH:

**DANI ALBERTUS SITUMORANG
218110050**



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2025**

UNIVERSITAS MEDAN AREA

© Hak Cipta Di Lindungi Undang-Undang

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

Document Accepted 16/2/26

Access From (repositori.uma.ac.id)16/2/26

ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI BERDASARKAN DATA SPT PADA PROYEK PEMBANGUNAN GEDUNG ONKOLOGI

SKRIPSI

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

Oleh:

**DANI ALBERTUS SITUMORANG
218110050**



**PROGRAM STUDI TEKNIK SIPIL
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MEDAN AREA
MEDAN
2025**

HALAMAN PENGESAHAN

Judul Skripsi : Analisis Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data SPT Pada
Proyek Pembangunan Gedung Onkologi
Nama : Dani Albertus Situmorang
NPM : 218110050
Fakultas : Teknik

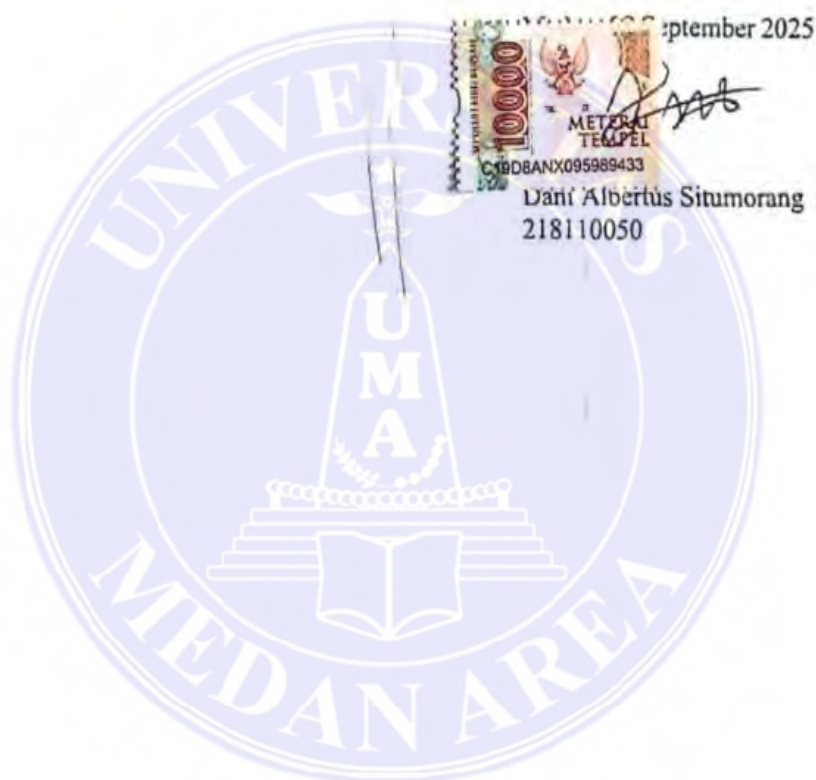
Disetujui Oleh:
Komisi Pembimbing



Tanggal Lulus : 08 September 2025

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 : Dani Abertus Situmorang
NPM : 218110050
Program Studi : Teknik Sipil
Fakultas : Teknik
Jenis karya : Skripsi

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Medan Area **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (Non Exclusive Royalty Free-Right)** atas karya ilmiah saya yang berjudul : Analisis Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data SPT Pada Proyek Pembangunan Gedung Onkologi

Gedung Fakultas Teknik Universitas Medan Area Menggunakan Metode Flat Slab. Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan hak Bebas Royalti Noneksklusif 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
Pada tanggal : 08 September 2025
Yang menyatakan



(Dani Albertus Situmorang)

RIWAYAT HIDUP

Dani Albertus Situmorang dilahirkan di Dusun XI, Dolok Nauli II Pada tanggal 14 November 2003 Anak ke enam dari enamm bersaudara, dari hitler Situmorang dan Asli Rosmawati br Sianipar. Penulis menyelesaikan pendidikan di SD N 102031 Dolok Nauli II Pada Tahun 2014. Pada tahun yang sama penulis melanjutkan ke SMP N 2 Sei Bamban dan lulus pada tahun 2018. Kemudian melanjutkan pendidikan di SMA N 2 Tebing Tinggi dan lulus pada tahun 2021 dan pada tahun 2021 terdaftar sebagai Mahasiswa Fakultas Teknik Universitas Medan Area. Pada tahun 2024 Penulis melaksanakan Praktek Kerja Lapangan (PKL) di Gedung Kolaborasi UMKM square Universitas Sumatera Utara (*Multiyears*)



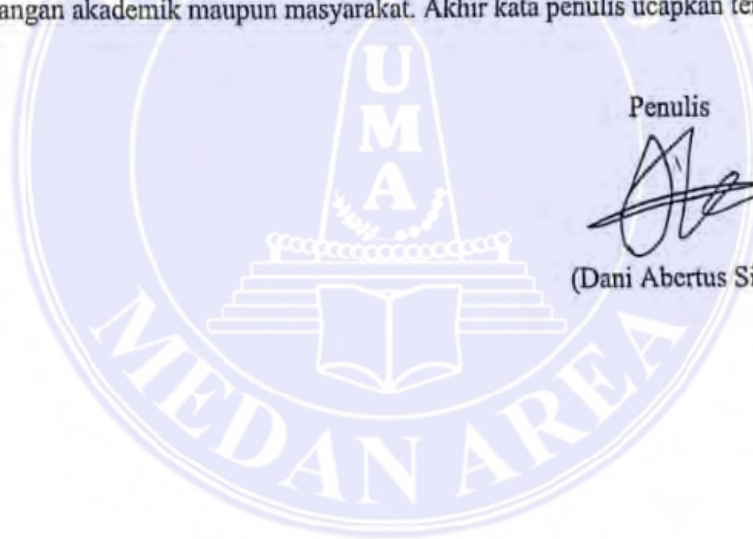
KATA PENGHANTAR

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Tuhan yang maha kuasa atas segala karunia-Nya sehingga Skripsi ini berhasil diselesaikan. Tema yang dipilih dalam skripsi ini ialah Geoteknik dengan judul Analisis Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data SPT Pada Proyek Pembangunan Gedung Onkologi. Terima kasih penulis sampaikan kepada Ibu Ir. Tika Ermita Wulandari, S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran. Disamping itu penghargaan penulis sampaikan kepada teman-teman teknik sipil 21 yang telah banyak membantu penulis selama penyusunan skripsi. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada Abang saya Bambang Situmorang, S.T. Kakak saya Dewy Sartika Situmorang, S.Pd dan Lestari Situmorang, S.Pd Karena telah mengorbankan mimpi-mimpimu demi membiayakan pendidikanku agar mimpi-mimpiku tumbuh. Setiap tetes keringatmu dalam mencari nafkah adalah bukti kasih sayang yang tak ternilai. Keberhasilanku hari ini adalah berkat pengorbananmu. Ungkapan terima kasih juga disampaikan kepada Ayah, Ibu serta seluruh keluarga atas segala doa dan perhatiannya. Penulis menyadari bahwa skripsi ini masih jauh dari kesempurnaan, oleh karena itu, kritik dan saran sangat penulis harapkan demi kesempurnaan skripsi ini. Penulis berharap skripsi ini dapat bermanfaat bagi kalangan akademik maupun masyarakat. Akhir kata penulis ucapkan terima kasih.

Penulis



(Dani Abertus Situmorang)



DAFTAR ISI

COVER	ii
HALAMAN PENGESAHAN.....	iii
HALAMAN PERNYATAAN	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS.....	v
RIWAYAT HIDUP	vi
KATA PENGHANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	viii
ABSTRAK	x
<i>ABSTRAK</i>	xi
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR LAMPIRAN.....	xvi
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian.....	3
1.5 Batasan Masalah	3
<u>BAB II</u> TINJAUAN PUSTAKA.....	5
2.1 Penelitian Terdahulu.....	5
2.2 Tanah	7
2.2.1 USDA Texture Triangle.....	8
2.2.2 Data N-SPT	12
2.3 Gempa Bumi.....	12
2.3.1 Jenis-Jenis Sesar (Patahan)	13
2.3.2 Besar Kekuatan Gempa.....	14
2.3.3 Jenis – Jenis Gempa Bumi	17
2.3.4 Riwayat Gempa Bumi di Sumatera Utara dan Aceh.....	18
2.4 Likuifaksi.....	19
2.4.1 Jenis-Jenis Likuifaksi	19
2.4.2 Syarat Terjadinya Likuifaksi.....	20

2.4.3 Metode Evaluasi Potensi Likuifaksi	21
2.4.4 Proses Terjadinya Likuifaksi	22
2.4.5 Dampak Terjadinya Likuifaksi	23
2.4.6 Histori Kasus Likufaksi di Indonesia.....	25
2.5 Parameter Identifikasi Potensi Likuifaksi	28
2.5.1 Tegangan tanah	28
2.5.2 Nilai N-SPT, (N1)60 dan (N1)60cs	30
2.5.3 Percepatan Gempa Dasar (α_{max}).....	33
2.5.4 <i>Stress Reduction factor</i> (rd)	34
2.5.5 <i>Cyclic Stress Ratio</i> (CSR).....	35
2.5.6 <i>Cyclic Resistance Ratio</i> (CRR).....	36
2.5.7 Factor of Safety (FS).....	38
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	40
3.1 Lokasi Penelitian	40
3.2 Teknik Pengumpulan Data	40
3.2.1 Metode Pengumpulan Data.....	40
3.3 Alur Penelitian.....	41
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN	43
4.1 Perhitungan Tegangan Tanah	43
4.1.1 Perhitungan Tegangan Tanah Pada BH	43
4.2 Perhitungan Nilai (N1)60 dan (N1)60cs.....	52
4.3 Perhitungan Nialai Percepatan Gempa Dasar (α_{max})	60
4.3.1 Berdasarkan Desain Spektra Indonesia Puskim PU.....	60
4.4 Perhitungan <i>Stress Reduction Factor</i> (rd)	60
4.5 Perhitungan CSR Berdasark Desain Spektra Indonesia Puskim PU	64
4.6 Perhitungan <i>Cylic Resistance Ratio</i>	68
4.6.1 Perhitungan CRR 5, CRR 5,5, CRR 6, CRR 6,5, CRR 7, CRR 7,5.....	68
4.7 Perhitungan <i>Faktor Of Safety</i> (FS) Berdasarkan Desain Spektra Indonesia Puskim Pu	91
4.8 Pembahasan	106
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	115
5.1 Kesimpulan.....	115
5.2 Saran	115
DAFTAR PUSTAKA	116

ABSTRAK

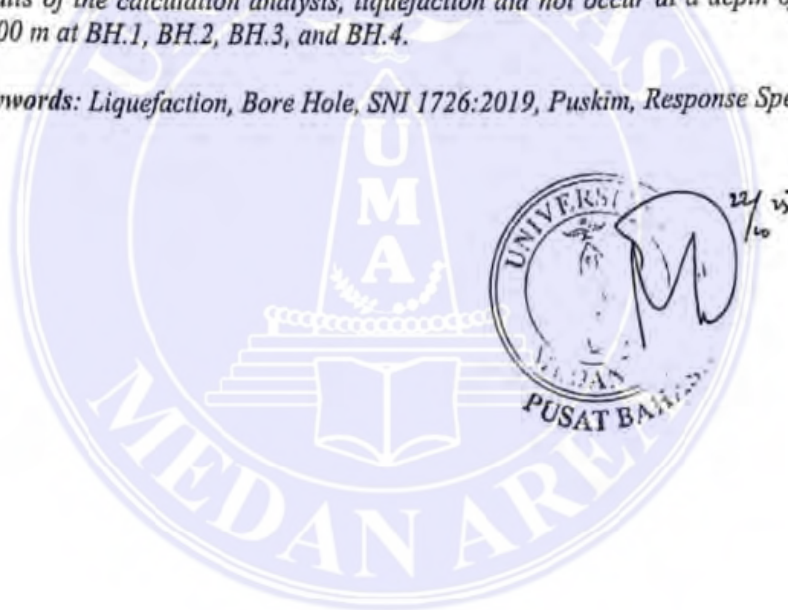
Potensi likuifaksi di Kota Medan, terutama pada area Pembangunan Gedung Onkologi RSUP HJ. Adam Malik akan dianalisis menggunakan beberapa besaran magnitudo gempa berdasarkan data riwayat gempa 50 tahun kebelakang dan hasil data uji *Boring Log*. *Boring Log* merupakan pengujian statis menggunakan mesin bor untuk 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. Tujuan dilakukannya penelitian ini adalah Untuk mengetahui potensial likuifaksi dengan megunakan kekuatan gempa 5 SR, 5,5 SR, 6SR, 6.5 SR, 7SR, 7.5 SR. rumusan masalah pada penelitian ini adalah Apakah lapisan tanah pada Proyek area Pembangunan Gedung Onkologi berpotensi mengalami likuifaksi apabila terjadi gempa dengan magnitudo 5 SR, 5,5 SR, 6SR, 6.5 SR, 7SR, 7.5 SR?. Metode penelitian yang digunakan ialah menggunakan data primer dari data bore log proyek, kemudian data sekunder menggunakan data dari SNI 1726 : 2019 dan website Desain Spektra Puskim PU. menggunakan data gempa dari Desain Spektra Indonesia Puskim PU. Dari hasil analisis perhitungan tidak terjadi likuifaksi pada kedalaman 2.00 – 30.00 m pada BH.1, BH.2, BH.3 BH.4.

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

ABSTRAK

The liquefaction potential in Medan City, especially in the Construction Area of the Oncology Building of RSUP HJ. Adam Malik, will be analyzed using several earthquake magnitudes based on earthquake 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 determine the soil SPT value. The SPT value was then calculated to obtain the cyclic stress ratio (CSR), cyclic resistance ratio (CRR), and the factor of safety (FS) value. If the FS value was less than one, then a high liquefaction potential could occur around the Construction Area. The purpose of this research is to determine the liquefaction potential by using earthquake strengths of 5 SR, 5.5 SR, 6 SR, 6.5 SR, 7 SR, and 7.5 SR. The problem formulation of this research is whether the soil layer in the Construction Area of the Oncology Building Project of has the potential to experience liquefaction when an earthquake occurs with magnitudes of 5 SR, 5.5 SR, 6 SR, 6.5 SR, 7 SR, and 7.5 SR. The research method that was used was primary data from the project bore log data, then secondary data from SNI 1726:2019 and the Design Spectrum website of Puskim PU, using earthquake data from the Indonesian Design Spectrum of Puskim PU. From the results of the calculation analysis, liquefaction did not occur at a depth of 2.00–30.00 m at BH.1, BH.2, BH.3, and BH.4.

Keywords: *Liquefaction, Bore Hole, SNI 1726:2019, Puskim, Response Spectrum.*



DAFTAR TABEL

Table 1 Jenis Gempa Tektonik Berdasarkan Kedalaman Gempa.....	17
Table 2 Histori Kejadian Likuifaksi Di Pulau Sumatera	18
Table 3 Histori Kejadian Likuifaksi Di Pulau Sumatera	27
Table 4 Nilai Korelasi Parameter Tanah Dengan N-SPT untuk Jenis Tanah Pasir (<i>Sand</i>) dan Lempung (<i>Clays</i>)	29
Table 5 Faktor Koreksi Uji SPT.....	31
Table 6 Hasil Perhitungan Berat Volume Pada BH-1	44
Table 7 Hasil Perhitungan Berat Volume Pada BH-2.....	45
Table 8 Hasil Perhitungan Berat Volume Pada BH-3.....	45
Table 9 Hasil Perhitungan Berat Volume Pada BH-4.....	46
Table 10 Hasil perhitungan tegangan vertikal total tanah,tekanan air pori tanah dan tegangan vertikal efektif tanah BH-1	48
Table 11 Hasil perhitunngan tegangan vertikal total tanah,tekanan air pori tanah dan tegangan vertikal efektif tanah BH-2	49
Table 12 Hasil perhitunngan tegangan vertikal total tanah,tekanan air pori tanah dan tegangan vertikal efektif tanah BH-3	50
Table 13 Hasil perhitunngan tegangan vertikal total tanah,tekanan air pori tanah dan tegangan vertikal efektif tanah BH-4	51
Table 14 Hasil Perhitungan Nilai (N1)60 Pada BH-1	53
Table 15 Hasil Perhitungan Nilai (N1)60 Pada BH-2.....	53
Table 16 Hasil Perhitungan Nilai (N1)60 Pada BH-3.....	54
Table 17 Hasil Perhitungan Nilai (N1)60 Pada BH-4.....	55
Table 18 Hasil Perhitungan Nilai (N1)60cs Pada BH-1	57
Table 19 Hasil Perhitungan Nilai (N1)60cs Pada BH-2	57
Table 20 Hasil Perhitungan Nilai (N1)60cs Pada BH-3	58
Table 21 Hasil Perhitungan Nilai (N1)60cs Pada BH-4	59
Table 22 Hasil Perhitungan <i>Nilai Stress Reduction Factor</i> (rd) Pada BH-1	61
Table 23 Hasil Perhitungan <i>Nilai Stress Reduction Factor</i> (rd) Pada BH-2	62
Table 24 Hasil Perhitungan <i>Nilai Stress Reduction Factor</i> (rd) Pada BH3	63
Table 25 Hasil Perhitungan <i>Nilai Stress Reduction Factor</i> (rd) Pada BH4.....	63
Table 26 Hasil Perhitungan <i>Cyclic Stress Rasio</i> (CSR) Pada BH-1 Berdasarkan Desain Spektra Indonesia Puskim PU	65
Table 27 Hasil Perhitungan <i>Cyclic Stress Rasio</i> (CSR) Pada BH-2 Berdasarkan Desain Spektra Indonesia Puskim PU	66
Table 28 Hasil Perhitungan <i>Cyclic Stress Rasio</i> (CSR) Pada BH-3 Berdasarkan Desain Spektra Indonesia Puskim PU	66
Table 29 Hasil Perhitungan <i>Cyclic Stress Rasio</i> (CSR) Pada BH-4 Berdasarkan Desain Spektra Indonesia Puskim PU	67
Table 30 Hasil Perhitungan Nilai CRR 7,5 Pada BH-1	69
Table 31 Hasil Perhitungan Nilai CRR 7,5 Pada BH-2	69
Table 32 Hasil Perhitungan Nilai CRR 7,5 Pada BH-3	70
Table 33 Hasil Perhitungan Nilai CRR 7,5 Pada BH-4	70
Table 34 Hasil Perhitungan Nilai CRR 5 Pada BH-1	73
Table 35 Hasil Perhitungan Nilai CRR 5 Pada BH-2	73
Table 36 Hasil Perhitungan Nilai CRR 5 Pada BH-3	74
Table 37 Hasil Perhitungan Nilai CRR 5 Pada BH-4	74

Table 38 Hasil Perhitungan Nilai CRR 5,5 Pada BH-1	77
Table 39 Hasil Perhitungan Nilai CRR 5,5 Pada BH-2	77
Table 40 Hasil Perhitungan Nilai CRR 5,5 Pada BH-3	78
Table 41 Hasil Perhitungan Nilai CRR 5,5 Pada BH-4	78
Table 42 Hasil Perhitungan Nilai CRR 6 Pada BH-1	81
Table 43 Hasil Perhitungan Nilai CRR 6 Pada BH-2	81
Table 44 Hasil Perhitungan Nilai CRR 6 Pada BH-3	82
Table 45 Hasil Perhitungan Nilai CRR 6 Pada BH-4	82
Table 46 Hasil Perhitungan Nilai CRR 6,5 Pada BH-1	84
Table 47 Hasil Perhitungan Nilai CRR 6,5 Pada BH-2	85
Table 48 Hasil Perhitungan Nilai CRR 6,5 Pada BH-3	85
Table 49 Hasil Perhitungan Nilai CRR 6,5 Pada BH-4	86
Table 50 Hasil Perhitungan Nilai CRR 7 Pada BH-1	88
Table 51 Hasil Perhitungan Nilai CRR 7 Pada BH-2).....	89
Table 52 Hasil Perhitungan Nilai CRR 7 Pada BH-3	89
Table 53 Hasil Perhitungan Nilai CRR 7 Pada BH-4	90
Table 54 Hasil Perhitungan <i>Nilai Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 5 SR Pada BH-1.....	92
Table 55 Hasil Perhitungan <i>Nilai Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 5 SR Pada BH-2.....	92
Table 56 Hasil Perhitungan <i>Nilai Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 5 SR Pada BH-3.....	93
Table 57 Hasil Perhitungan <i>Nilai Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 5 SR Pada BH-4.....	93
Table 58 Hasil Perhitungan <i>Nilai Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 5,5 SR Pada BH-1.....	94
Table 59 Hasil Perhitungan <i>Nilai Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 5,5 SR Pada BH-2.....	95
Table 60 Hasil Perhitungan <i>Nilai Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 5,5 SR Pada BH-3.....	95
Table 61 Hasil Perhitungan <i>Nilai Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 5,5 SR Pada BH-4.....	96
Table 62 Hasil Perhitungan <i>Nilai Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 6 SR Pada BH-1.....	97
Table 63 Hasil Perhitungan <i>Nilai Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 6 SR Pada BH-2.....	97
Table 64 Hasil Perhitungan <i>Nilai Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 6 SR Pada BH-3.....	98
Table 65 Hasil Perhitungan <i>Nilai Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 6 SR Pada BH-4.....	98
Table 66 Hasil Perhitungan <i>Nilai Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 6,5 SR Pada BH-1.....	99
Table 67 Hasil Perhitungan <i>Nilai Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 6,5 SR Pada BH-2.....	100
Table 68 Hasil Perhitungan <i>Nilai Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 6,5 SR Pada BH-3.....	100
Table 69 Hasil Perhitungan <i>Nilai Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 6,5 SR Pada BH-4.....	101

Table 70 Hasil Perhitungan Nilai <i>Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 7 SR Pada BH-1.....	102
Table 71 Hasil Perhitungan Nilai <i>Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 7 SR Pada BH-2.....	102
Table 72 Hasil Perhitungan Nilai <i>Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 7 SR Pada BH-3.....	103
Table 73 Hasil Perhitungan Nilai <i>Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 7 SR Pada BH-4.....	103
Table 74 Hasil Perhitungan Nilai <i>Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 7,5 SR Pada BH-1.....	104
Table 75 Hasil Perhitungan Nilai <i>Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 7,5 SR Pada BH-2.....	105
Table 76 Hasil Perhitungan Nilai <i>Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 7,5 SR Pada BH-3.....	105
Table 77 Hasil Perhitungan Nilai <i>Factor Of Safety</i> Dengan <i>Magnitude</i> 7,5 SR Pada BH-4.....	106



DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 <i>The Soil Texture Triangle</i>	9
Gambar 2 Tekstur Tanah <i>Clay, silt, Sand</i> dan <i>loam</i> ,	10
Gambar 3 <i>Soil Texture Triangle</i>	11
Gambar 4 <i>Normal Fault</i>	13
Gambar 5 <i>Reverse Fault</i>	14
Gambar 6 <i>Strike Fault</i>	14
Gambar 7 Skala <i>MMI Modified Mercalli Intensity</i>	15
Gambar 9 Tanah Dalam Keadaan Normal, Likuifaksi dan Setelah Likuifaksi.....	22
Gambar 10 Jarak Kab. Donggala ke Kab. Sigi	26
Gambar 11 Halaman Puskim Desain Spektra Indonesia	33
Gambar 12 Percepatan Gempa Dasar SNI 03-1726-2002	34
Gambar 13 Lokasi Penelitian	40
Gambar 14 Alur Penelitian	42
Gambar 15 Hasil Respon Spektra Lokasi Proyek Pembangunan Gedung Onkologi RSUP HJ. Adam Malik	60
Gambar 16 <i>Grafik Factor OF Safety</i> BH-1.....	107
Gambar 17 <i>Grafik Factor OF Safety</i> BH-2.....	109
Gambar 18 <i>Grafik Factor OF Safety</i> BH-3.....	111
Gambar 19 <i>Grafik Factor OF Safety</i> BH-4.....	113

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. <i>Bore log</i> Pada BH-1.....	117
Lampiran 2. <i>Bore log</i> Pada BH-2.....	117
Lampiran 3. <i>Bore log</i> Pada BH-3.....	117
Lampiran 4. <i>Bore log</i> Pada BH-4.....	117



BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangunan infrastruktur di wilayah rawan gempa memerlukan perhatian khusus terhadap potensi bencana geoteknik seperti likuifaksi. Likuifaksi merupakan fenomena pelemahan kekuatan tanah jenuh akibat getaran gempa, yang menyebabkan tanah kehilangan kekuatan dukung dan berperilaku seperti cairan. Dampak dari likuifaksi dapat sangat merugikan, terutama pada konstruksi bangunan penting seperti rumah sakit, yang fungsinya sangat vital dalam situasi darurat. Oleh karena itu, studi potensi likuifaksi menjadi sangat krusial dalam tahap perencanaan dan desain fo.

Gedung Onkologi yang terletak di Medan direncanakan sebagai salah satu pusat pelayanan kesehatan rujukan nasional. Lokasi proyek berada di kawasan dengan aktivitas seismik yang cukup tinggi, sehingga perlu dilakukan evaluasi mendalam terhadap kondisi tanah. Salah satu metode umum yang digunakan dalam analisis geoteknik adalah uji Standar Penetrasi.

Peristiwa likufaksi 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. Menurut data riwayat gempa iris.edu, di Provinsi Sumatera Utara pernah terjadi gempa bumi dengan magnitude paling besar yaitu 8.6 SR pada tahun 2005 serta Kota Medan sendiri termasuk kedalam wilayah

dengan zona kerentanan potensi likuifaksi sedang menurut Peta Zona Kerentanan Likuifaksi ESDM RI 2019. Dominasi jenis tanah di Sumatera Utara merupakan gabungan antara jenis tanah *latosol*, *podsolik* dan *regosol* serta Kota Medan yang termasuk zona dataran rendah didominasi susunan batu lempung, kerikil dan pasir (Rahmadika, 2019).

Berdasarkan sejarah yang dapat dari data gempa di kota medan, Medan itu punya potensi likuifaksi, Sehingga gedung- gedung tinggi di kota medan termasuk gedung onkologi akan di analisis dengan segala gempa yang mirip dari riwayat gempa di kota medan 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 Proyek Pembangunan Gedung Onkologi

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah Apakah lapisan tanah pada Proyek Pembangunan Gedung Onkologi berpotensi mengalami likuifaksi apabila terjadi gempa dengan magnitudo 5 SR, 5.5 SR, 6SR, 6.5 SR, 7SR, 7.5 SR?

1.3 Maksud dan Tujuan Penelitian

Adapun maksud dari penulisan skripsi ini yaitu untuk menganalisis potensi likuifaksi pada Proyek Pembangunan Gedung Onkologi 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 megunakan kekuatan 5 SR, 5,5 SR, 6SR, 6.5 SR, 7SR, 7.5 SR.

1.4 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat secara praktis yang dapat diambil dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

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. Dapat menjadi rujukan atau referensi bagi instansi atau perusahaan terkait yang membutuhkan informasi mengenai potensi likuifaksi di Kota Medan.
4. Dapat menjadi bahan rujukan atau referensi dalam pembahasan yang sama tentang likuifaksi khususnya bagi mahasiswa/i fakultas teknik maupun pihak-pihak lain yang membutuhkan.

1.5 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* dari data *bore log*.
2. Penelitian ini tidak menganalisis penurunan tanah (*settlement*).

3. Nilai percepatan gempa dasar (a_{max}) yang digunakan didasarkan pada website Desain Spektra Indonesia Puskim PU.
4. Magnitudo gempa yang akan digunakan dalam analisis ini adalah 5 SR, 5,5 SR, 6 SR, 6.5 SR, 7SR, 7.5 SR.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penelitian Terdahulu

Pada bagian ini akan dijelaskan hasil-hasil mengenai penelitian terdahulu yang bisa dijadikan acuan dalam topik penelitian ini. Penelitian terdahulu telah dipilih sesuai dengan permasalahan dalam penelitian ini, sehingga diharapkan mampu menjelaskan maupun memberikan referensi untuk menyelesaikan penelitian. Berikut ini dijelaskan beberapa penelitian terdahulu yang telah dipilih.

1. Penelitian yang dilakukan Elden 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 Resistancel Ratio* (CRR) dan nilai *Cyclic Strelss 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 dikedalaman 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 (α_{max}), dan nilai magnitude gempa (M_w).

3. Penelitian yang dilakukan oleh Andrianna Rahmadika (2019) dengan judul: Analisis Potensi Likuifaksi di Kota Medan Berdasarkan Data Hasil CPT Dengan Metode Percepatan Gempa Donovan. Berdasarkan hasil penelitian tersebut, tidak ada potensi terjadinya likuifaksi menurut perhitungan. Namun jika terjadi gempa bumi dengan *magnitude* 7.5 SR, menghasilkan nilai $FS < 1$ yang berarti Kota Medan terdapat potensi terjadinya likuifaksi.
4. Jurnal ilmiah Mario Hutagalung dan Simon Dertha Tarigan (2019) dengan judul: Analisis Potensi Likuifaksi Akibat Gempa (Studi Kasus : Reklamasi Pelabuhan Kontainer Belawan Fase-2). Berdasarkan hasil penelitian tersebut, area reklamasi pelabuhan kontainer Belawan memiliki potensi likuifaksi jika terjadi gempa bumi dengan *minimal magnitude* 6.9 SR dengan PGA 0.213 g berdasarkan Peta Hazard Gempa Indonesia 2010.

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

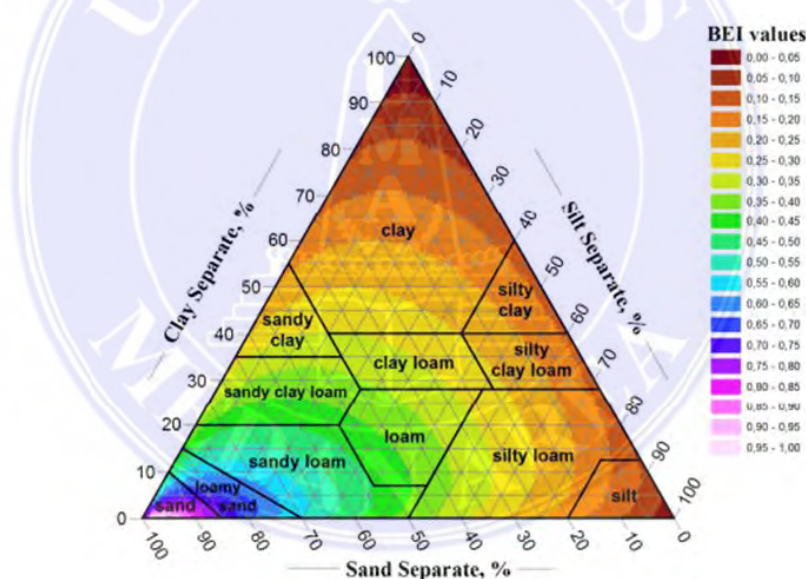
Selain klasifikasi tanah yang dijabarkan menurut Bowles (1989) diatas, terdapat beberapa cara lain yang digunakan dalam mengklasifikasikan jenis-jenis tanah, yaitu sebagai berikut :

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.

USDA mengklasifikasikan jenis tanah menggunakan triangle graphic atau grafik segitiga tekstur tanah dimana grafik segitiga tersebut menyebutkan berbagai kombinasi tanah liat, pasir, dan lumpur. Grafik segitiga tekstur tanah pada Gambar 1 merupakan *representasi visual* dari kombinasi jenis-jenis tanah.

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 (Bultr, 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*, *silt*, *Sand* dan *loam*, (*Inspired Pencil* (2023))

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..

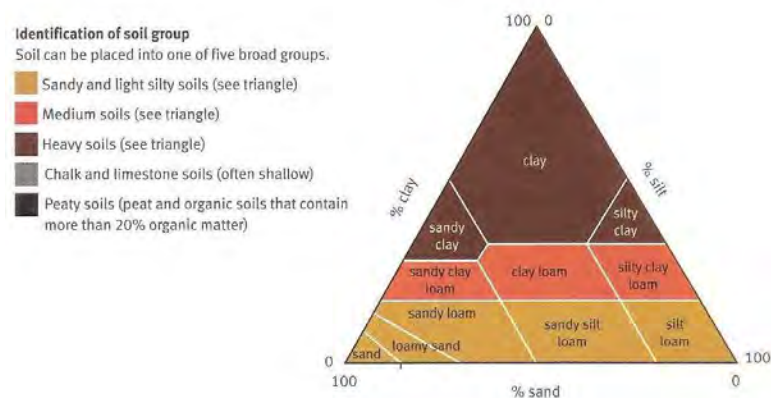
Tanah lanau (*silt*) merupakan zat sedimen lepas yang terdiri dari partikel batuan kecil yang terbentuk secara alami. Tanah lanau merupakan tanah yang secara umum menahan kelembapan dan memiliki nilai kesuburan yang tinggi serta biasanya digunakan dalam bidang pertanian seperti untuk keperluan budidaya tanaman. Karena kehalusannya, tanah lanau memiliki sedikit ataupun tidak ada plastisitas. Saat basah, tanah lanau akan dengan mudah membentuk bola atau bentuk lainnya..

Pasir halus (*fine sand*) memiliki ukuran partikel 0.075 mm hingga 0.0425 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 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.

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 Gambar 3 di bawah ini.



Gambar 3 *Soil Texture Triangle* (Inspired Pencil (2023))

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 (θ) 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 diperlkan 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

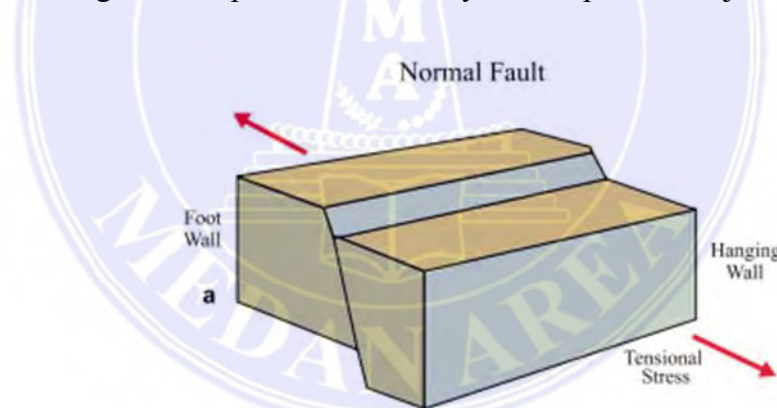
di bawah permukaan bumi disebut titik *hiposenter*. Sedangkan titik lokasi dimana gempa terjadi di atas permukaan bumi disebut *episenter*.

2.3.1 Jenis-Jenis Sesar (Patahan)

Sesar atau patahan adalah sebuah rekahan atau retakan pada kerak bumi yang menyebabkan pergeseran di kedua sisi rekahan tersebut. Sesar terbentuk akibat tegangan tektonik yang bekerja pada batuan di dalam kerak bumi. Jenis-jenis sesar dapat dibedakan berdasarkan arah pergerakan kedua blok batuan yang terpisah oleh patahan tersebut.. Terdapat 3 (tiga) jenis patahan atau sesar, yaitu:

1. Patahan Normal (*Normal Fault*)

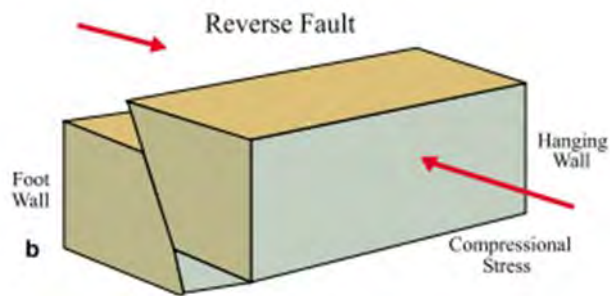
Merupakan jenis patahan pada Gambar 4 yang arah gerak bloknnya (*footwall*) relatif naik terhadap blok lainnya (*hanging wall*). Sudut kemiringan untuk patahan ini biasanya mencapai 90 derajat.



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

2. *Reverse Fault*

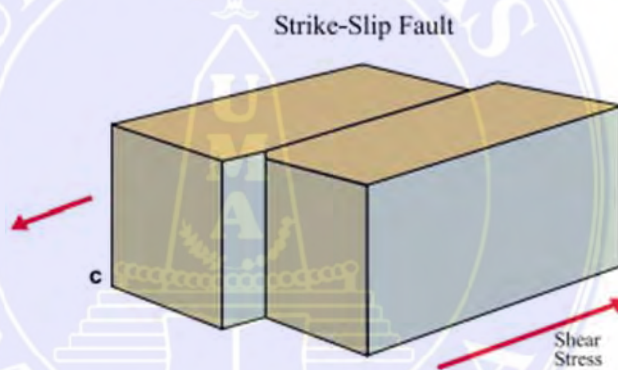
Merupakan jenis patahan pada Gambar 5 dengan arah gerak *hanging wall* relatif naik daripada *footwall*. Sudut kemiringan *reverse fault* adalah kurang dari 45 derajat.



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

2.3.2 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 richter*).

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 dapat dilihat pada Gambar 7.

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

Gambar 7 Skala MMI Modifield Melrcally Intelnsity (Wardhiny, 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 Gambar 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 bengkok
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, 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

2.3.3 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 hingga menimbulkan 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 sesar yang jenis yang berbeda-beda sesuai dengan arah geraknya. Biasanya jika terjadi gempa tektonik maka akan terjadi gempagempa susulan lainnya tergantung dari kedalaman gempanya.

Pembagian gempa tektonik berdasarkan kedalaman gempa dapat dilihat pada Tabel 1.

Table 1 Jenis Gempa Tektonik Berdasarkan Kedalaman Gempa	
Jenis Gempa	Kedalaman
Gempa Bumi Dangkal	0 – 70 km
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 gempa bumi ini biasanya tidak sebesar efek gempa bumi tektonik dan hanya mempengaruhi area-area kecil di sekitarnya.

2.3.4 Riwayat Gempa Bumi di Sumatera Utara dan Aceh

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. Selain 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.

Table 2 Histori Kejadian Likuifaksi Di Pulau Sumatera

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	2,9°	Lu	6,5	Pidie Jaya, Aceh
25 Mei 2021	97,1°	BT	5,25°		6,7	Pesisir utara, Sumatera Utara

2.4 Likuifaksi

Menurut *Idriss dan Boulanger (2008)* likuifaksi adalah likuifaksi sebagai kondisi dimana tanah jenuh yang longgar mengalami peningkatan tekanan air pori sehingga kekuatan geser efektifnya menjadi sangat rendah hingga menyebabkan deformasi yang besar atau kegagalan..

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 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 hidrostatik 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

2.4.2 Syarat Terjadinya Likuifaksi

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

- a) Lapisan tanah berupa pasir atau lanau
- b) Lapisan tanah jenuh air

- c) Muka air tanah (*ground water level*) dangkal <10 m
- d) Terjadi gempa bermagnitudo minimal 5.0 SR.
- e) *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.

2.4.3 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 8 Tanah Dalam Keadaan Normal, Likuifaksi dan Setelah Likuifaksi (S.,A. (Ega., 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. Pada akhirnya partikel-partikel tanah tidak dapat mendistribusikan beban dengan baik.

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 30° 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 30°. 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.

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*.

7. *Ground Settlement*

Merupakan jenis penurunan tanah yang terjadi akibat guncangan gempa. Penurunan tanah ini dikenal sebagai subsidensi atau pengendapan. Penyebab utamanya adalah konsolidasi atau kegagalan tanah yang terjadi di

bawah pondasi. *Ground settlement* dapat menyebabkan bangunan bergeser, miring, merenggang, terpuntir, tertekuk atau kombinasi dari kelimanya. Seberapa parah tingkat kerusakan bangunan tergantung pada tingkat keparahan penurunan tanah, jenis, kekuatan pondasi, dan struktur bangunan.

8. *Failure of Retaining Walls*

Merupakan jenis kerusakan yang disebabkan oleh peningkatan beban lateral pada tanah yang terlikufaksi. Kondisi ini dapat menyebabkan hilangnya suatu kekuatan dari massa tanah yang sudah mengalami likuifaksi sehingga terjadi kegagalan pada struktur pondasi.

2.4.6 Histori Kasus Likufaksi di Indonesia

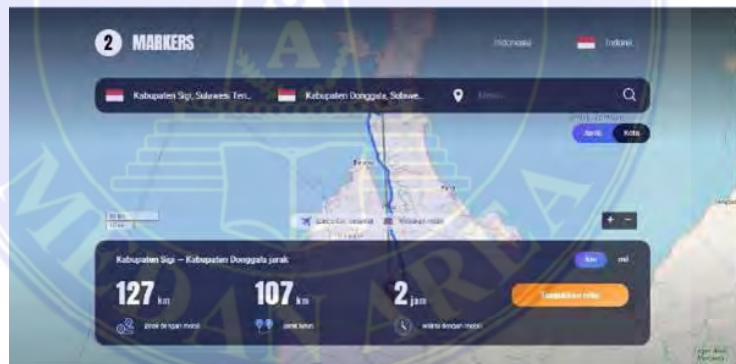
Sejarah mencatat bahwa likuifaksi di Indonesia pernah terjadi di Flores (1992), Maumere (1992), Yogyakarta (2006) dan Palu (2018). Namun dikarenakan keterbatasan informasi yang beredar di internet, hanya terdapat beberapa detail informasi lengkap mengenai kronologi kejadian likuifaksi yang terjadi di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



Gambar 9 Jarak Kab. Donggala ke Kab. Sigi (rsa.ciptakarya.pul.go.id, 2024)

Berdasarkan Gambar 10 di atas, jarak dari pusat gempa Donggala ke Kab. Sigi mencapai ± 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.

Table 3 Histori Kejadian Likuifaksi Di Pulau Sumatera

Tanggal	Bujur		Lintang		Magnitudo	Lokasi Kejadian Likuifaksi
04 Dec 1967	97,3°	BT	5,3°	LUI	6,2	Lhokseumawe, Aceh
27 Apr 1987	98,8°	BT	2,1°	LUI	6,6	Tarutung, Sumatera Utara
15 Nov 1990	97,457°	BT	3,908°	LUI	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
10 Mei 2021	97,1°	BT	5,25°	LU	6,7	Pesisir Utara, Sumatera Uara

Berdasarkan Tabel 3 di atas, dapat dilihat bahwa Sumatera Utara memiliki 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.

2.5 Parameter Identifikasi Potensi Likuifaksi

2.5.1 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 (μ) disebut tegangan vertikal total. Tegangan vertikal total dapat dihitung dengan persamaan berikut :

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

Dimana :

σ_v = Tegangan vertikal total tanah (kN/m²)

γ = Berat isi lapisan tanah (kN/m³)

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 :

μ = Tekanan air pori tanah (kN/m²)

$$\gamma_w = \text{Berat volume air} = 9.81 \quad (\text{kN/m}^3)$$

$$z = \text{Kedalaman tanah yang ditinjau} \quad (\text{m})$$

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 :

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

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

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

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

Table 4 Nilai Korelasi Parameter Tanah Dengan N-SPT untuk Jenis Tanah Pasir (*Sand*) dan Lempung (*Clays*)

Soil	Nilai SPT	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

<i>Clay</i>	Parameter	$\gamma \text{ (kN/m}^3\text{)}$	$S_u \text{ (Kpa)}$
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 stiff</i>	18,8-22,0	20
32	<i>Hard</i>		0

Pada Tabel nilai korelasi diatas, untuk mendapatkan nilai berat isi tanah (γ) 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 :

$$\gamma = \frac{(\gamma)}{(x+z)} + \gamma_1 \dots \dots \dots (4)$$

Dimana :

γ = Berat isi tanah (kN/m³)

y = Selisih nilai N-SPT → Batas atas – batas bawah

x = Selisih nilai N-SPT → Nilai N-SPT pengujian - batas bawah

z = Selisih nilai γ → γ_{atas} - γ_{bawah}

γ_1 = Batas bawah nilai γ

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 :

$(N1)_{60}$ = 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 :

$$C_N = \frac{2,2}{(1,2) + \left(\frac{\sigma_v}{p_a}\right)} \dots \dots \dots (6)$$

Dimana :

σ_v = Tegangan vertikal efektif tanah (kN/m²)

p_a = 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 :

Table 5 Faktor Koreksi Uji SPT

Faktor	Jenis Alat	Parameter	Koreksi
Tegangan Vertikal	C_N	$2,2 / (1,2 + (\sigma_v/p_a))$	Tegangan Vertikal

Tegangan Vertikal	C_N	$C_N < 1,7$	Tegangan Vertikal
Rasio Tenaga Palu	C_E	0,5 - 1,0	Rasio Tenaga Palu
Donat (<i>Donut Hammer</i>)			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 $(N1)_{60cs}$, perlu diketahui juga nilai *finest content* (FC) yang merupakan nilai % lolos saringan No. 200. Faktor koreksi $(N1)_{60cs}$ penyetaraan nilai dapat dihitung dengan persamaan berikut :

$$(N1)_{60cs} = \alpha + \beta \cdot (N1)_{60} \dots\dots\dots (7)$$

$$(N1)_{60cs} = (N1)_{60} + \Delta(N1)_{60} \dots\dots\dots (8)$$

$$\Delta(N1)_{60} = \text{EXP} \left(1,63 + \frac{9,7}{fc+0,01} - \left(\frac{15,7}{fc+0,01} \right)^2 \right) \dots\dots\dots (9)$$

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 α dan β dipengaruhi oleh presentase *finest content* (FC). Koefisien tersebut didapatkan dari persamaan sebagai berikut:

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

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

$$\beta = \left[0,99 + \left(\frac{f_c^{1.5}}{1000} \right) \right] \dots \dots \dots \text{apabila } 5\% < FC < 35\%$$

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

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

2.5.3 Percepatan Gempa Dasar (α_{\max})

Percepatan gempa dasar atau *Peak Ground Accerleration* (PGA) atau bisa dilambangkan dengan α_{\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.

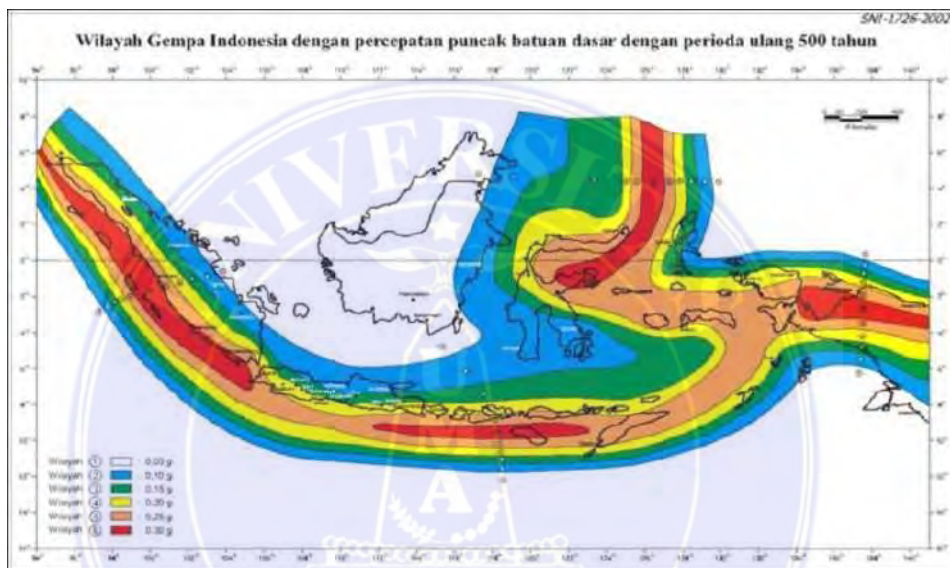
Pada penelitian ini, penulis menggunakan data Aplikasi Spektrum Respons Desain Indonesia 2021 Puskim PU pada Gambar 11 yang dikembangkan oleh Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR) bersama dengan Institut Teknologi Bandung (ITB) dalam menentukan percepatan gempa (α_{\max}) berdasarkan koordinat lokasi.



Gambar 10 Halaman Puskim Desain Spektra Indonesia
(<https://rsa.ciptakarya.pu.go.id/2021/>)

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 11 Percepatan Gempa Dasar SNI 03-1726-2002 (BSN, SNI 03-1726-2002, 2002)

Berdasarkan Gambar 12 yaitu SNI 03-1726-2002, wilayah Kota Medan termasuk kedalam wilayah 3 dengan nilai percepatan gempa dasar yaitu 0.15 g.

2.5.4 *Stress Reduction factor (rd)*

Secara umum, *tress reduction ractor* atau SRF (rd) 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 :

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

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

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

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 :

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.

2.5.5 *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 :

$$CSR = 0,65 \cdot \frac{\sigma_{max}}{\sigma'v} + \frac{\sigma_v}{\sigma'v} \cdot r_d \dots\dots\dots(14)$$

Dimana :

CSR = Tegangan siklik yang menyebabkan likuifaksi

A_{max} = Percepatan gempa dasar

g = Percepatan gravitasi bumi = 9.81

σ'_v = Tegangan vertikal efektif tanah (kN/m^2)

σ_v = Tegangan vertikal lokal tanah (kN/m^2)

r_d = Faktor reduksi terhadap tegangan

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

2.5.6 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 :

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

Dimana :

MSF = *Magnitude scaling factors*

M_w = *Magnitudo* gempa

Sedangkan untuk nilai faktor koreksi overburden dapat dihitung dengan persamaan berikut :

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

$$f = 0.831 - \frac{(N_1)_{60cs}}{160} \dots\dots\dots(17)$$

Dimana :

K_σ = Faktor koreksi overburden

σ_v = Tegangan vertikal total tanah (kN/m²)

p_a = Tegangan atmosfer 100 kPa (1 atm)

f = Faktor kerapatan relatif tanah

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

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 :

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

Sedangkan untuk skala gempa referensi yaitu 7.5 SR menggunakan persamaan berikut :

$$CRR_{7.5} = \exp \left\{ \left[\frac{(N1)60cs}{14,1} \right] + \left[\frac{(N1)60cs}{126} \right]^2 - \left[\frac{(N1)60cs}{23,6} \right]^3 + \left[\frac{(N1)60cs}{25,4} \right]^4 - 2.8 \right\} \quad (19)$$

Dimana :

CRR = Kemampuan tanah untuk menahan likuifaksi

CRR_{Mw} = *Cyclic resistance ratio* pada skala tertentu

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

2.5.7 Factor of Safety (FS)

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

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

Dimana :

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

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

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

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.

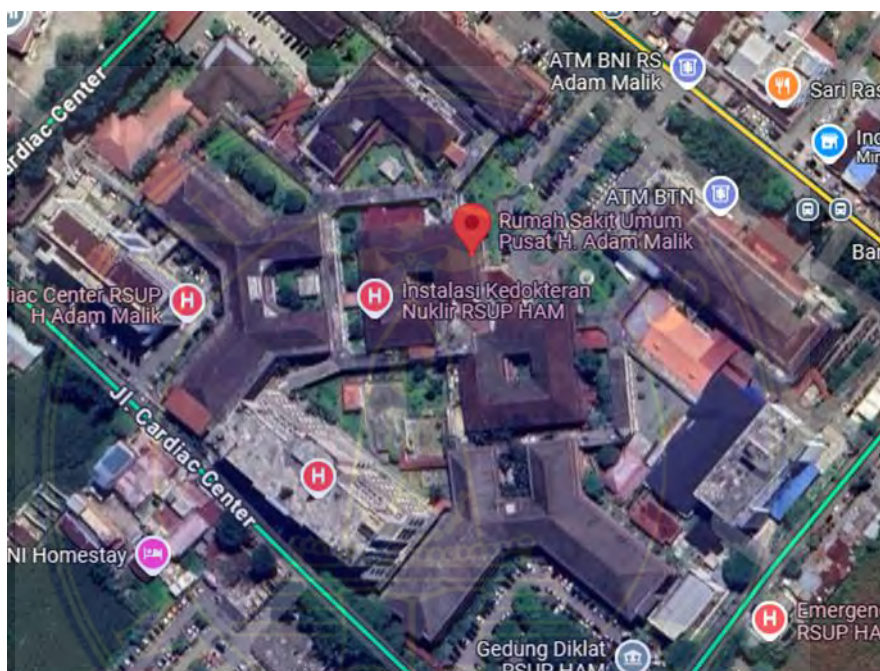


BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Lokasi Penelitian

Proyek Pembangunan Gedung Onkologi di Kota Medan di jalan Bunga Lau No. 137 Kec. Medan Tuntungan, Kab. Kota Medan, Sumatra Utara. Pada gambar 13 di bawah ini merupakan lokasi proyek Pembangunan Gedung Onkologi



Gambar 12 Lokasi Penelitian (Google Earth, 2025)

3.2 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.

3.2.1 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 Gedung Onkologi

2. Pengambilan Data

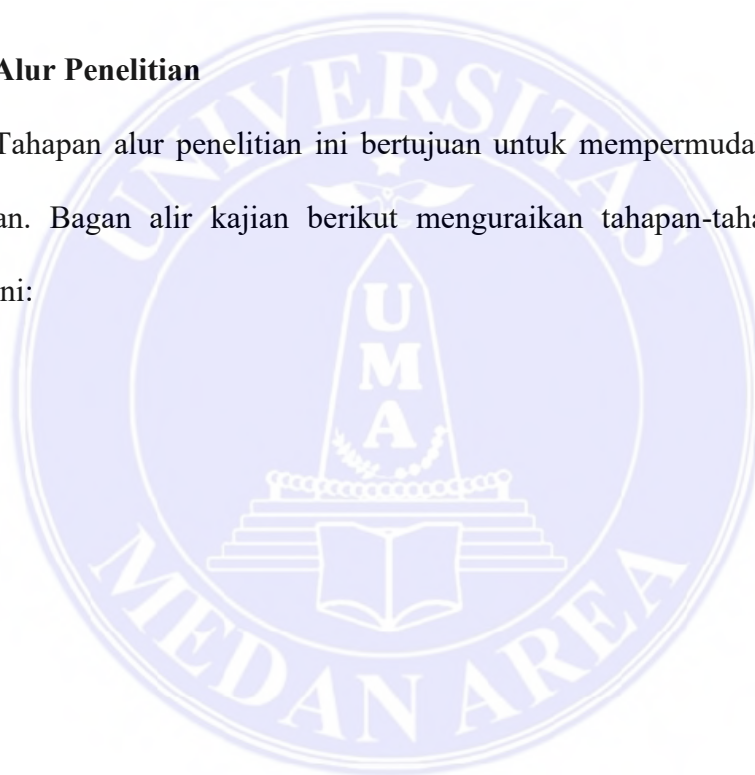
Adapun data yang diambil meliputi:

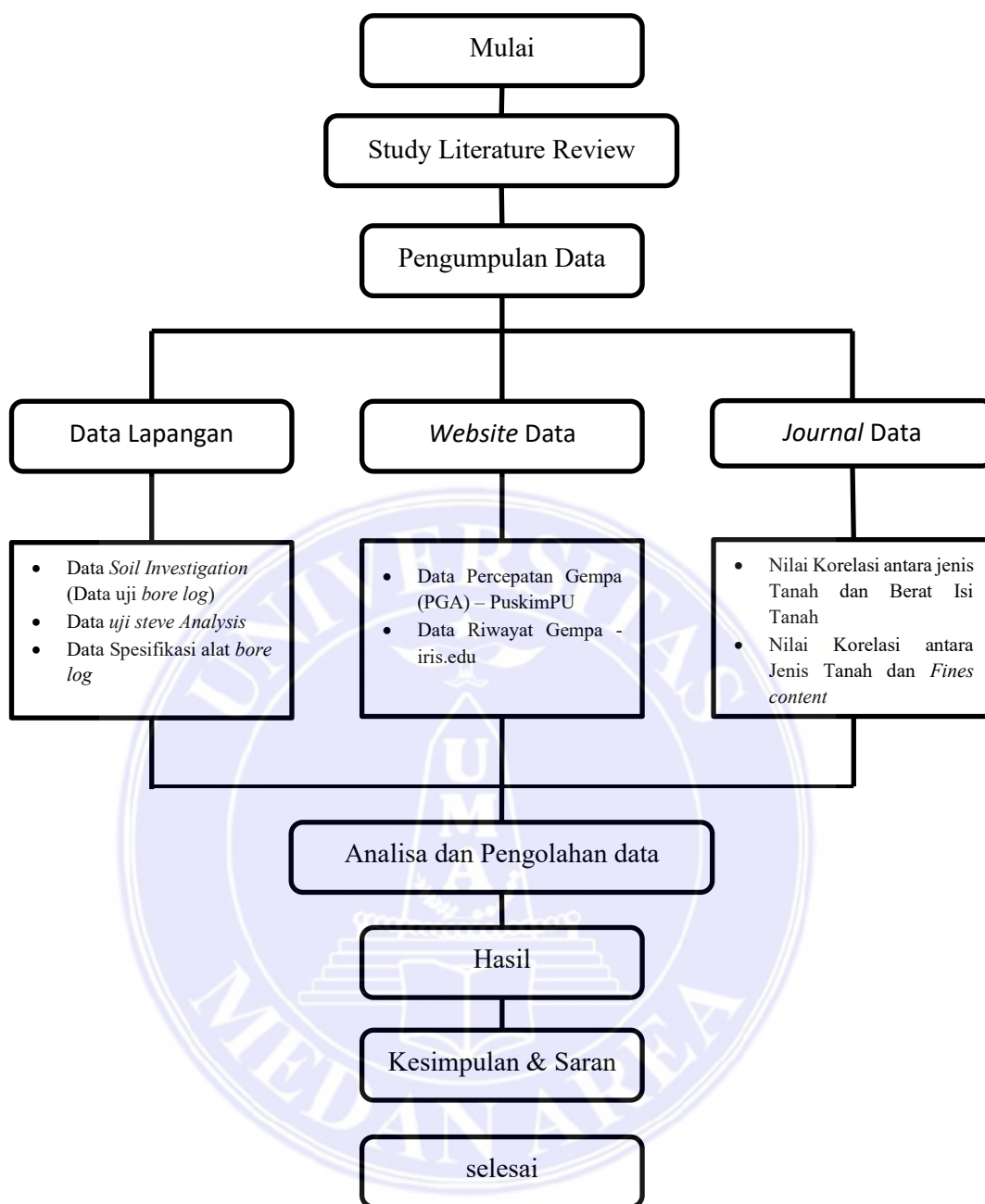
- a. Gambar lengkap (denah, potongan, detail-detail).
- b. Denah pondasi dan detail pondasi
- c. Data penyelidikan tanah yaitu data SPT.

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

3.3 Alur Penelitian

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





Gambar 14 Alur Penelitian (Data Penelitian(2025)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan perhitungan dan pembahasan di atas, Tujuan penelitian ini adalah untuk mengevaluasi potensi terjadinya likuifaksi tanah dengan mempertimbangkan kekuatan gempa, yaitu 5 SR, 5,5 SR, 6 SR, 6,5 SR, 7 SR dan 7,5 SR. Diperoleh kesimpulan bahwa lapisan semua lapisan tanah pada BH-1, BH-2, BH-3, dan BH-4 tidak mengalami likuifaksi dengan magnitudo 5 SR, 5,5 SR, 6 SR, 6,5 SR, 7 SR dan 7,5 SR. Dan juga berdasarkan Desain Spektra Indonesia Puskim PU jenis tanahnya lebih dominan berpasir (*sand*).

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 Rekayasa 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 2nd 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.

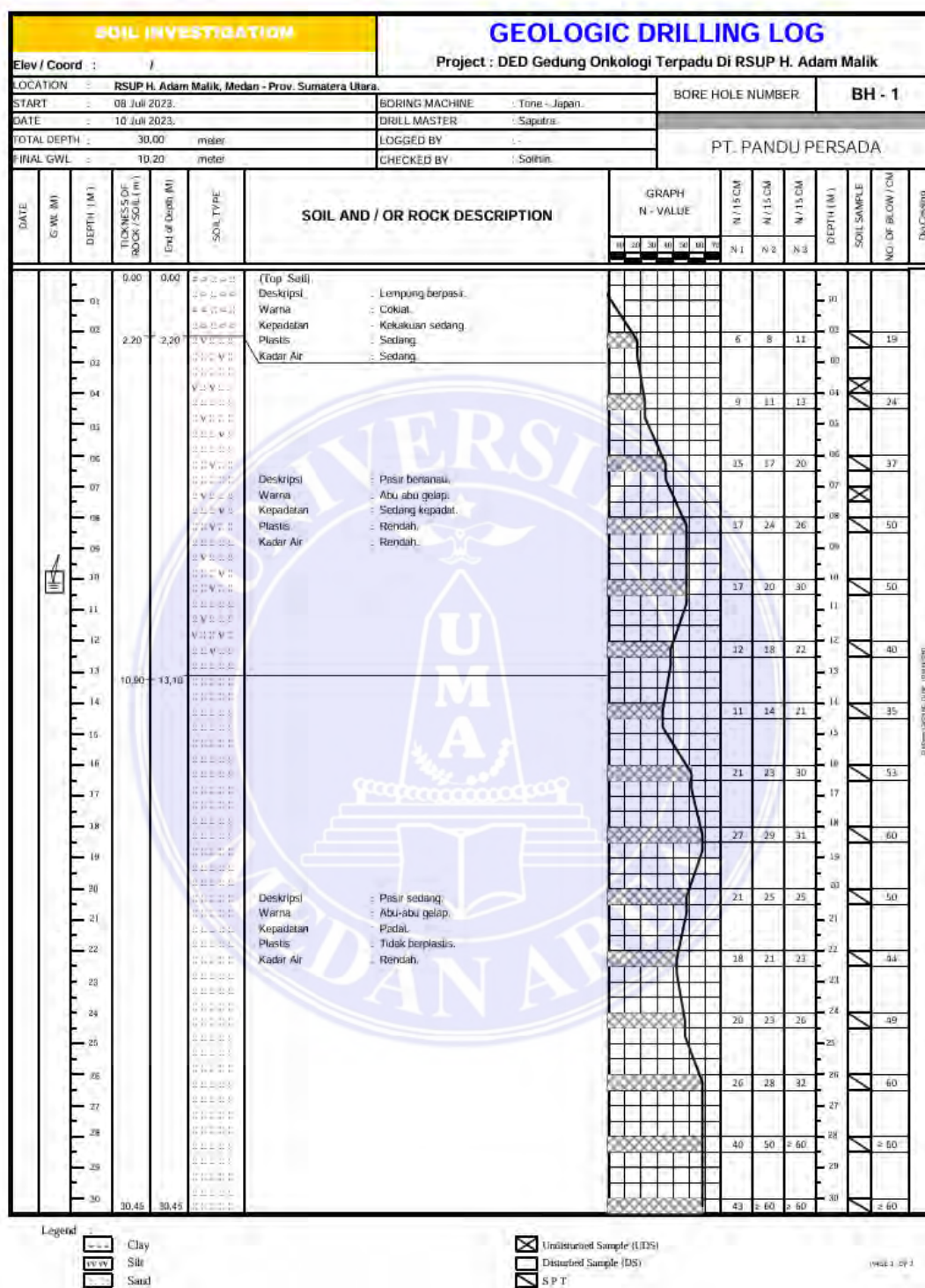
Ohoimas, M. Y., and Indra Noer Hamdhan. 2014. “Analisis Konsolidasi Dengan Menggunakan Metode Preloading Dan Vertical Drain Pada Areal Reklamasi Proyek Pengembangan Pelabuhan Belawan Tahap II.” Reka Racana Jurnal Online Institut Teknologi Nasional (x): 1–11.

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

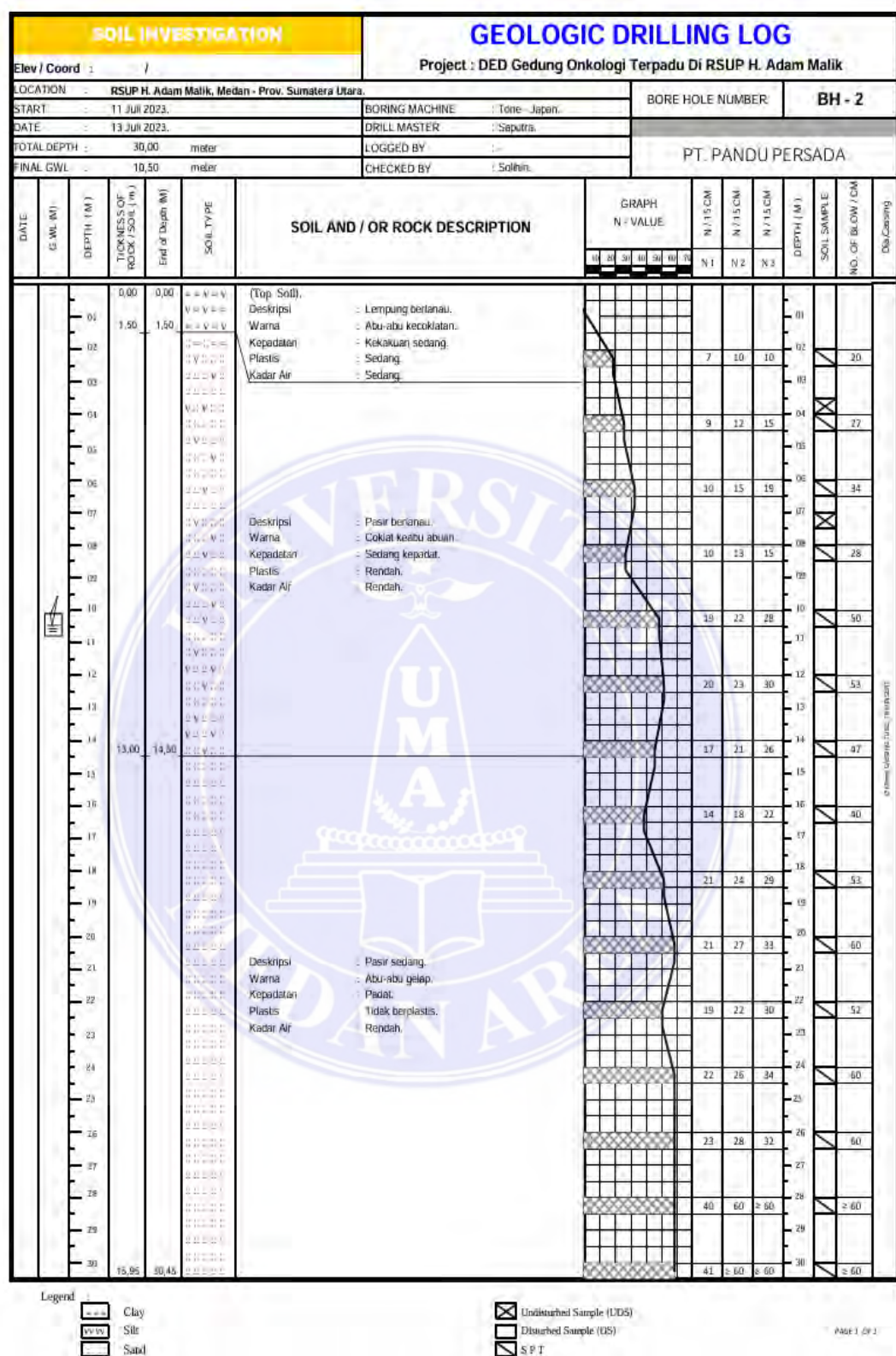
Putri, R., Tyagita, E., & Hayati, J. (2022). Analisis Perbaikan Tanah Lunak Metode Preloading dan Preloading Kombinasi Prefabricated Vertical Drain (PVD) dengan Variasi Panjang PVD (Studi Kasus : Pembangunan Jalan Tol. 2(February), 19–25.

Idriss, I.M., & Boulanger, R.W. (2008). Soil liquefaction during earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute.

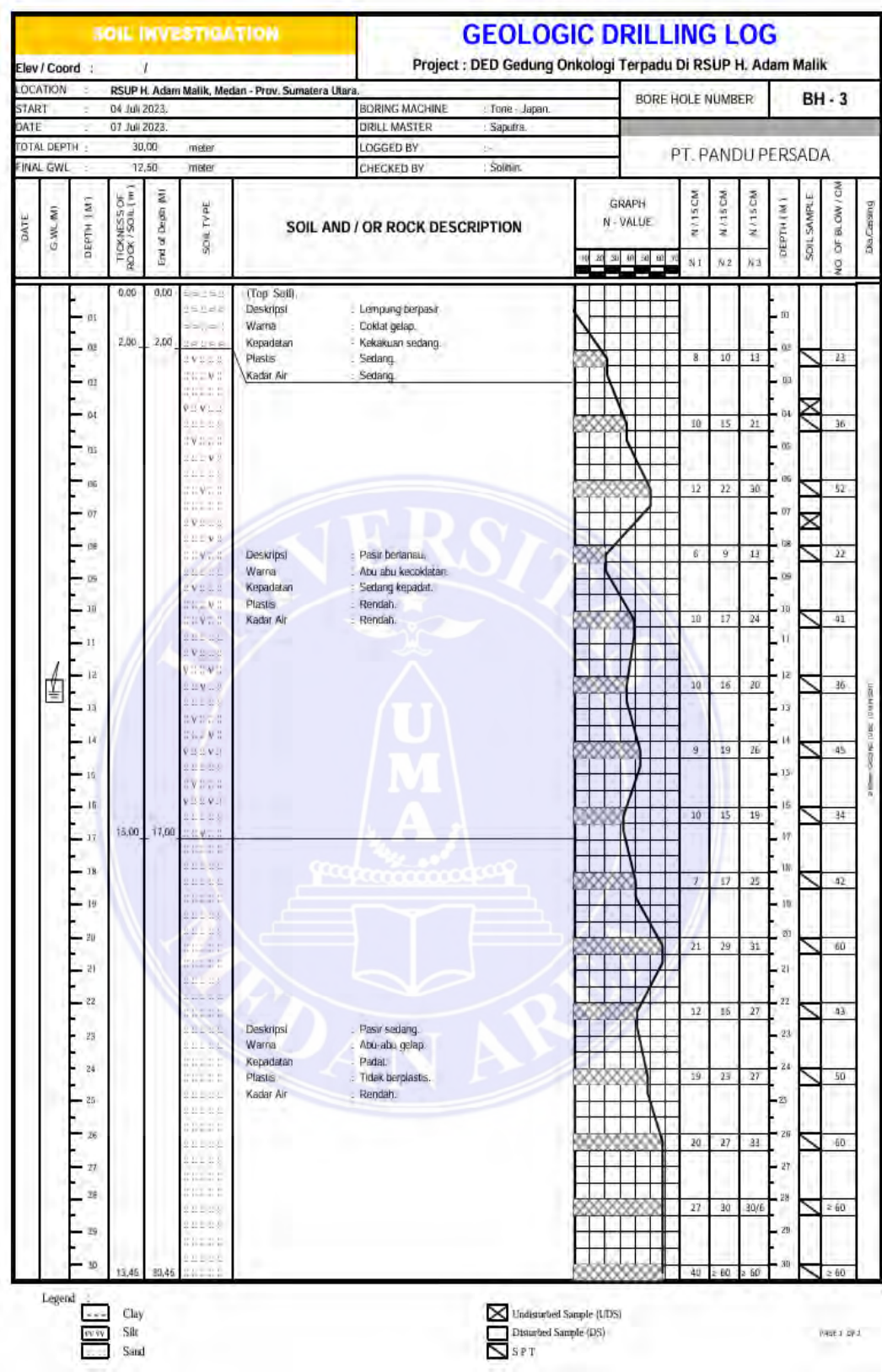
LAMPIRAN



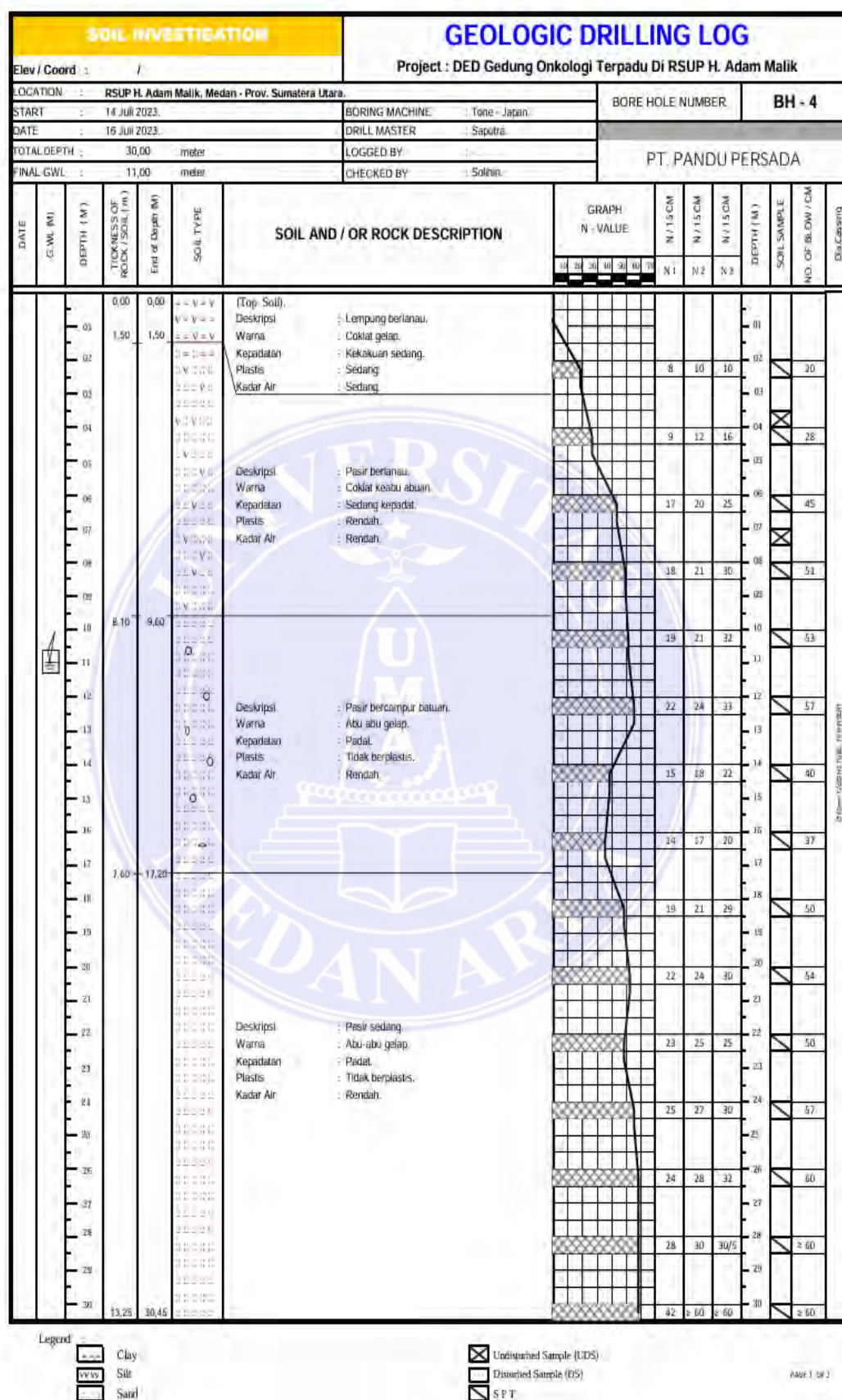
Lampiran 1. Bore log Pada BH-1



Lampiran 2. Bore log Pada BH-2



Lampiran 3. Bore log Pada BH-3



Lampiran 4. Bore log Pada BH-4