

**TUGAS AKHIR**

**ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI AKIBAT GEMPA  
BUMI MENGGUNAKAN DATA SPT (*STANDAR  
PENETRATION TEST*)  
(*ANALYSIS OF LIQUIFACTION POTENTIAL DUE TO  
EARTHQUAKE USING DATA OF STANDAR  
PENETRATION TEST (SPT)*)  
(Studi Kasus Pengujian Klasifikasi Tanah di 3 Titik Lokasi Universitas  
Gadjah Mada, Yogyakarta)**

**Diajukan Kepada Univeritas Islam Indonesia Yogyakarta Untuk Memenuhi  
Persyaratan Memperoleh Derajat Sarjana Teknik Sipil**



**FAISHOL FAIQ AMANULLAH  
17511167**

**PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK SIPIL  
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN  
UNIVERSITAS ISLAM INDONESIA  
2022**

## TUGAS AKHIR

# **ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI AKIBAT GEMPA BUMI MENGGUNAKAN DATA SPT (*STANDAR PENETRATION TEST*) (*ANALYSIS OF LIQUIFACTION POTENTIAL DUE TO EARTHQUAKE USING DATA OF STANDAR PENETRATION TEST (SPT)*)**

**(Studi Kasus Pengujian Klasifikasi Tanah di Universitas Gadjah Mada,  
Yogyakarta)**

Disusun oleh:

**Faishol Faiq Amanullah  
17511167**

Telah diterima sebagai salah satu persyaratan untuk  
memperoleh derajat Sarjana Teknik Sipil

Diuji pada tanggal 3 Agustus 2022  
Oleh Dewan Penguji

**Pembimbing**

**Penguji I**

**Penguji II**

**Hanindya Kusuma A, S.T., M.T.**  
NIK : 045110407

**Dr. Ir. Edy Purwanto, CES., DEA.**  
NIK : 855110101

**Muhammad Rifqi A, S.T., M.Eng.**  
NIK : 135111101

Mengesahkan,  
Ketua Program Studi Teknik Sipil

**Dr. Ir. Sri Amini Yuni Astuti, M.T.**  
NIK : 885110101

## PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI

Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa laporan Tugas Akhir yang saya susun sebagai syarat untuk memenuhi salah satu persyaratan pada Program Studi Teknik Sipil Universitas Islam Indonesia seluruhnya merupakan hasil karya saya sendiri. Adapun bagian-bagian tertentu dalam penulisan laporan Tugas Akhir yang saya kutip dari hasil karya orang lain telah dituliskan dalam sumbernya secara jelas sesuai norma, kaidah, dan etika penulisan karya ilmiah. Apabila di kemudian hari ditemukan seluruh atau sebagian laporan Tugas Akhir ini bukan hasil karya saya sendiri atau adanya plagiasi dalam bagian-bagian tertentu, saya bersedia menerima sanksi, termasuk pencabutan gelar akademik yang saya sandang sesuai dengan perundang-undangan yang berlaku.

Yogyakarta, 18 April 2022

Yang membuat pernyataan,



Faishol Faiq Amanullah  
(17511167)

## LEMBAR DEDIKASI

*Bismillahirrahmanirrahim*

Tugas Akhir ini saya dedikasikan untuk almarhum kedua orang tua yang sangat saya cintai, Istri, keluarga, dosen, sahabat, teman-teman teknik sipil 2017 dan semua pihak yang telah sangat membantu saya dalam menyusun skripsi saya.

## KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadiran Allah SWT, sehingga penyusun dapat menyelesaikan Tugas Akhir ini dengan sebaik-baiknya. *Shalawat* serta salam senantiasa tercurahkan kepada junjungan Rasulullah Muhammad SAW, keluarga, sahabat serta pengikut beliau hingga *yaumul akhir*.

Atas kelancaran selama menyusun tugas akhir ini, penulis mengucapkan terimakasih sebesar-besarnya kepada:

1. Ibu Hanindya Kusuma Artati, S.T., M.T., selaku Dosen Pembimbing Tugas Akhir, atas bimbingan dan nasehat serta dukungan yang diberikan kepada penulis selama menyusun tugas akhir ini.
2. Bapak Dr. Ir. Edy Purwanto, CES., DEA dan Bapak Muhammad Rifqi A , S.T., M.Eng. Selaku Dosen Penguji
3. Ibu Dr. Ir. Sri Amini Yuni Astuti, MT., selaku Ketua Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan, Universitas Islam Indonesia.
4. Bapak H. Suparto (alm) dan Ibu HJ. Busripah (alm), kedua orang tua yang telah bekerja keras dan dengan semua dukungan moral, Material dan sebagainya
5. Istri saya Titian Arya Prasetyo yang sudah memberi semangat yang tak henti-hentinya dalam menyelesaikan skripsi.
6. Sahabat saya terkhusus Akadskuy, Kenken, Bagus, Dyah, Brian, yang membantu dan memberi semangat dan Teman-teman Teknik Sipil 2017.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa tugas akhir ini masih jauh dari sempurna, dan akhirnya penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi berbagai pihak yang membacanya.

Yogyakarta, 18 April 2022  
Penulis,

Faishol Faiq Amanullah  
17511167

## DAFTAR ISI

Halaman Judul	i
Lembar Pengesahan	ii
PERNYATAAN BEBAS PLAGIASI	iii
LEMBAR DEDIKASI	iv
KATA PENGANTAR	v
DAFTAR ISI	vi
DAFTAR TABEL	vii
DAFTAR GAMBAR	x
DAFTAR LAMPIRAN	xii
DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN	xiii
ABSTRAK	xiv
<i>ABSTRACT</i>	xv
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Penelitian	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Penelitian Terdahulu	4
2.2 Perbandingan dengan penelitian sebelumnya	7
BAB III LANDASAN TEORI	10
3.1 Definisi Tanah	10
3.1.1 Klasifikasi Tanah USCS	10
3.1.2 Sifat Fisis Tanah dan Mekanika Tanah	13
3.2 Gempa Bumi	20
3.2.1 Parameter Gempa	23
3.3 Likuifaksi	25

3.3.1 Definisi Likuifaksi	26
3.3.2 Metode Analisis Potensi Likuifaksi	29
3.3.3 Liquifaction Potential Index (LPI)	32
3.3.4 Analisis Potensi Likufaksi Berdasarkan Data SPT	33
3.3.5 Metode (Seed et al., 1976)	33
3.3.6 Metode (Youd & Idriss, 1970)	34
<b>BAB IV METODE PENELITIAN</b>	<b>38</b>
4.1 Tahapan Penelitian	38
4.2 Analisis Data	38
4.2.1 Analisis Data SPT	39
4.3 Bagan Alir Penelitian (Flowchart)	39
<b>BAB V DATA, ANALISIS, DAN PEMBAHASAN</b>	<b>42</b>
5.1 Data Test Lapangan N-SPT	42
5.2 Penentuan Nilai Percepatan Gempa di Permukaan Tanah	44
5.3 Analisis Likuifaksi Metode SPT (Standard Penetration Test)	46
5.3.1 Perhitungan Nilai Cyclic Stress Ratio (CSR) Setiap Lapisan Tanah	46
5.3.2 Perhitungan Nilai Cyclic Resistant Ratio (CRR) Setiap Lapisan Tanah	48
5.4 Analisis Likuifaksi Metode HBF (2012)	50
5.5 Analisis Likuifaksi Metode Boulanger and Idriss (2014)	51
5.6 Pembahasan	54
5.6.1 Cyclic Resistance Ratio dan Cyclic Stress Ratio Magnitude Scale 7,5 (MW)	54
5.6.2 Pengaruh Moment Magnitude Scale 7,5 (MW)	56
5.6.3 Cyclic Resistance Ratio dan Cyclic Stress Ratio Magnitude Scale 6,5 (MW)	58
5.6.4 Cyclic Resistance Ratio dan Cyclic Stress Ratio Magnitude Scale 8,5 (MW)	61
5.6.5 Pengaruh Moment Magnitude Scale 8,5 (MW)	63
<b>BAB VI KESIMPULAN DAN SARAN</b>	<b>67</b>
6.1 Kesimpulan	67

6.2 Saran	67
DAFTAR PUSTAKA	68
LAMPIRAN	71





## DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian ini	8
Tabel 3.1 Sistem Klasifikasi USCS	12
Tabel 3.2 Nilai Indeks Plastisitas dan Macam Tanah	20
Tabel 3.3 Kekuatan Gempa Bumi Berdasarkan Kelas	24
Tabel 3.4 Kriteria Likuifaksi Menurut Beberapa Ahli	29
Tabel 3.5 Nilai Kekuatan Tanah Berdasarkan <i>Liquifaction Potential Index</i> (LPI)	33
Tabel 3.6 Potensi Kerusakan Akibat Likuifaksi Berdasarkan N-SPT	34
Tabel 3.7 Faktor Koreksi N-SPT	36
Tabel 5.1 Propertis Tanah Titik Bor BH-01	44
Tabel 5.2 Propertis Tanah Titik Bor BH-02	44
Tabel 5.3 Propertis Tanah Titik Bor BH-04	44
Tabel 5.4 Rekapitulasi Analisis Potensi Likuifaksi untuk titik BH-01 dengan metode NCEER (2001), HBF (2012), dan Boulanger & Idriss (2014)	52
Tabel 5.5 Rekapitulasi Analisis Potensi Likuifaksi untuk titik BH-02 dengan metode NCEER (2001), HBF (2012), dan Boulanger & Idriss (2014)	52
Tabel 5.6 Rekapitulasi Analisis Potensi Likuifaksi untuk titik BH-04 dengan metode NCEER (2001), HBF (2012), dan Boulanger & Idriss (2014)	53

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 3.1 Diagram Plastisitas ASTM	13
Gambar 3.2 Batas-batas konsistensi tanah ( <i>atterberg</i> )	17
Gambar 3.3 Kurva Penentuan Batas Cair pada Tanah Lempung	18
Gambar 3.4 Lempeng Tektonik Indonesia	20
Gambar 3.5 Batas Divergen ( <i>Divergent Boundary</i> )	22
Gambar 3.6 Batas Konvergen ( <i>Convergent Boundariefy</i> )	22
Gambar 3.7 Batas Transform ( <i>Transform Boundary</i> )	23
Gambar 3.8 Peta Wilayah Gempa Indonesia	25
Gambar 3.9 Proses Terjadinya Likuifaksi	26
Gambar 3.10 Faktor Reduksi Tegangan dan Kedalaman	31
Gambar 3.11 Grafik Hubungan Antara $(N1)_{60}$ dengan nilai CRR	34
Gambar 5.1 Data N-SPT titik BH-01 <i>Soil Investigation</i> UGM Yogyakarta	42
Gambar 5.2 Data N-SPT titik BH-02 <i>Soil Investigation</i> UGM Yogyakarta	43
Gambar 5.3 Data N-SPT titik BH-04 <i>Soil Investigation</i> UGM Yogyakarta	43
Gambar 5.4 Grafik Sebaran CRR dan CSR Pada Mw 7,5	54
Gambar 5.5 Grafik Sebaran CRR dan CSR Mw 7,5	55
Gambar 5.6 Grafik Sebaran CRR dan CSR Mw 7,5	55
Gambar 5.7 Potensi Likuifaksi Pada Magnitudo 7,5 di Titik BH-01	56
Gambar 5.8 Potensi Likuifaksi Pada Magnitudo 7,5 di Titik BH-02	57
Gambar 5.9 Potensi Likuifaksi Pada Magnitudo 7,5 di Titik BH-04	57
Gambar 5.10 Grafik Sebaran CRR dan CSR Pada Mw 6,5	58
Gambar 5.11 Grafik Sebaran CRR dan CSR Pada Mw 6,5	59
Gambar 5.12 Grafik Sebaran CRR dan CSR Pada Mw 6,5	59
Gambar 5.13 Pengaruh Likuifaksi Pada Magnitudo 6,5 di Titik BH-01	60
Gambar 5.14 Potensi Likuifaksi Pada Magnitudo 6,5 di Titik BH-02	60
Gambar 5.15 Potensi Likuifaksi Pada Magnitudo 6,5 di Titik BH-04	61
Gambar 5.16 Grafik Sebaran CRR dan CSR Pada Mw 8,5	62
Gambar 5.17 Grafik Sebaran CRR dan CSR Pada Mw 8,5	62

Gambar 5.18 Grafik Sebaran CRR dan CSR Pada Mw 8,5	63
Gambar 5.19 Potensi Likuifaksi Pada Magnitudo 8,5 di Titik BH-01	64
Gambar 5.20 Potensi Likuifaksi Pada Magnitudo 8,5 di Titik BH-02	64
Gambar 5.21 Potensi Likuifaksi Pada Magnitudo 8,5 di Titik BH-04	65



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1 Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017

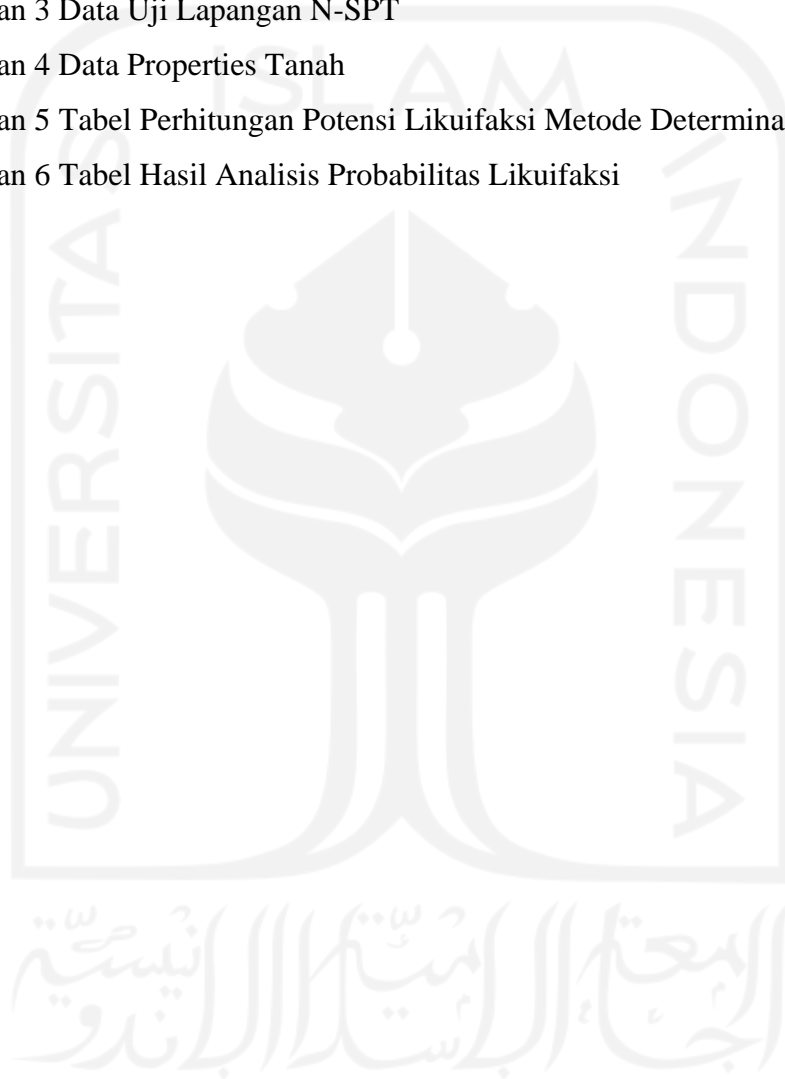
Lampiran 2 Peta Titik Lokasi Data Sampel

Lampiran 3 Data Uji Lapangan N-SPT

Lampiran 4 Data Properties Tanah

Lampiran 5 Tabel Perhitungan Potensi Likuifaksi Metode Determinan

Lampiran 6 Tabel Hasil Analisis Probabilitas Likuifaksi



## DAFTAR NOTASI DAN SINGKATAN

ASTM	= <i>American Society for Testing and Material</i>
CN	= Faktor normalisasi $N_m$ terhadap tegangan overburden
CSR	= <i>Cyclic Shear Ratio</i>
CRR	= <i>Cyclic Resistance Ratio</i>
$CRR_{\sigma'_{vc}}$	= CRR dari tanah dibawah nilai spesifik dari nilai
$CRR_{\sigma'_{vc}=1}$	= Nilai CRR dari tanah yang sama dengan $\sigma'_{vc} = 1$ atm
FS	= <i>Factor of safety</i>
FC	= <i>Fine Content</i>
$F_{PGA}$	= koefisien situs
$K_{\sigma}$	= <i>overburden correction factor</i>
M	= Momen magnitudo
PGA	= Peak Ground Acceleration / $a_{max}$
MSF	= Magnitude Scale Factor
NCEER	= National Centre for Earthquake Engineering Research
n	= Eksponen
$N_m$	= Nilai pembacaan SPT
$PGA_M$	= $MCE_G$ percepatan tanah puncak yang disesuaikan dengan pengaruh klasifikasi situs
PGA	= percepatan tanah puncak terpetakan
SPT	= <i>Standart Penetration Test</i>
z	= Kedalaman lapisan dalam meter
$\alpha_{max}$	= Percepatan maksimum disetiap lapisan tanah ( $Kg/cm^2$ )
$\sigma_{vc}$	= Pekanan vertikal total lapisan tanah saat konsolidasi ( $Kg/cm^2$ )
$\sigma'_{vc}$	= tekanan vertikal efektif lapisan tanah saat konsolidasi ( $Kg/cm^2$ )
$\sigma_v$	= tekanan vertikal total pada kedalaman z
$\gamma$	= rata-rata berat jenis tanah yang berada di atas kedalaman z
$(N_1)_{60}$	= Nilai N SPT terkoreksi
$(N_1)_{60cs}$	= $(N_1)_{60}$ penyetaraan nilai clean sand

## ABSTRAK

Terjadinya gempa bumi akan mengakibatkan kerusakan pada struktur bangunan maupun kerusakan pada struktur tanah. Salah satu kerusakan pada struktur tanah adalah likuifaksi. Likuifaksi merupakan suatu proses atau kejadian berubahnya keadaan tanah dari keadaan padat menjadi keadaan cair akibat naiknya tekanan air pori dan turunnya tekanan efektif dari lapisan tanah akibat beban siklis dinamis. Peristiwa ini akan berpengaruh terhadap struktur di atasnya terlebih jika terjadi pada tanah berpasir yang jenuh. Tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis besarnya probabilitas likuifaksi berdasarkan data N-SPT, serta menganalisis hubungan antara parameter tanah dan gempa terhadap nilai probabilitas likuifaksi. Pada penelitian ini, penulis mengambil studi kasus pada Proyek Pembangunan *Yogyakarta International Airport* (YIA).

Metode perhitungan analisis potensi likuifaksi diawali dengan menggunakan persamaan-persamaan yang disarankan oleh *National Center for Earthquake Engineering Research* (NCEER) USA yaitu berdasarkan data N-SPT untuk melihat secara deterministik potensi likuifaksi. Kemudian dilanjutkan dengan metode probabilitas yang diusulkan oleh Haldar & Tang (1979) berdasarkan nilai rasio tahanan siklik dari tanah (CRR), nilai rasio tekanan siklik beban gempa (CSR), serta koefisien variansi nilai CRR dan CSR. Selain itu digunakan juga metode probabilitas yang diusulkan oleh Hwang dkk (2004), Sonmez & Gokceoglu (2005), dan Juang dkk (2004) dengan pendekatan empiris berdasarkan angka keamanan (FS).

Hasil analisis menunjukkan bahwa lokasi penelitian merupakan kawasan yang berpotensi likuifaksi dengan tingkat bahaya hampir pasti likuifaksi atau probabilitas diatas 85 % berada pada kedalaman 1,36 m – 12 m. Hubungan parameter tanah terhadap probabilitas adalah pertambahan nilai N-SPT berkorelasi dengan meningkatnya nilai CRR. Selanjutnya pertambahan nilai CRR menyebabkan penurunan nilai probabilitas. Probabilitas likuifaksi diatas 85% terjadi pada rentang nilai N-SPT 0-20, sedangkan dibawah 85% terjadi pada rentang nilai N-SPT 20-50. Pertambahan nilai magnitudo gempa berkorelasi dengan tingginya nilai probabilitas likuifaksi, pada magnitudo gempa 6,5 SR nilai CRR lebih besar dibandingkan nilai CRR pada skala magnitudo 7,5 SR dan 8,5 SR. Semakin besar nilai CRR maka semakin kecil probabilitas likuifaksi.

**Kata kunci:** Likuifaksi, data N-SPT, Probabilitas, Magnitudo gempa

## ABSTRACT

*The occurrence of an earthquake will cause damage to the building structure and damage to the soil structure. One of the damages to the soil structure is liquefaction. Liquefaction is a process or event that changes the state of the soil from a solid state to a liquid state due to increased pore water pressure and decreased effective pressure of the soil layer due to dynamic cyclic load. This event will affect the structure above, especially if it occurs in saturated sandy soils. The purpose of this study is to analyze the probability liquefaction based on N-SPT, and to analyze the relationship between soil and seismic parameters with the probability of liquefaction. In this study, the author took a case study on the Yogyakarta International Airport (YIA) Development Project.*

*The calculation method of liquefaction potential analysis begin by using equations suggested by the National Center for Earthquake Engineering Research (NCEER) USA based on N-SPT data to determine the liquefaction potential deterministically. Then continued with the probability calculation method proposed by Haldar & Tang (1979) based on the value of the cyclic resistance ratio (CRR) of the land, the value of the cyclic stress ratio (CSR) of earthquake loads, as well as the coefficient of variance values CRR and CSR. In addition, the probability calculation method proposed by Hwang et al (2004), Sonmez & Gokceoglu (2005), and Juang et al (2004) with an empirical approach based on factor of safety (FS).*

*The results of the analysis show that the research location is a potential liquefaction area with a level of danger that is almost certain that it will liquefy or a probability of above 85% at a depth of 1,36 m - 12 m. The relationship of soil parameters on the probability is of N-SPT value correlated with the increase in the value of the CRR. Further more CRR value causes a decrease in the value of the probability of liquefaction. The probability of liquefaction above 85% occurs in the N-SPT value range of 0-20, while below 85% occurs at the N-SPT value of 20-50. The increase in the value of the earthquake magnitude correlates with the high probability value of liquefaction, at the earthquake magnitude of 6.5 SR, the CRR value is greater than the CRR value on a scale of 7.5 SR and 8.5 SR. The greater the CRR value, the smaller the liquefaction probability.*

**Keywords:** *Liquefaction, N-SPT data, Probability, Earthquake magnitude*

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara yang berada di jalur gempa teraktif di dunia karena dikelilingi oleh cincin api pasifik atau *ring of fire* dan terletak diatas tiga lempeng kerak bumi yakni lempeng Eurasia, lempeng Pasifik, dan lempeng indo-Australia sehingga Indonesia memiliki tingkat kerawanan gempa bumi cukup tinggi. Wilayah yang paling rawan untuk terjadi gempa yaitu Aceh, Sumatra Barat, Sumatra Timur, Bengkulu, Lampung, Jawa Tengah, Jawa Barat, Yogyakarta, Jawa Timur, Bali, Nusa Tenggara, Sulawesi, Maluku, Maluku Utara dan Papua. Diantara resiko-resiko yang disebabkan oleh terjadinya gempa bumi bukan hanya resiko korban jiwa namun terjadi juga kegagalan struktur bangunan, namun juga resiko kegagalan yang terjadi pada struktur tanah yang mendukung bangunan diatasnya. Terjadinya Kerusakan-kerusakan pada struktur tanah diantaranya terjadi penurunan (*settlement*), jatuhnya batuan (*rock fall*), tanah longsor dan kerusakan yang berhubungan dengan keseimbangan lereng (*land slide and slope stability*) dan likuifaksi (*liquefaction*).

Likuifaksi adalah suatu peristiwa perubahan fase padat menjadi fase cair yang disebabkan oleh meningkatnya tekanan air pori dalam rongga. Dampak dari terjadinya peningkatan tekanan air pori, tanah akan kehilangan kekuatan geser secara drastis akibat air pori tanah. turunnyanya tegangan efektif saat likuifaksi berlangsung, kekuatan tanah menurun dan kemampuan deposit tanah untuk menahan beban juga menurun. Kejadian ini berkaitan dengan kondisi tanah pasir jenuh yang memiliki kepadatan lepas atau sedang (Idriss and Boulanger)

Beberapa faktor yang berpengaruh terhadap potensi likuifaksi tanah antara lain adalah jenis tanah, kerapatan relatif, tekanan batas, intensitas gempa dan durasi gempa. Untuk Mengetahui potensi bahaya likuifaksi di suatu daerah Terdapat beberapa metode analisis likuifaksi yang telah ada, analisis kondisi bawah permukaan tanah, agar menjadi pertimbangan untuk mengambil keputusan apakah



daerah tersebut aman atau berbahaya bagi warga setempat. salah satunya adalah metode analisis menggunakan data pengujian lapangan SPT (*Standar Penetration Test*)

Dari uraian-uraian diatas penulis mengambil judul I Tugas Akhir ini “Analisis Potensi Likuifaksi Akibat Gempa Bumi Menggunakan Metode SPT (*Standar Penetration Test*) 3 titik lokasi Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta. penelitian ini bertujuan untuk mengetahui apakah daerah 3 titik di Universitas Gadjah Mada aman tau berbahaya terjadi potensi Likuifaksi.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Bagaimana klasifikasi tanah pada 3 titik lokasi di UGM, Yogyakarta ?
2. Bagaimana perbandingan CRR dan CSR pada 3 titik lokasi di UGM Yogyakarta?
3. Bagaimana potensi likuifaksi pada tanah dari hasil pengujian metode SPT (*Standar Penetration Test*) di 3 titik lokasi di UGM, Yogyakarta ?
4. Bagaimana hubungan N-SPT dengan Potensi Likuifaksi di 3 titik lokasi UGM, Yogyakarta ?
5. Bagaimana hubungan perbandingan magnitude gempa berbeda dengan potensi likuifaksi di 3 titik lokasi UGM, Yogyakarta ?

## **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mengetahui klasifikasi tanah pada 3 titik lokasi di UGM, Yogyakarta.
2. Mengetahui perbandingan CRR dan CSR pada 3 titik lokasi di UGM Yogyakarta
3. Mengetahui potensi likuifaksi pada tanah dari hasil pengujian metode SPT (*Standar Penetration Test*) di 3 titik lokasi di UGM, Yogyakarta.
4. Mengetahui hubungan N-SPT dengan Potensi Likuifaksi di 3 titik lokasi UGM, Yogyakarta
5. Mengetahui hubungan perbandingan magnitude gempa berbeda dengan potensi

likuifaksi di 3 titik lokasi UGM, Yogyakarta

#### **1.4 Manfaat Penelitian**

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut.

1. Mendapatkan gambaran kondisi keadaan tanah lokasi penelitian terhadap potensi likuifaksi.
2. Menambah pengetahuan mengenai bahaya likuifaksi bagi masyarakat umum.
3. Sebagai bahan pertimbangan dalam kegiatan perencanaan bangunan sipil.

#### **1.5 Batasan Penelitian**

Agar penelitian ini dapat berjalan secara sistematis maka permasalahan yang ada perlu dibatasi dengan batasan-batasan sebagai berikut.

1. Tanah yang digunakan adalah tanah yang berasal dari *Soil Investigation* Fakultas Hukum UGM, Fakultas Peternakan UGM, dan Fakultas Pertanian UGM.
2. Data tanah yang digunakan adalah data tanah hasil pengujian Laboratorium hasil *Soil Investigation* Fakultas Hukum UGM, Fakultas Peternakan UGM, dan Fakultas Pertanian UGM.
3. Sampel tanah yang digunakan adalah tanah kondisi terganggu.
4. Menganalisis potensi likuifaksi menggunakan data SPT dari *Soil Investigation* Fakultas Hukum UGM, Fakultas Peternakan UGM, dan Fakultas Pertanian UGM.
5. Variasi Magnitudo Gempa yang digunakan adalah 6,5 SR, 7,5 SR dan 8,5 SR

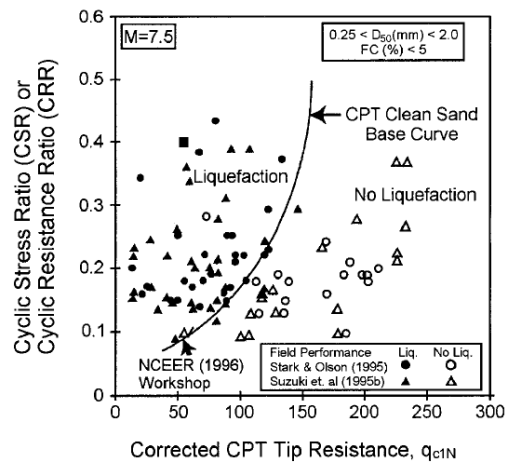
## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Penelitian Terdahulu**

Peninjauan terhadap penelitian terdahulu bertujuan untuk menemukan hal-hal yang relevan yang terkait dengan penelitian yang akan dilakukan oleh penulis. Dengan adanya peninjauan terhadap penelitian terdahulu, penulis dapat melakukan komparasi obyek penelitian sehingga tidak terjadi pengulangan penelitian yang akan dilakukan. Adapun beberapa hasil penelitian yang pernah dilakukan adalah sebagai berikut.

2.1.1 Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Hutagalung & Tarigan (2019) yang berjudul “Analisis Potensi Likuifaksi Akibat Gempa (Studi Kasus : Reklamasi Pelabuhan Kontainer Belawan Fase-2)” menyimpulkan Salah satu dampak gempa bumi adalah hilangnya kekuatan tanah akibat tekanan siklik yang disebut likuifaksi. Pencairan biasanya terjadi pada pasir lepas. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk mengetahui potensi likuifaksi pada proyek yang diamati yaitu proyek reklamasi. Gunakan prosedur yang disederhanakan untuk menganalisis potensi likuifaksi. Pertama, menentukan nilai percepatan puncak batuan dasar di wilayah studi sesuai dengan peta bencana gempa bumi Indonesia 2010. Kedua, mengumpulkan data tanah berdasarkan uji CPT (*Cone Penetration Test*). Berdasarkan data tersebut, pada saat lapisan tanah berpindah dari batuan dasar ke permukaan tanah, dapat ditemukan nilai percepatan (amplifikasi / penurunan) pada setiap lapisan tanah. Dengan membandingkan tegangan geser rata-rata yang disebabkan oleh percepatan gempa dengan tegangan efektif vertikal tiap lapisan tanah, dapat diperoleh rasio tegangan siklik.. Terakhir, hitung CRR (*Cyclic Resistant Ratio*) yang merupakan nilai ketahanan tanah terhadap pencairan. Berdasarkan nilai CRR dapat dilihat nilai penetrasi ujung konus yang terkoreksi ( $q_{cIN}$ ). dari Tiga parameter kemudian dihubungkan dalam grafik NCEER (*National Center of Earthquake Engineering Research*) 1996 untuk menilai lapisan tanah yang mana berpotensi mencair atau tidak selama gempa bumi.



**Gambar 2.1 Hubungan CSR/CRR dan  $q_{c1N}$**

(sumber : Seed *et al.*, 1985)

2.1.2 Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Tijow *et al.* (2018) yang berjudul “Analisis Potensi Likuifaksi Tanah Berdasarkan Data *Standart Penetration Test* (SPT) Studi Kasus: Dermaga Bitung, Sulawesi Utara” menyatakan bahwa 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 vertical 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 di Dermaga Bitung, Sulawesi Utara tidak memiliki lapisan tanah yang berpotensi terjadi likuifaksi.

2.1.3 Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Warouw, Manoppo, & Rondonuwu (2019) yang berjudul “Analisis Potensi Likuifaksi dengan Menggunakan Nilai SPT (Studi Kasus : Jembatan Ir. Soekarno Manado)” menyatakan bahwa Salah satu dampak yang disebabkan oleh gempa bumi adalah fenomena hilangnya daya dukung tanah akibat getaran gempa atau beban siklik yang disebut dengan peristiwa Likuifaksi. Peristiwa Likuifaksi dapat menyebabkan kerugian yang sangat besar pada proyek infrastruktur, dalam hal ini Jembatan Ir. Soekarno Manado menjadi lokasi evaluasi potensi Likuifaksi dengan menggunakan nilai uji Standar Penetrasi (SPT). Analisis potensi Likuifaksi bertujuan untuk mengetahui nilai factor keamanan terhadap Likuifaksi disetiap lapisan tanah di Jembatan Ir. Soekarno Manado, dengan membandingkan nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) yang adalah nilai tahanan tanah untuk menahan Likuifaksi dengan nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) yang merupakan ratio tegangan siklik yang terjadi pada tanah akibat gempa dan dapat menyebabkan Likuifaksi terjadi. Nilai factor keamanan (FS) harus melebihi nilai satu, Likuifaksi dapat terjadi jika nilai factor keamanan (FS) lebih kecil dari satu dan dikatakan kritis terhadap Likuifaksi jika factor keamanan (FS) sama dengan satu. Berdasarkan evaluasi potensi Likuifaksi dilakukan dengan kontrol faktor keamanan (FS) terhadap Likuifaksi pada gempa referensi yaitu dengan Moment Magnitude ( $M_w$ ) = 7.5, 7.6, 7.7, 8, 8.5, dan 9, percepatan gempa maksimum yang terjadi dipermukaan tanah ( $a_{max}$ ) PUSKIM = 0.622g dan kondisi muka air tanah yang dangkal. Maka didapati faktor keamanan (FS) pada Moment Magnitude ( $M_w$ ) = 7.5 hingga  $M_w$  = 8 tanah yang disekitar *Pylon* Jembatan Ir. Soekarno Manado aman terhadap Likuifaksi, dan pada  $M_w$  = 8.5 hingga  $M_w$  = 9, Likuifaksi dapat terjadi dilapisan I (0 m-10 m).

2.1.4 Berdasarkan data *Cone Penetration Test* (CPT) di Kelurahan Lempuing, Kota Bengkulu, Monalisa (2014) melakukan analisis potensi likuifaksi dengan metode probabilitas sederhana. Penelitian ini menggunakan analisis metode probabilitas Haldar dan Tang (1979) berdasarkan nilai rasio tahanan siklik dari tanah (CRR), nilai rasio tekanan siklik beban gempa (CSR), serta koefisien variansi nilai CRR dan CSR. Nilai tahanan terhadap beban siklik diperoleh dari hasil

pengujian CPT. Sedangkan nilai tekanan siklik (beban gempa) lokasi penelitian diperoleh dari nilai percepatan gempa berdasarkan Peta Zonasi Gempa Indonesia tahun 2010, dan nilai *magnitude* (M) yang didasarkan pada data riwayatkejadian gempa selama 40 tahun terakhir.

Monalisa (2014) mengambil kesimpulan bahwa hubungan parameter tanah terhadap probabilitas adalah penambahan nilai tahanan ujung konus ( $q_c$ ) akan berkorelasi dengan meningkatnya nilai CRR. Selanjutnya penambahan nilai CRR menyebabkan penurunan nilai probabilitas likuifaksi. Hubungan parameter gempa terhadap probabilitas adalah Pertambahan nilai PBA akan mengakibatkan bertambah besarnya CSR yang terjadi pada suatu deposit tanah pada kedalaman tertentu, begitu pula dengan *magnitude* gempa dimana pertambahannya akan mengakibatkan faktor koreksi *magnitude* yang bersesuaian dengan CSR dari tanah berkurang, penambahan salah satu nilai dari kedua variabel ini akan menyebabkan faktor keamanan terhadap bahaya likuifaksi menjadi lebih kecil sehingga mengakibatkan nilai probabilitas likuifaksi bertambah besar.

## **2.2 Perbandingan dengan penelitian sebelumnya**

Perbandingan penelitian yang akan dilakukan penulis dengan penelitian sebelumnya akan disajikan dalam Tabel 2.1 di halaman selanjutnya.

**Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian ini**

<b>Peneliti</b>	<b>Judul</b>	<b>Lokasi</b>	<b>Metode</b>	<b>Parameter yang diuji</b>	<b>Hasil</b>
Hutagalung & Tarigan (2019)	Analisis Potensi Likuifaksi Akibat Gempa	Pulau Reklamasi Pelabuhan Kontainer Belawan Fase-2	Menggunakan prosedur yang disederhanakan kemudian menggunakan data CPT ( <i>Cone Penetration Test</i> ) kemudian dihitung nilai CRR ( <i>Cyclic Resistance Ratio</i> ) dan CSR ( <i>Cyclic Stress Ratio</i> )	Parameter tanah, data CPT	Hasil berupa percepatan puncak pada batuan dasar berdasarkan peta hazard sebesar 0,213 g, parameter tanah, CPT-u kedalaman tanah mengalami likuifaksi
Tijow et al., (2018)	Analisis Potensi Likuifaksi Tanah Berdasarkan Data <i>Standart Penetration Test</i> (SPT)	Dermaga Bitung, Sulawesi Utara	Menggunakan data SPT kemudian dihitung nilai CSR ( <i>Cyclic Strss Ratio</i> ) dan CRR ( <i>Cyclic Resistance Ratio</i> )	Data parameter tanah, data SPT	Pemeriksaan jenis tanah dan menghitung percepatan gempa di batuan dasar, menghitung CRR dan CSR kemudian menghitung <i>Safety factor</i> (SF)

Sumber: Hutagalung & Tarigan (2019), Tijow et al (2018),

Lanjutan Tabel 2.1 Perbandingan Penelitian Terdahulu dengan Penelitian ini

Peneliti	Judul	Lokasi	Metode	Parameter yang diuji	Hasil
Warouw. Manoppo. & Rondonuwu, (2019)	Analisis Potensi Likuifaksi dengan Menggunakan Nilai SPT	Jembatan Ir. Soekarno, Manado	Menggunakan data SPT dihitung nilai CSR ( <i>Cyclic Strss Ratio</i> ), CRR ( <i>Cyclic Resistance Ratio</i> ) dan SF ( <i>Safety Factor</i> )	Data tanah, data gempa	Tegangan Tanah, nilai CSR, MSF, CRR dan <i>Safety Factor</i> (SF)
Monalisa, A (2014)	Analisis Potensi Likuifaksi dengan Metode Probabilitas Sederhana Berdasarkan Data <i>Cone Penetration Test</i> di Kelurahan Lempuing, Kota Bengkulu	Kelurahan Lempuing Kota Bengkulu	Analisis dengan metode probabilitas Haldar dan Tang (1979) berdasarkan nilai rasio tahanan siklik dari tanah (CRR), nilai rasio tekanan siklik beban gempa (CSR), serta koefisien variansi nilai CRR dan CSR	CRR dan CSR	Pertambahan nilai tahanan ujung konus ( $q_c$ ) akan berkorelasi dengan meningkatnya nilai CRR. Penambahan nilai CRR menyebabkan penurunan nilai probabilitas likuifaksi.
Penelitian yang akan dilakukan oleh Amanullah (2020)	Analisis Potensi Likuifaksi Akibat Gempa Bumi Menggunakan Metode SPT ( <i>Standar Penetrarion Test</i> ) dan CPT	3 titik lokasi di Kota Semarang, Jawa Tengah	Menggunakan data SPT ( <i>Standar Penetration Test</i> ) dan CPT ( <i>Cone Penetration Test</i> ) dan hasil akhir diperoleh nilai SF ( <i>Safety Factor</i> )	Data parameter tanah, data gempa data SPT dan CPT	Nilai dan grafik CSR dan CRR kemudian nilai <i>Safety Factor</i> (SF)

Sumber: Warouw, Manoppo, & Rondonuwu (2019), Monalisa, A (2014) Amanullah (2020)



## **BAB III**

### **LANDASAN TEORI**

#### **3.1 Definisi Tanah**

Menurut Hardiyatmo (2002) dalam Pengertiannya secara umum, tanah adalah bahan yang tersusun dari campuran butiran dengan atau tanpa kandungan bahan organik. butiran dapat dipisahkan dengan mudah dengan kecocokan dengan air. Tanah berasal dari batuan yang lapuk dan mungkin mengalami proses secara fisik atau proses kimiawi. Kecuali dipengaruhi oleh sifat induk batumannya, sifat teknis tanah juga akan dipengaruhi oleh faktor luar yang menyebabkan pelapukan batuan.

##### **3.1.1 Klasifikasi Tanah USCS**

Menurut Das (2012) Sistem klasifikasi tanah merupakan sistem yang mengatur beberapa jenis tanah yang berbeda-beda tetapi dengan karakteristik yang sama dan subkelompok berdasarkan penggunaan. Sistem klasifikasi berfungsi untuk menelaskan secara singkat sifat umum yang sangat bervariasi. Sistem klasifikasi yang ada dan Terutama dikembangkan berdasarkan karakteristik indeks tanah sederhana

Sistem klasifikasi USCS adalah klasifikasi yang diusulkan oleh A. Cassagrande pada tahun 1942 dan direvisi pada tahun 1952 oleh *The Corps of Engineers and the US Bureau of Reclamation*. Pada prinsipnya menurut metode ini tanah dibedakan menjadi dua jenis yaitu berbutir kasar dan berbutir halus.

1. Tanah berbutir kasar, yaitu: tanah kerikil dan pasir, dimana kurang dari 50% dari total berat total sampel tanah melewati ayakan No. 200. Simbol dalam kelompok ini dimulai dengan huruf G, adalah untuk (*gravel*) dan digunakan untuk kerikil, sedangkan S digunakan untuk (*Sand*) atau tanah berpasir.
2. Tanah berbutir halus, yaitu tanah di mana lebih dari 50% berat total sampel melewati saringan No. 200. Simbol kelompok ini dimulai dengan huruf M, yang berarti lanau (*silt*) anorganik, huruf C berarti tanah lempung (*clay*) anorganik, dan huruf O berarti lanau-organik dan organik lempung. Simbol PT digunakan untuk tanah gambut (*peat*), muck dan tanah lainnya dengan kandungan organik

tinggi.

Simbol-simbol lain yang digunakan dalam klasifikasi USCS, sebagai berikut:

- W = Tanah dengan gradasi baik (well graded)  
 P = Tanah dengan gradasi buruk (poorly graded)  
 L = Tanah dengan plastisitas rendah (low plasticity),  $LL < 50$   
 H = Tanah dengan plastisitas tinggi (high plasticity),  $LL > 50$

Tanah berbutir kasar ditandai dengan symbol seperti: GW, GP, GM, GC, SW, SP, SM, dan SC. Untuk klasifikasi yang benar harus diperhatikan factor berikut:

1. Presentase butiran yang lolos ayakan No.200 (fraksi halus)
2. Presentase fraksi kasar lolos ayakan No. 40
3. Koefisien keseragaman ( $C_u$ ) dan Koefisien gradasi ( $C_c$ ) untuk tanah dimana 0-12 % lolos ayakan No. 200
4. Batas cair (LL) dan indeks plastisitas (IP) bagian tanah yang lolos ayakan No. 40 (dimana untuk tanah 50 %, atau lebih yang lolos ayakan No. 200)

Jika persentase butir halus dengan simbol CL ML, MH, OL, CH dan OH didapat dengan cara menggambar batas cair dan indeks plastisitas tanah yang bersangkutan pada kurva plastisitas (*Cassagrande*, 1948) yang diberikan dalam Tabel 3.1. Garis diagonal pada bagan plastisitas terdapat garis A dan U, ditunjukkan pada Gambar 3.1 Garis A dan U tersebut diberikan dalam Persamaan 3.1 dan 3.2 sebagai berikut.

$$A \rightarrow PI = 0,73 (LL - 20) \quad (3.1)$$

$$B \rightarrow PI = 0,9 (LL - 8) \quad (3.2)$$

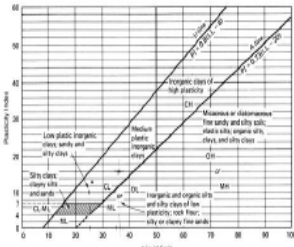
Keterangan:

PI = *Plasticity Index (%)*

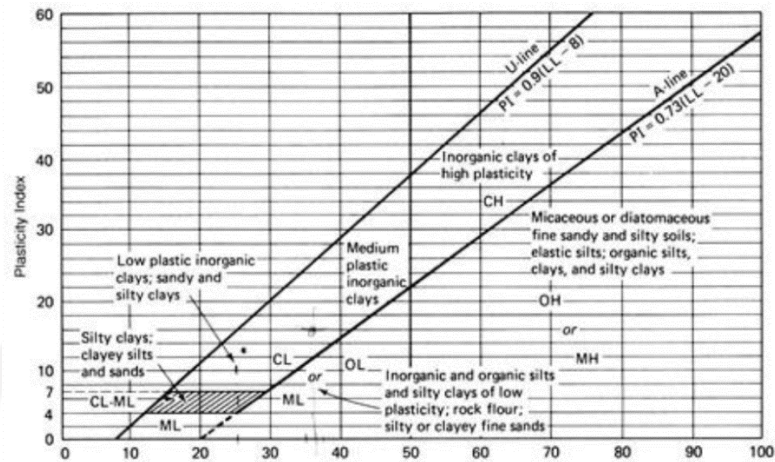
LL = *Liquid Limit (%)*

**Tabel 3.1 Sistem Klasifikasi USCS**

Divisi Utama	Simbol kelompok	Nama Umum	kriteria klasifikasi		
Tanah Berbutir Kasar Lebih dari 50% butiran tertahan pada ayakan No. 200	Kerikil lebih dari 50% fraksi kasar ayakan no. 4 tertahan	Kerikil bersih (hanya kerikil)	GW	$C_u = D_{60} / D_{10}$ lebih besar dari 4 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk GW	
		Kerikil dengan butiran halus	GP		
		Pasir dari 50% fraksi kasar lolos ayakan No. 4	Pasir bersih (hanya kerikil)	SW	$C_u = D_{60} / D_{10}$ lebih besar dari 6 $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ antara 1 dan 3 Tidak memenuhi kedua kriteria untuk SW
			Kerikil dengan butiran halus	SP	
	Pasir dari 50% fraksi kasar lolos ayakan No. 4	Kerikil dengan butiran halus	SM	Batas-batas atterberg dibawah garis A atau $PI < 4$ Batas-batas Atterberg di atas garis A atau $PI > 4$	
		Kerikil dengan butiran halus	SC		
	Tanah Berbutir Halus 50% atau lebih lolos ayakan No. 200	Lanau dan lempung Batas cair 50% atau kurang	ML	Lanau organik, pasir halus sekali, serbuk batuan, pasir halus berlanau atau berlempung	Klasifikasi berdasarkan presentasi butiran halus Kurang dari 5% lolos ayakan no. 200 GW, GP, SW, SP Lebih dari 12% lolos ayakan no. 200 GM, GC, SM, SC manual untuk identifikasi secara visual dapat dilihat ASTM designation D - 2488
			CL	Lempung organik dengan pastisitas rendah sampai dengan sedang, lempung berkerikil, lempung berpasir, lempung berlanau, lempung "kurus" (clean clay)	
			OL	Lanau-organik dan lempung berlanau organik dengan plastisitas rendah	
		Lanau dan lempung Batas cair lebih dari 50%	MH	Lanau-organik atau pasir halus diatomae atau lanau diatomae, lanau yang elastis	
CH			Lempung anorganik dengan pastisitas tinggi, lempung "gemuk" (fat clays)		
OH			Lempung organik dengan pastisitas sedang sampai dengan tinggi		
Tanah-tanah dengan kandungan organik sangat tinggi	PT	Peat (gambut), muck, dan tanah-tanah lain dengan kandungan organik tinggi			



(Sumber : ASTM, Casagrande)



**Gambar 3.1 Diagram Plastisitas ASTM**

(Sumber: ASTM, *Casagrande*)

### 3.1.2 Sifat Fisis Tanah dan Mekanika Tanah

Sifat fisik tanah yaitu sifat yang berkaitan dengan komponen mutu tanah yang ada. Sifat mekanis tanah merupakan ciri-ciri perilaku struktur tanah secara keseluruhan saat mengalami tekanan mekanis secara teknis.

#### 1. Distribusi Ukuran Butiran

Distribusi ukuran butiran tanah dapat digambarkan dengan kurva semi logaritma, di mana ordinat adalah persentase massa partikel yang lebih kecil dari ukuran absis yang diketahui. Semakin curam kurva distribusi, semakin besar rentang distribusinya; semakin curam kurva tersebut, semakin sempit rentang distribusinya. Tanah berbutir kasar digambarkan sebagai tanah yang bergradasi dengan baik jika tidak ada partikel berukuran jelas dalam rentang distribusinya dan masih ada partikel berukuran sedang. Secara umum, tanah dengan gradasi baik diwakili oleh kurva distribusi yang cembung dan halus. Tanah berbutir kasar didefinisikan sebagai tanah dengan gradasi yang buruk, jika ukurannya seragam atau jika tidak ada partikel berukuran sedang (ada lonjakan ukuran tanah). Ukuran partikel diplot (pada kurva) pada skala logaritmik sebagai absis.

Kurva distribusi ukuran partikel dapat digunakan untuk membandingkan berbagai jenis tanah. Selain itu, tiga parameter dasar dapat ditentukan dari kurva, yang dapat digunakan untuk mengklasifikasikan tanah berbutir kasar.

Parameter tersebut meliputi:

- a. Ukuran efektif (*effective size*)
- b. Koefisien keseragaman (*uniformly coefficient*)
- c. Koefisien Gradasi (*Coefficient of gradation*)

Diameter didalam kurva distribusi ukuran yang sesuai dengan 10% yang lebih halus (lolos ayakan) dalam kurva distribusi ukuran butir didefinisikan sebagai ukuran efektif atau D10. Koefisien keseragaman diberikan oleh Persamaan 3.3 Sebagai berikut

$$Cu = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (3.3)$$

Keterangan:

Cu = Koefisien keseragaman,

D60 = Diameter yang bersesuaian dengan 60 % lolos ayakan yang ditentukan dari kurva distribusi ukuran butiran, dan

D10 = Diameter yang bersesuaian dengan 10 % lolos ayakan yang ditentukan dari kurva distribusi ukuran butiran.

Koefisien gradasi dinyatakan sebagai berikut dapat dilihat pada Persamaan 3.4 sebagai berikut.

$$Cc = \frac{D_{30}^2}{D_{60} \cdot D_{10}} \quad (3.4)$$

Keterangan:

Cc = Koefisien gradasi

D30 = Diameter yang bersesuaian dengan 30 % lolos ayakan yang ditentukan dari kurva distribusi ukuran butiran

Semakin tinggi nilai Cu, maka semakin besat rentang distribusi tanah.

Tanah dengan gradasi baik biasanya memiliki nilai Cc antara 1-3.

## 2. Kadar Air

Kadar air (w) didefinisikan sebagai perbandingan antara berat dan berat air

Volume tanah yang diselidiki untuk butiran padat atau tanah. Perhitungan kadar air dapat dilihat pada Persamaan 3.5 sebagai berikut.

$$w = \frac{W_w}{W_s} \times 100 \% \quad (3.5)$$

Keterangan:

W = Kadar air

W<sub>w</sub> = Berat air

W<sub>s</sub> = Berat tanah kering

### 3. Berat Jenis Tanah

Berat jenis (G<sub>s</sub>) diartikan sebagai perbandingan antara berat butiran tanah dengan berat air suling dengan volume yang sama pada suhu tertentu. Berat butir Tanah adalah rasio berat butir terhadap isi butir. Kadar air berat Merupakan perbandingan antara berat air dan isi air. Berat jenis tanah dapat dihitung dengan Persamaan 3.6 sebagai berikut.

$$G_s = \frac{\gamma_s}{\gamma_w} = \frac{W_s}{V_w \times \gamma_w} = \frac{(W_2 - W_1)}{(W_4 - W_1) - (W_3 - W_2)} \quad (3.6)$$

Keterangan:

G<sub>s</sub> = Berat Jenis Tanah

γ<sub>s</sub> = Berat volume butiran

γ<sub>w</sub> = Berat volume air

V<sub>w</sub> = Volume air

W<sub>1</sub> = Berat piknometer

W<sub>2</sub> = Berat piknometer + tanah

W<sub>3</sub> = Berat piknometer + tanah + air

W<sub>4</sub> = Berat piknometer + air

### 4. Angka Pori

Angka pori didefinisikan sebagai perbandingan volume rongga dan volume butiran padat. Semakin besar nilai angka pori, maka semakin tinggi daya

dukung tanahnya menurun. Angka pori dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 3.7 sebagai berikut.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (3.7)$$

Keterangan:

$e$  = Angka pori

$V_v$  = Volume pori

$V_s$  = Volume butiran padat

#### 5. Porositas

Porositas didefinisikan sebagai perbandingan jumlah volume ruang kosong dengan volume keseluruhan massa tanah. Porositas dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.8 sebagai berikut.

$$np = \frac{V_v}{V} \times 100 \% \text{ atau } np = \frac{e}{e+1} \quad (3.8)$$

Keterangan:

$N_p$  = Porositas

$E$  = Angka pori

$V_v$  = Volume pori

$V$  = Volume keseluruhan massa tanah

#### 6. Derajat Kejenuhan

Derajat kejenuhan ( $S$ ) didefinisikan sebagai rasio antar volume Air dengan pori. Derajat kejenuhan dinyatakan sebagai persentase, Nilainya berkisar dari 0% hingga 100% atau 0 hingga 1. Saat tanahnya dalam Keadaan jenuh, jika tanah dalam maka nilai jenuhnya 1 (100%) Dalam kondisi kering, nilai jenuhnya adalah 0 (0%). Nilai derajat kejenuhan dapat dihitung dengan Persamaan 3.9 sebagai berikut.

$$S (\%) = \frac{V_w}{V_v} \times 100 \% \quad (3.9)$$

Keterangan:

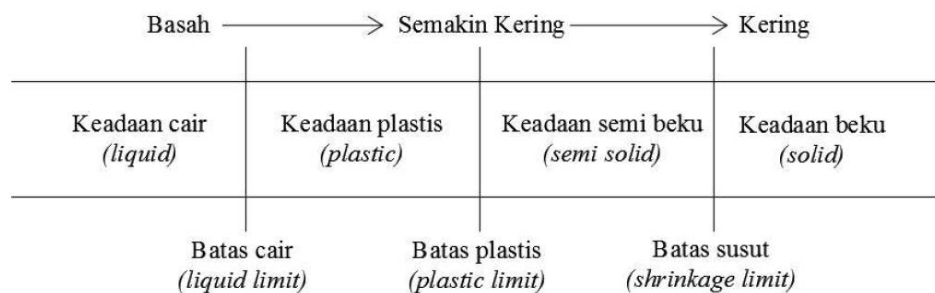
S = Derajat kejenuhan (%)

$V_v$  = Volume pori

$V_w$  = Volume pori

#### 7. Batas-Batas *Atterberg*

Batasan kandungan air tanah dari satu keadaan ke keadaan lainnya disebut batas konsistensi. Batas konsistensi tanah adalah batas Cair (LL), Batas Plastis (PL), Batas Susut (SL). Batasan ini juga disebut batas *Atteberg* dan dapat dilihat pada Gambar 3.2 sebagai berikut.



**Gambar 3.2 Batas-batas konsistensi tanah (*atterberg*)**

(Sumber :Hardiyatmo, 2002)

#### 8. Batas-Batas *Atterberg*

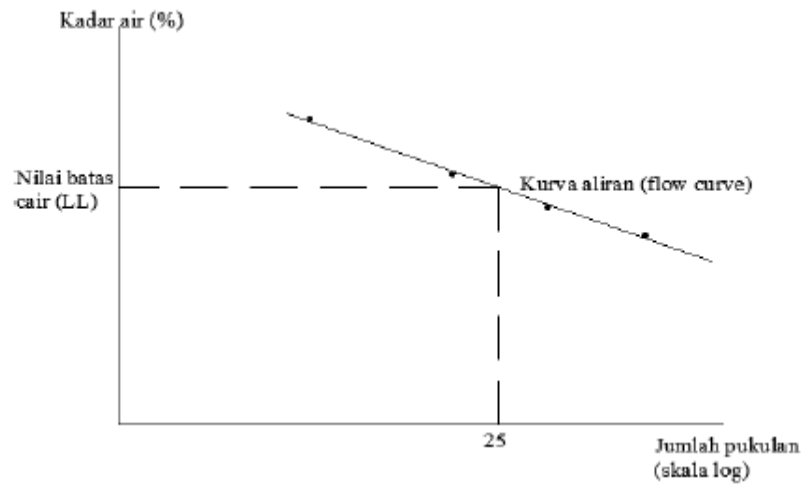
Batasan kandungan air tanah dari satu keadaan ke keadaan lainnya disebut batas konsistensi. Batas konsistensi tanah adalah batas Cair (LL), Batas Plastis (PL), Batas Susut (SL). Batasan ini juga disebut batas *Atteberg* dan dapat dilihat pada Gambar 3.3 di halaman selanjutnya.

##### a. Batas Cair (ASTM D4318)

Batas cair (*Liquid Limit*) adalah nilai kadar air tanah antara cair dan plastis. Tujuan dari pemeriksaan ini adalah untuk mengetahui kadar air suatu sampel tanah pada batas cairnya. Nilai batas cair ditentukan dengan uji *Cassagrande* pada tahun 1948. Dalam uji laboratorium, nilai batas cair adalah kadar air pada 25 kali pukulan dan dibutuhkan untuk menutup celah 12,7 mm. Hubungan antara kadar air dan jumlah sapuan untuk menentukan



batas cair 25 kali pukulan dapat ditunjukkan pada Gambar 3.3



**Gambar 3.3 Kurva Penentuan Batas Cair pada Tanah Lempung**

(Sumber : Hardiyatmo, 2002)

b. Batas Plastis (ASTM D4318)

Batas plastis (*Plastic Limit*) didefinisikan sebagai kadar air pada posisi antara daerah plastis dan semi padat, yaitu kadar air dimana tanah dengan diameter 3,2 mm mulai retak pada saat digulung (Hardiyatmo, 2010). Batas plastis dinyatakan dalam Persamaan 3.10 sebagai berikut.

$$PL = \frac{W_p + W_k}{W_k} \times 100 \% \quad (3.10)$$

Keterangan:

PL = batas plasis tanah,

$W_p$  = batas tanah basah kondisi plastis, dan

$W_k$  = berat tanah kering.

c. Batas Susut (ASTM D4318)

Batas susut (*Shrinkage Limit*) adalah keadaan kadar air pada posisi antara daerah semi padat dan padat, yaitu persentase kadar air dimana penurunan kadar air selanjutnya tidak menyebabkan perubahan volume tanah. Batas susut dinyatakan dalam Persamaan 3.11 sebagai berikut.

$$SL = \left( \frac{V_o}{W_o} - \frac{1}{G_s} \right) \times 100 \% \quad (3.11)$$

Keterangan:

SL = batas susut tanah

V<sub>o</sub> = Volume benda uji kering

W<sub>o</sub> = berat benda uji kering

G<sub>s</sub> = berat jenis tanah

d. Indeks Plastisitas (ASTM D4318)

Indeks plastisitas (*Plasticity Index*) adalah selisih antara batas cair dan batas plastis. Indeks plastisitas merepresentasikan kadar air tanah dalam keadaan plastis dan merepresentasikan jumlah relatif partikel lempung di dalam tanah. Jika nilai PI tinggi, berarti tanah mengandung banyak lempung. Sementara itu, jika nilai PI rendah, ini menunjukkan bahwa sebagian besar tanah adalah lanau. Sedikit penurunan kadar air akan menyebabkan tanah menjadi kering. Sebaliknya apabila kadar air bertambah tanah menjadi cair. Indeks plastisitas dinyatakan dalam Persamaan 3.12 sebagai berikut.

$$PI = LL - PL \quad (3.12)$$

Keterangan:

PI = Indeks plastisitas

LL = batas cair

PL = batas plastis

Batasan mengenai indeks plastis, macam tanah, kohesi, dan sifatnya dapat dilihat pada Tabel 3.2 di halaman selanjutnya.

**Tabel 3.2 Nilai Indeks Plastisitas dan Macam Tanah**

PI	Sifat	Macam Tanah	Kohesi
0	Non plastis	Pasir	Non kohesi
<7	Plastisitas rendah	Lanau	Kohesi sebagian
7-17	Plastisitas sedang	Lempung berlanau	Kohesif
>17	Plastisitas tinggi	lempung	kohesif

(Sumber : Hardiyatmo, 2002)

### 3.2 Gempa Bumi

Sumarjo et al. (2010) menyatakan, gempa bumi adalah peristiwa yang terjadi secara tiba-tiba yang disebabkan oleh tergesernya lapisan batuan pada kerak bumi akibat pergerakan lempeng tektonik. Energi yang dipancarkan oleh pergerakan lapisan batuan di bumi berupa gempa bumi atau gelombang seismik. Gempa selalu datang secara tiba-tiba, dan tidak ada tanda atau gejala sebelum kejadiannya. Hal ini menyebabkan guncangan yang terjadi menimbulkan kepanikan yang meluas, dan menghancurkan semua benda di permukaan bumi. Indonesia merupakan salah satu negara rawan gempa karena termasuk dalam zona gempa aktif. Indonesia terletak di persimpangan tiga lempeng utama dunia yaitu lempeng Australia, Eurasia, dan Pasifik, seperti terlihat pada Gambar 3.4 sebagai berikut.

**Gambar 3.4 Lempeng Tektonik Indonesia**(Sumber: *United State Geological Survey*, 2018)

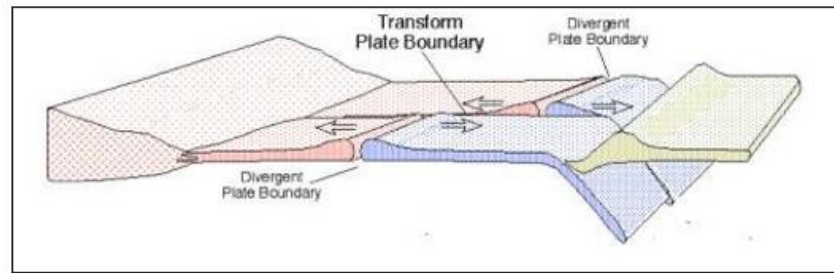
Pulau Sumatera, lepas pantai selatan Pulau Jawa, dekat pesisir selatan Kepulauan Nusa Tenggara, sedangkan Maluku bagian selatan dilintasi oleh tumbukan lempeng Eurasia dan Australia. Pada saat bersamaan, lempeng Australia dan Pasifik bertabrakan di Pulau Papua. Menurut data Badan Nasional Penanggulangan Bencana (2019), selama periode 2010-2019, setidaknya terdapat 134 kali gempa bumi dengan magnitudo  $M > 5,0$  di Indonesia.

Saat gempa terjadi, gelombang seismik dari sumbernya akan merambat dengan cepat melalui kerak bumi. Gelombang seismik yang mencapai tanah menghasilkan getaran yang berlangsung dari beberapa detik hingga beberapa menit. Intensitas dan lamanya getaran di suatu lokasi bergantung pada besaran gempa, lokasi gempa terjadi, dan karakteristik lokasi. Getaran gempa dianggap yang paling penting dari semua bahaya karena dapat menyebabkan bahaya lain atau kegagalan sekunder / *secondary fault* (Kramer, 1996).

Menurut Hidayat & Santoso (1997), gempa tektonik merupakan salah satu jenis gempa bumi yang berdampak dalam, sehingga perlu diperhatikan. Beberapa hal yang perlu diketahui antara lain frekuensi kemunculannya, energi yang dilepaskan dan besarnya pengaruh relatif terhadap pergerakan lempeng tektonik. Kious dan Tilling, 1996 membagi batas lempeng menjadi 3 tipe jenis, yaitu:

1. Batas divergen atau konstruktif (*Divergent boundary*)

Batas divergen terjadi ketika 2 lempeng bergerak saling menjauh seperti pada Gambar 3.5 di halaman selanjutnya. Gaya Tarik (*tensional force*) antar lempeng menyebabkan magma naik ke permukaan, menciptakan material lava baru dan menyebabkan lempeng terpisah atau saling menjauh. Salah satu konsekuensinya adalah peningkatan jumlah material mantel yang membentuk pegunungan di tengah samudra (*Mid Oceanic Ridges*) yang terletak di dasar Samudra Atlantik.

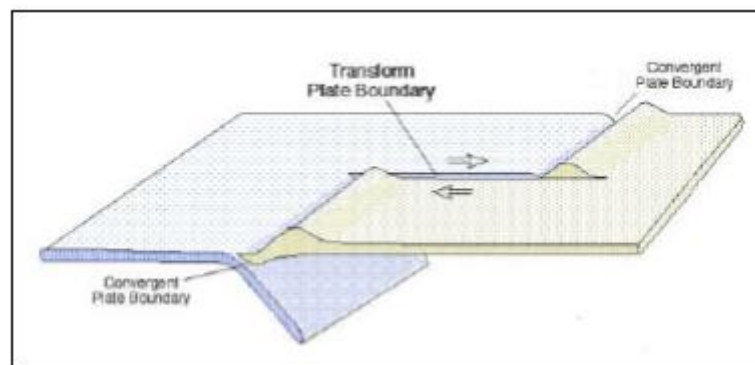


**Gambar 3.5 Batas Divergen (*Divergent Boundary*)**

(Sumber : Railsback, 2012)

2. Batas Konvergen atau destruktif (*Convergent Boundary*)

Batas konvergen terjadi ketika lempeng saling bertumbukan seperti pada Gambar 3.6. Batas konvergen dibedakan menjadi 2, yaitu batas subduksi (*subduction*) dan batas obduksi (*obduction*). Batas subduksi adalah batas lempeng yang berupa tumbukan dengan salah satu lempeng yang tertanam pada mantel sehingga dapat membentuk palung. Sedangkan batas obduksi adalah hasil tumbukan lempeng benua dengan benua yang menyusun rangkaian pegunungan. Selain itu, *Convergent Boundaries* memiliki 3 jenis batas yaitu lempeng samudra dengan lempeng samudra, lempeng benua dengan lempeng benua dan lempeng samudra dengan lempeng benua.



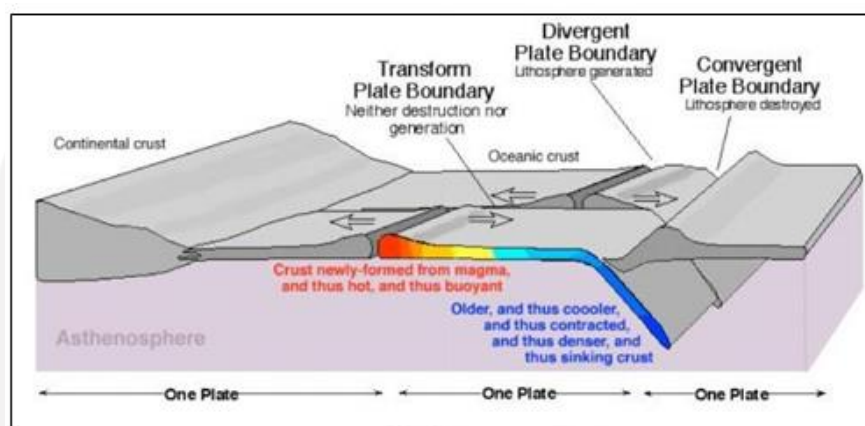
**Gambar 3.6 Batas Konvergen (*Convergent Boundariey*)**

(Sumber : Railsback, 2012)

3. Batas transform (*Transform boundary*)

Batas transform atau disebut juga batas geser (*shear boundary*) merupakan batas yang tidak menghasilkan ataupun menghancurkan litosfer. Pada batas

transform, lempeng berinteraksi, bergeser, dan bergerak relatif horizontal di bawah pengaruh rotasi bumi di sekitar porosnya, dan menghasilkan suatu sesar mendatar seperti pada Gambar 3.7 sebagai berikut.



**Gambar 3.7 Batas Transform (*Transform Boundary*)**

(Sumber : Railsback, 2012)

### 3.2.1 Parameter Gempa

Parameter gempa yang menyebabkan gerakan tanah sangat penting untuk menggambarkan karakteristik gempa yang terjadi. Kramer (2008) menyatakan, ada beberapa parameter yang mempengaruhi gempa, yaitu:

#### 1. Waktu kejadian gempa bumi (*Origin time*)

Waktu kejadian gempa atau waktu permulaan adalah waktu untuk melepaskan tegangan yang terakumulasi dalam bentuk gelombang seismik, dinyatakan dalam satuan hari, hari, bulan, tahun, jam, menit, dan detik dalam UTC (*Universal Coordinated Time*).

#### 2. Hiposenter

Merupakan titik pusat kejadian gempa. Howell (1969) menyatakan beberapa terdapat jenis gempa berdasarkan kedalaman gempa tersebut yaitu :

- a. Gempa dangkal dengan pusat kedalaman < 70 km
- b. Gempa sedang dengan pusat kedalaman 70 - 300 km
- c. Gempa dalam dengan pusat kedalaman 300 – 700 km

#### 3. Episenter

Episenter atau episentrum adalah lokasi titik awal kejadian gempa atau permukaan tanah yang saling tegak lurus dengan Hiposenter

#### 4. Amplitudo

intensitas gempa dapat digambarkan dengan bentuk gelombang. Parameter gelombang yang terekam dapat berupa hubungan antara waktu dan percepatan, kecepatan, atau perpindahan.

#### 5. Magnitudo

Magnitudo atau kekuatan gempa bumi adalah besaran energy yang dilepaskan saat terjadi gempa disebut intensitas gempa atau magnitude gempa. Untuk mendeskripsikan luas gempa digunakan alat yang disebut seismograf. Saat gempa terjadi, seismograf memantau intensitas gempa dan mencatatnya di seismogram. Seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.3, intensitas gempa dapat dibagi menjadi beberapa kategori.

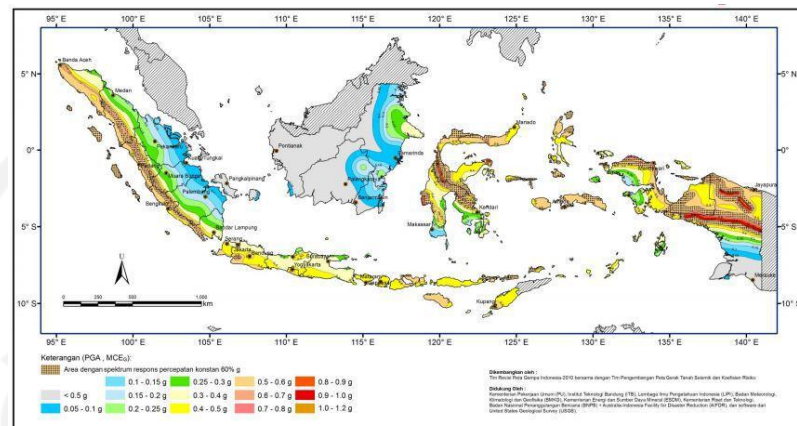
**Tabel 3.3 Kekuatan Gempa Bumi Berdasarkan Kelas**

Magnitudo Gempa	Kelas Kekuatan	Pengaruh akibat Gempa
$\leq 2,9$	<i>Micro</i>	Tidak terasa
3 - 3,9	<i>Minor</i>	Pada umumnya tidak dirasakan, dapat direkam dengan seismograf
4 - 4,9	<i>Light</i>	Sering dirasakan, hanya menyebabkan kerusakan ringan
5 - 5,9	<i>Moderate</i>	Kerusakan ringan pada bangunan dan struktur yang lain
6 - 6,9	<i>Strong</i>	Kemungkinan dapat menyebabkan kerusakan di daerah populasi padat
7 - 7,9	<i>Major</i>	Gempa besar, menimbulkan kerusakan serius
8 - 8,9	<i>Great</i>	Dapat menghancurkan daerah dekat pusat gempa
$\geq 9$	<i>Great and rare</i>	

(Sumber : *United State Geological Survey*, 2005)

Kekuatan gempa bumi terjadi berdasarkan daerah zona tertentu. Peta zona

wilayah rawan gempa di Indonesia menggunakan SNI 1726 – 2012. Peta wilayah gempa Indonesia dapat dilihat pada Gambar 3.8 sebagai berikut.



**Gambar 3.8 Peta Wilayah Gempa Indonesia**

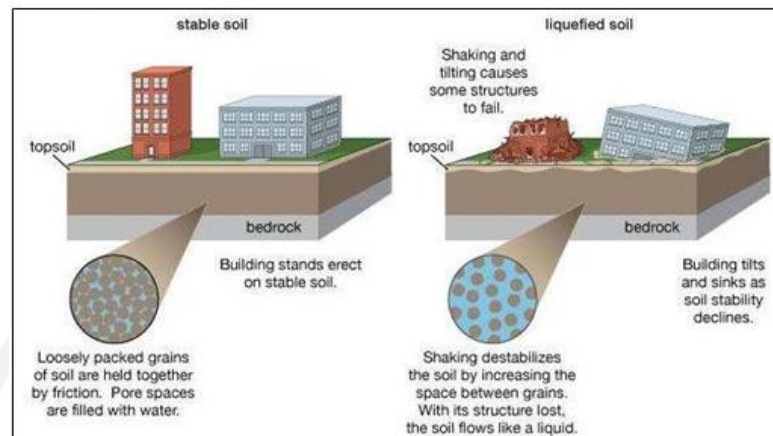
(Sumber : SNI 1726-2012)

### 3.3 Likuifaksi

Endapan pasir atau endapan yang memiliki muka air tanah di bawah permukaan rentan terhadap likuifaksi. Pada gempa bumi, tegangan siklik yang disebabkan oleh perambatan gelombang geser menyebabkan pasir lepas bereaksi dan meningkatkan tekanan pada pori-pori. Akibat siklus gelombang yang terjadi begitu cepat, air dari tanah tidak bisa keluar. Meningkatnya tekanan pori-pori tersebut menyebabkan air mengalir ke permukaan berupa aliran lumpur atau pasir. Tekanan air pori meningkat karena tanah yang bergerak menyebabkan air mengalir ke atas dan mengubah pasir dari fase padat menjadi cair yang disebut likuifaksi (Day, 2012).

Pasir dengan kepadatan sedang sampai lepas dan memiliki elevasi muka air tanah tinggi saat tidak ada getaran tanah akan stabil karena partikel pasir saling mengunci (*interlocking*). Saat gempa terjadi, volume tanah cenderung menyusut, yang meningkatkan tekanan air di pori-pori, yang mengurangi kekuatan geser efektif tanah. Pasir jenuh air akan mengisi ruang antar partikel sehingga kekuatan *interlocking* antar partikel hilang, seperti pada Gambar 3.9 di halaman selanjutnya.





**Gambar 3.9 Proses Terjadinya Likuifaksi**

(sumber : *Encyclopedia*, 2001)

Ishihara (1985) menyatakan bahwa pada saat likuifaksi, tegangan efektif tanah adalah nol. Hal ini karena tekanan air di pori-pori meningkat hingga ke titik tegangan air di pori-pori sama dengan yang ada di tanah. Akibat hilangnya kekuatan geser tanah tersebut, maka partikel pasir yang saling mengunci saling lepas dan seolah-olah partikel pasir tersebut mengembang di air.

Setelah terjadi likuifaksi, tekanan pada air pori mulai terdisipasi / menghilang. Lamanya waktu tanah dalam kondisi cair bergantung pada 2 faktor utama yaitu lamanya getaran durasi gempa dan kondisi drainase tanah yang terlikuifaksi. Semakin lama dan kuat tegangan geser siklik akibat gempa maka Proses likuifaksi membutuhkan waktu yang lama dan tegangan geser geser siklik yang kuat akibat gempa bumi akan semakin lama untuk terlikuifaksi. Setelah proses likuifaksi selesai, tanah dapat kembali kembali padat, ambles, atau mungkin tidak memiliki waktu untuk memadat.

### 3.3.1 Definisi Likuifaksi

Day (2012) menyatakan Gempa bumi dapat menimbulkan efek sekunder (*secondary effect*) atau proses non tektonik di permukaan yang berhubungan langsung dengan gempa bumi. Salah satu dampak sekunder tersebut adalah fenomena pencairan tanah akibat beban siklik atau yang disebut dengan peristiwa likuifaksi. Pencairan umumnya terjadi di konsistensi tanah granular (*saturated*) yang lepas sampai sedang dengan sifat drainase di dalam tanah. Sedimen tanah atau

sedimen yang dapat berpotensi mengalami likuifaksi ketika diberikan beban siklik adalah pasir halus (*sand*), pasir berlumpur (*silty sand*) dan pasir lepas (*loose sand*). Karena hanya terjadi di tanah jenuh, likuifaksi biasanya terjadi di dekat sungai, teluk, atau badan air lainnya (Kramer)

Proses perubahan kondisi tanah pasir yang jenuh air akan menjadi cair karena adanya peningkatan tekanan air pada pori-pori hingga titik yang sama dengan tegangan total akibat beban siklik, sehingga tegangan efektif tanah akan berkurang menjadi nol. Hal ini menunjukkan bahwa likuifaksi merupakan fenomena dimana kekuatan dan kekakuan tanah yang tinggi hilang dalam waktu yang singkat. Saat gempa terjadi, gaya geser yang ditimbulkan menyebabkan pasir bereaksi sehingga menyebabkan tekanan air di pori-pori meningkat. Akibat getaran siklik ini, yang terjadi dalam waktu singkat, tanah kehilangan banyak kekuatan atau kekakuan sehingga tidak mampu menopang struktur di atasnya dan mempertahankan stabilitasnya (Jefferies dan Shuttle, 2011).

Pasir dengan kepadatan lepas hingga sedang dan pasir berlumpur jenuh air cenderung bereaksi dengan beban siklik sehingga tanah kehilangan kekuatan gesernya karena berkurangnya tegangan efektif tanah dengan meningkatnya tegangan air pori. Kondisi tanah saat likuifaksi dapat ditentukan pada Persamaan 3.13 sebagai berikut.

$$\sigma' = \sigma - u \quad (3.13)$$

Keterangan:

$\sigma'$  = tegangan efektif tanah ( $t/m^2$ )

$\sigma$  = tegangan total ( $t/m^2$ )

$u$  = tekanan air pori ( $t/m^2$ )

menurut Das (2019) tegangan total dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.14 sebagai berikut.

$$\sigma = (H \cdot \gamma_d) + (H - H_A) \cdot \gamma_{sat} \quad (3.14)$$

Keterangan:

$\sigma$  =tegangan total ( $t/m^2$ )

H =tinggi muka air diukur dari permukaan tanah (m)

$H_A$  =Jarak antara titik A dengan muka air (m)

$\gamma_d$  =berat volume tanah kering ( $t/m^3$ )

$\gamma_{sat}$  =berat volume tanah jenuh air ( $t/m^3$ )

Kemudian untuk nilai rasio tekanan air pori tanah dihitung dengan Persamaan 3.15 sebagai berikut.

$$u = H_A \cdot \gamma_w \quad (3.15)$$

Keterangan:

$H_A$  = Jarak antara titik A dengan muka air

$\gamma_w$  = berat volume air ( $10Kn/m^3$ )

Peningkatan tekanan air pada pori menyebabkan air mengalir ke permukaan tanah dalam bentuk semburan lumpur atau pasir. Dalam keadaan likuifaksi ini, tegangan efektif tanah adalah nol dan partikel-partikel tanah saling lepas seakan-akan mengambang di air. Struktur yang berada di atas endapan tanah pasir yang terlikuifaksi selama gempa bumi akan tenggelam atau jatuh, dan saluran yang terkubur akan naik ke permukaan (Seed et al.)

Kramer (2008) menyatakan bahwa terdapat 2 fenomena yang berkaitan dengan gempa bumi yang menjadi pertimbangan untuk mengevaluasi likuifaksi, antara lain:

#### 1. *Flow Liquefaction*

*Flow liquefaction* terjadi karena tegangan geser statik yang diperlukan lebih besar dari tegangan geser tanah pada kondisi likuifaksi ( $\sigma_{static} > \sigma_{Residual}$ ) sehingga terjadi aliran di dalam tanah. Secara umum, likuifaksi aliran terjadi pada pasir lepas, yang dapat dipicu oleh sumber getaran non seismik seperti tiang pancang, getaran rel, survei geofisika, dan ledakan. *Flow liquefaction* dalam aliran dapat merusak fondasi (*foundation failures*)

#### 2. *Cyclic Mobility*

Fenomena *cyclic mobility* atau mobilitas siklik dapat terjadi jika dipicu oleh pembebanan siklik. *Cyclic mobility* secara bertahap dapat menyebabkan deformasi besar karena tegangan statis dan dinamis yang terjadi selama gempa bumi. Keadaan tanah, ketika *cyclic mobility* adalah tegangan geser statis, lebih kecil daripada tegangan geser dalam keadaan likuifaksi ( $\sigma_{\text{static}} < \sigma_{\text{residual}}$ ). Secara umum, *cyclic mobility* terjadi di tanah berpasir yang relatif padat. Kriteria Likuifaksi menurut beberapa ahli dapat dilihat pada Tabel 3.4 sebagai berikut.

**Tabel 3.4 Kriteria Likuifaksi Menurut Beberapa Ahli**

No	Nama kriteria	Likuifaksi	Pengujian	Tidak likuifaksi
1	Wang Chinese Criteria (1979)	(a) % finer (Less than 5 $\mu\text{m}$ ) $\leq 15-20$ (b) $LL < 35$ (Both the conditions are satisfied)	Seed and Idriss	If any one of conditions is not satisfied
2	Modified Chinese Criteria (Seed and Idriss 1982)	(a) % finer (Less than 5 $\mu\text{m}$ ) $\leq 15$ (b) $LL < 35$ and (c) Water content/LL $(W_c/LL) \geq 0,9$ (All conditions are satisfied)	-	If any one of conditions is not satisfied
3	Andrew and Martin (2000)	(a) % finer (Less than 2 $\mu\text{m}$ ) $\leq 10$ (b) $LL < 32$ (Both the conditions are satisfied)	Any one of condition of liquefaction is not satisfied	If both conditions are not satisfied
4	Seed et.al. (2003)	(a) Plasticity Index (PI) $< 12$ (b) $LL < 37$ and (c) $W_c/LL > 0,8$	(a) $12 < PI < 20$ (b) $37 < LL < 47$ (c) $W_c/LL > 0,85$	Out of limits of testing
5	Bray and Idriss (2006)	(a) $PI < 12$ (b) $W_c/LL > 0,85$	(a) $12 < PI < 18$ (b) $W_c/LL > 0,8$ (Moderately liquefiable)	Out of limits of moderately liquefiable
6	Polito (1999)	(a) Liquefiable: $PI < 10$ and $LL \leq 30$ (b) Cyclic mobility: $10 < PI \leq 20$ and $30 < LL < 40$		Out of limits of cyclic mobility
7	Boulanger and Idriss (2006)	(a) Liquefaction – $PI \leq 3$ (b) Transition – $3 < PI \leq 7$ (c) Cyclic mobility – $PI > 7$	-	-

(Sumber : Artati, Pawirodikromo and Purwanto, 2020)

### 3.3.2 Metode Analisis Potensi Likuifaksi

Seed & Idriss (1971) mengusulkan metode umum untuk mengevaluasi potensi likuifaksi. Tahapan mengevaluasi potensi likuifaksi meliputi penentuan jenis tanah, kedalaman muka air tanah, *Cyclic Stress Ratio* (CSR), *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dan faktor keamanan atau *Safety of Factor* (SF).

Langkah pertama dalam mengevaluasi likuifaksi adalah menentukan apakah tanah memiliki kemampuan mencair (*liquefiable*) saat mengalami getaran. Kebanyakan tanah yang rentan terhadap likuifaksi adalah tanah non-kohefif.

Metode analisis yang paling umum untuk menentukan potensi likuifaksi adalah dengan menggunakan uji penetrasi standar (SPT) yang disarankan oleh (Seed et al.). Metode ini dikemukakan oleh Seed & Idriss (1971) dan disebut prosedur yang disederhanakan.

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

Likuifaksi yang terjadi pada pasir jenuh dapat disebabkan oleh rasio tegangan seismic atau *seismic stress ratio (SSR)*, atau biasa disebut dengan *cyclic stress ratio (CSR)* akibat gempa bumi. Besarnya CSR dipengaruhi oleh pengurangan percepatan gempa maksimum, percepatan tanah, tegangan tanah total, tegangan tanah efektif dan reduksi faktor kedalaman.

Seed & Idriss (1971) mengembangkan metode dengan membandingkan rasio tegangan siklik akibat gempa bumi atau CSR dengan ketahanan siklik tanah atau CRR. Nilai CSR dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.16 sebagai berikut.

$$CSR = \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} = 0,65 \frac{\tau_{max}}{\sigma'_v} = 0,65 \left(\frac{a_{max}}{g}\right) \left(\frac{a_{max}}{g}\right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v}\right) r_d \quad (3.16)$$

Keterangan:

CSR = Tegangan siklik yang menyebabkan likuifaksi atau *cyclic stress ratio*

$T_{max}$  = Tegangan geser siklik

$\sigma_v$  = tegangan overburden vertical total ( $t/m^2$ )

$\sigma'_v$  = tegangan overburden vertical total efektif ( $t/m^2$ )

$a_{max}$  = percepatan permukaan tanah maksimum arah horizontal ( $m/s^2$ )

$r_d$  = koefisien reduksi kedalaman

$g$  = percepatan gravitasi  $9,81 m/s^2$

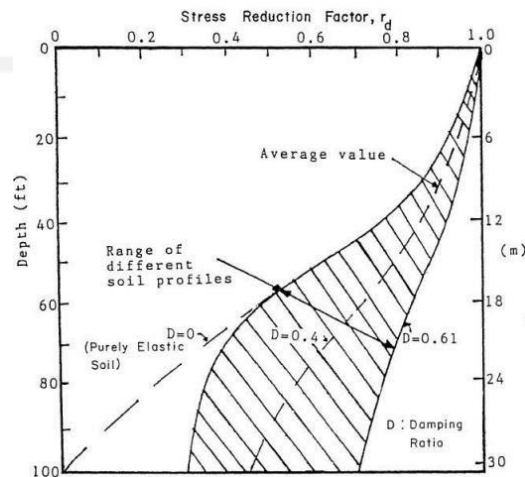
Untuk menghitung koefisien reduksi tegangan, Whitman (1971) mengembangkan persamaan untuk mengestimasi reduksi tegangan. Besaran koefisien reduksi tegangan dapat dihitung menurut rumus 3.17a sampai dengan 3.17d atau menggunakan grafik hubungan antara koefisien reduksi dan kedalaman, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.10.

$$r_d = 1,0 - 0,00765z \quad \text{untuk } z \leq 9,15 \text{ m} \quad (3.17a)$$

$$r_d = 1,174 - 0,0267z \quad \text{untuk } 9,15\text{m} \leq 23 \text{ m} \quad (3.17b)$$

$$r_d = 0,774 - 0,008z \quad \text{untuk } 23 \text{ m} \leq 30 \text{ m} \quad (3.17c)$$

$$r_d = 0,5 \quad \text{untuk } \geq 30 \text{ m} \quad (3.17d)$$



**Gambar 3.10 Faktor Reduksi Tegangan dan Kedalaman**

(sumber :Seed & Idriss, 1971)

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

Ketahanan tanah terhadap likuifaksi atau *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dapat ditentukan berdasarkan data pengujian. Nilai CRR bergantung pada data hasil pengujian, seperti hasil pengujian CPT atau SPT, karena pada umumnya terkait dengan parameter *in-situ* seperti nilai penetrasi *resistance* CPT, jumlah pukulan SPT atau kecepatan gelombang geser,  $V_s$  (Idriss and Boulanger).

Jika nilai ketahanan tanah terhadap likuifaksi atau *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) lebih besar dari pada beban yang terjadi atau *Cyclic Stress Ratio* (CSR), maka tanah tersebut aman. Namun jika nilai CRR lebih kecil dari CSR, maka tanah aman terhadap likuifaksi.

### a. *Safety of Factor* (SF)

Untuk mengetahui faktor keamanan terhadap likuifaksi dapat menggunakan Persamaan 3.18 di halaman selanjutnya.

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (3.18)$$

Martin dan Lew (1999) mengusulkan nilai faktor keamanan terhadap potensi likuifaksi adalah 1,3. Kondisi tanah dengan nilai faktor keamanan kurang dari 1,3 dapat mengalami kemungkinan likuifaksi, jika faktor keamanan tanah sama dengan 1,3 maka kondisi tanah berada pada kondisi kritis, dan tanah dengan nilai faktor keamanan lebih dari 1,3 maka aman terhadap potensi likuifaksi.

### 3.3.3 *Liquifaction Potential Index (LPI)*

*Liquifaction Potential Index (LPI)* adalah parameter yang digunakan untuk mengevaluasi potensi likuifaksi suatu daerah. Nilai LPI dihitung dengan mengintegrasikan faktor keamanan (FS) pada kedalaman 0-20 m. Iwasaki et al., (1981) mengembangkan metode LPI karena mengasumsikan bahwa kegagalan likuifaksi sebanding dengan ketebalan lapisan, jarak antara tanah yang terlikuifaksi dan permukaan, serta faktor keamanan pada Persamaan 3.19 sebagai berikut.

$$LPI = \int_0^{20} F(z)w(z)dz \quad (3.19)$$

Keterangan:

Z = kedalaman lapisan pasir (0-20 m)

F = faktor keamanan pada tanah yang likuifaksi

W(z) = factor beban yang dipengaruhi kedalaman

Beberapa faktor yang menjadi syarat untuk menentukan besarnya factor beban dan factor keamanan pada kedalaman 0-20 m. Faktor-faktor tersebut adalah sebagai berikut.

$$F(z) = 1 - SF \quad \text{Untuk } SF < 1$$

$$F(z) = 0 \quad \text{Untuk } SF \geq 1$$

$$w(z) = 10 - 0,5z \quad \text{Untuk } z < 20 \text{ m}$$

$$w(z) = 0 \quad \text{Untuk } z \geq 20 \text{ m}$$

Nilai LPI dapat disesuaikan dengan Tabel 3.5 di halaman selanjutnya untuk menentukan kerusakan tanah akibat likuifaksi.

**Tabel 3.5 Nilai Kekuatan Tanah Berdasarkan *Liquifaction Potential Index* (LPI)**

LPI	Iwasaki <i>et al.</i> (1982)	Luna and Frost (1998)	MERM (2003)
LPI = 0	<i>Very low</i>	<i>Little to none</i>	<i>None</i>
0 < LPI < 5	<i>Low</i>	<i>Minor</i>	<i>Low</i>
5 < LPI < 15	<i>High</i>	<i>Moderate</i>	<i>Medium</i>
15 < LPI	<i>Very high</i>	<i>Major</i>	<i>High</i>

(Sumber: Natural Hazards and Earth System Science, 2012)

### 3.3.4 Analisis Potensi Likufaksi Berdasarkan Data SPT

Nilai N-SPT yang diukur dapat dipengaruhi oleh jenis tanah, misalnya tanah jenuh yang didominasi pasir. Lanau atau Pasir yang kelembungan dapat memberikan nilai N yang tinggi jika cenderung mengembang dan nilai N yang rendah jika cenderung bereaksi selama kondisi *undrained shear*. Metode penentuan *cyclic stress ratio* (CSR) sebagai fungsi N dalam SPT dikemukakan oleh Seed et al. (1982) berdasarkan hasil endapan pasir pada saat gempa.

### 3.3.5 Metode (Seed et al., 1976)

Hubungan yang diperoleh adalah nilai koreksi SPT  $(N_1)_{60}$  terhadap CSR dengan besaran magnitudo  $M = 7,5$ . Nilai koreksi SPT terhadap 60% energi efektif dihitung menggunakan Persamaan 3.20 sebagai berikut.

$$(N_1)_{60} = N_m \cdot C_N \cdot \eta = N_m \cdot \frac{2,2}{1,2 + \frac{\sigma_v'}{P_a}} \cdot 60 \% \quad (3.20)$$

Keterangan:

$N_{60}$  = uji penetrasi standar nilai N dikoreksi untuk prosedur pengujian lapangan

$N_m$  = N-SPT yang diperoleh dari hasil uji lapangan

$C_N$  = koreksi factor tegangan *overburden*

Penelitian yang dilakuak Seed et al., (1976), disimpulkan bahwa potensi kerusakan dapat diidentifikasi berdasarkan N-SPT yang dapat dilihat pada Tabel 3.6 di halaman selanjutnya.

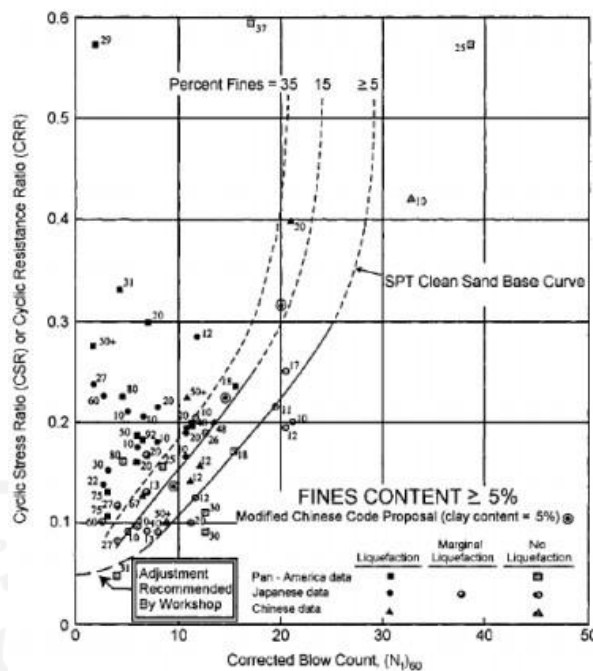


**Tabel 3.6 Potensi Kerusakan Akibat Likuifaksi Berdasarkan N-SPT**

$(N_1)_{60}$	Potensi kerusakan
0 – 20	Tinggi
20 – 30	Sedang
> 30	Kerusakan tidak signifikan

(Sumber : Day, 2012)

Nilai CSR diperoleh sesuai Persamaan 3.20 namun untuk mendapatkan nilai CRR diperlukan nilai koreksi SPT  $(N_1)_{60}$ . Nilai tersebut akan diplotkan pada grafik hubungan antara CRR dan  $(N_1)_{60}$ , seperti terlihat pada Gambar 3.11 sebagai berikut.

**Gambar 3.11 Grafik Hubungan Antara  $(N_1)_{60}$  dengan nilai CRR**

(Sumber :Kramer, 2008)

### 3.3.6 Metode (Youd & Idriss, 1970)

Dalam 25 tahun terakhir, metode yang disebut "*simplified procedure*" telah digunakan sebagai kriteria untuk mengevaluasi ketahanan tanah terhadap likuifaksi. Sejak itu, "*simplified procedure*" yang diusulkan oleh (Seed and Idriss). Telah

mengalami revisi dan perbaikan secara berkala. Pada tahun 1996, T. L. Youd dan I. M. Idriss mengadakan seminar terhadap 20 pakar untuk memperbaharui " *simplified procedure*" dan meningkatkan hasil penelitian dari dekade sebelumnya.

Ruang lingkup *workshop* dibatasi pada prosedur untuk mengevaluasi ketahanan terhadap likuifaksi di bawah tanah landai. Youd & Idriss (1970) mengusulkan metode analisis likuifaksi, yaitu menghitung nilai CSR, faktor reduksi kedalaman dan CRR dengan menggunakan nilai SPT terkoreksi  $(N_1)_{60}$  berdasarkan kandungan *finer content*.

Saat menentukan nilai CSR, Youd & Idriss (1970) menghitung sesuai rumus 3. yang sama dengan rumus yang digunakan (Seed et al.). Perhitungan nilai SPT yang terkoreksi dipengaruhi oleh *rod*, *energy hammer*, detail sampel, ukuran lubang bor dan tekanan *overburden effective*. Untuk mendapatkan nilai SPT yang dikoreksi, digunakan rumus 3.21 sebagai berikut.

$$(N_1)_{60} = C_N \cdot C_E \cdot C_R \cdot C_B \cdot C_S \cdot N_m \quad (3.21)$$

Keterangan:

$C_N$  = factor normalisasi  $N_m$  terhadap tegangan overburden

$C_E$  = factor koreksi rasio *energy hammer* (ER)

$C_R$  = factor koreksi panjang bentang

$C_B$  = factor koreksi diameter lubang bor

$C_S$  = factor koreksi sampel

$N_m$  = N-SPT yang diperoleh dari hasil uji lapangan

Menurut Seed & Idriss (1971) diperlukan faktor koreksi untuk menghitung tegangan *overburden* yang disebabkan oleh kenaikan nilai N-SPT yang dihitung berdasarkan Persamaan 3.22 ( $1 \text{ Pa} = 1 \text{ atm}$ ) sebagai berikut.

$$C_N = \frac{2,2}{(1,2 + \frac{\sigma'_{vo}}{Pa})} \quad (3.22)$$

Robertson & Wride (1998) menjelaskan nilai faktor koreksi dari SPT yang

dimodifikasi dari (Skempton) pada Tabel 3.7 sebagai berikut.

**Tabel 3.7 Faktor Koreksi N-SPT**

Factor	Equipment Variable	Term	Correction
Overburden pressure	-	$C_N$	
Overburden pressure	-	$C_N$	
Energy ratio	Donut hammer	$C_E$	0,5 - 1,0
Energy ratio	Safety hammer	$C_E$	0,7 - 1,2
Energy ratio	Automatic-trip Donut type hammer	$C_E$	0,8 - 1,3
Borehole diameter	65 - 115 mm	$C_B$	1
Borehole diameter	150 mm	$C_B$	1,05
Borehole diameter	200 mm	$C_B$	1,15
Rod length	< 3 mm	$C_R$	0,75
Rod length	3 - 4 mm	$C_R$	0,8
Rod length	4 - 6 mm	$C_R$	0,85
Rod length	6 - 10 mm	$C_R$	0,95
Rod length	10 - 30 mm	$C_R$	1,0
Sampling method	Standard sampler	$C_s$	1,0
Sampling method	Sampler without liners	$C_s$	1,1 - 1,3

(sumber : Youd & Idriss, 2001)

Youd & Idriss (2001) melanjutkan prosedur yang dikerjakan oleh (Seed et al.) dengan menggunakan Persamaan 3.23 untuk memperkirakan bahwa nilai koreksi  $(N_1)_{60cs}$  sama dengan nilai koreksi *finer content* (FC).

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta(N_1)_{60} \quad (3.23)$$

Dimana  $\alpha$  dan  $\beta$  merupakan koefisien yang dapat ditentukan melalui Persamaan 3.24a Sampai dengan Persamaan 3.24d sebagai berikut.

$$\alpha = 0, \beta = 1 \quad FC \leq 5\% \quad (3.24a)$$

$$\alpha = \exp \left[ 1,76 - \left( \frac{190}{FC} \right)^2 \right] \quad 5\% < FC < 35\% \quad (3.24b)$$

$$\beta = \left[ 0,99 - \left( \frac{FC^{1,5}}{1000} \right) \right] \quad 5\% < FC < 35\% \quad (3.24c)$$

$$\alpha = 5, \beta = 1,2 \qquad FC \geq 5\% \qquad (3.24d)$$

Korelasi nilai CRR dengan nilai SPT yang telah dikoreksi dan gempa bumi dengan magnitudo  $M = 7,5$  dapat dihitung menggunakan Persamaan 3.25 sebagai berikut.

$$CRR_{7,5} = \frac{1}{34 - (N_1)_{60CS}} + \frac{(N_1)_{60CS}}{135} + \frac{50}{[10X(N_1)_{60CS} + 45]^2} - \frac{1}{200} \qquad (3.25)$$

Persamaan yang diusulkan oleh Youd & Idriss (2001) berlaku untuk gempa bumi berkekuatan 7,5 SR. Semakin tinggi intensitas gempa, semakin lama durasi gerakan tanah. Oleh karena itu, semakin besar magnitudo, semakin besar jumlah siklik yang dihasilkan. Untuk beradaptasi dengan magnitudo yang lebih besar atau lebih kecil, (Seed et al.) memperkenalkan faktor skala *magnitude scale factor* (MSF) seperti yang disebut dalam Persamaan 3.26 sebagai berikut.

$$MSF = \frac{10^{2,24}}{M_w^{2,56}} \qquad (3.26)$$

Keterangan:

MSF = Magnitud Scale Factor

$M_w$  = Kekuatan gempa bumi  $\neq$  7,5 SR

## **BAB IV METODE PENELITIAN**

### **4.1 Tahapan Penelitian**

Dalam penelitian ini proses penelitian dibagi dalam beberapa tahapan, diantaranya adalah sebagai berikut.

1. Tahap pengumpulan data, tahap ini meliputi tahap pengambilan data tanah (data tanah uji lapangan dan data tanah laboratorium) dari 3 titik Area Universitas Gadjah Mada Yogyakarta
2. Tahap analisis dan pengolahan data, pada tahap ini data yang telah diambil (data uji lapangan dan data laboratorium), kemudian diolah dengan logika, teori dan yang berlaku (metode yang disarankan oleh Seed *et al.* dengan perhitungan CSR dan CRR)
3. Tahap penulisan dan penarikan kesimpulan, tahap ini meliputi penulisan laporan penelitian berdasarkan aturan yang berlaku dan hasil pengolahan data. Kesimpulan diambil berdasarkan teori yang digunakan untuk menjawab masalah yang timbul.

### **4.2 Analisis Data**

Metode analisis data merupakan metode atau cara yang digunakan untuk menyederhanakan dan mempermudah dalam memahami data yang peroleh. Untuk menganalisis potensi likuifaksi adalah membandingkan seberapa besar potensi likuifaksi pada tiga sampel tanah yang diambil di tempat yang berbeda dengan menggunakan metode CSR (Cyclic Stress Ratio) dan mendapatkan besar potensi dengan metode CRR (Cyclic Resistance Ratio). Data yang didapatkan kemudian dianalisis berdasarkan tahap pengerjaannya. Secara garis besar dijelaskan bahwa penelitian ini menggunakan data SPT dan CPT yang menjadi scara untuk mengetahui konsistensi lapisan tanah terhadap potensi likuifaksi. Perhitungan potensi likuifaksi dilakukan berdasarkan data parameter geoteknik *Standard Penetration Test* (N-SPT) dan CPT serta kegempaan. Selanjutnya penelitian ini juga menganalisis fisik tanah berdasarkan data di laboratorium.

Adapun nilai yang akan menunjukkan bahwa titik tersebut aman atau tidak

dari likuifaksi yaitu “Factor of Safety” (FS). Berdasarkan Martin dan Lew (1999) nilai Fs tersebut akan mempresentasikan potensi likuifaksi yang ada, sesuai Persamaan 4.1, Persamaan 4.2, dan Persamaan 4.3 berikut ini.

Jika nilai  $FS < 1$  (Maka Berpotensi Likuifaksi) (4.1)

Jika nilai  $FS = 1$  (Maka dalam kondisi kritis) (4.2)

Jika nilai  $FS > 1$  (Maka dalam keadaan Aman) (4.3)

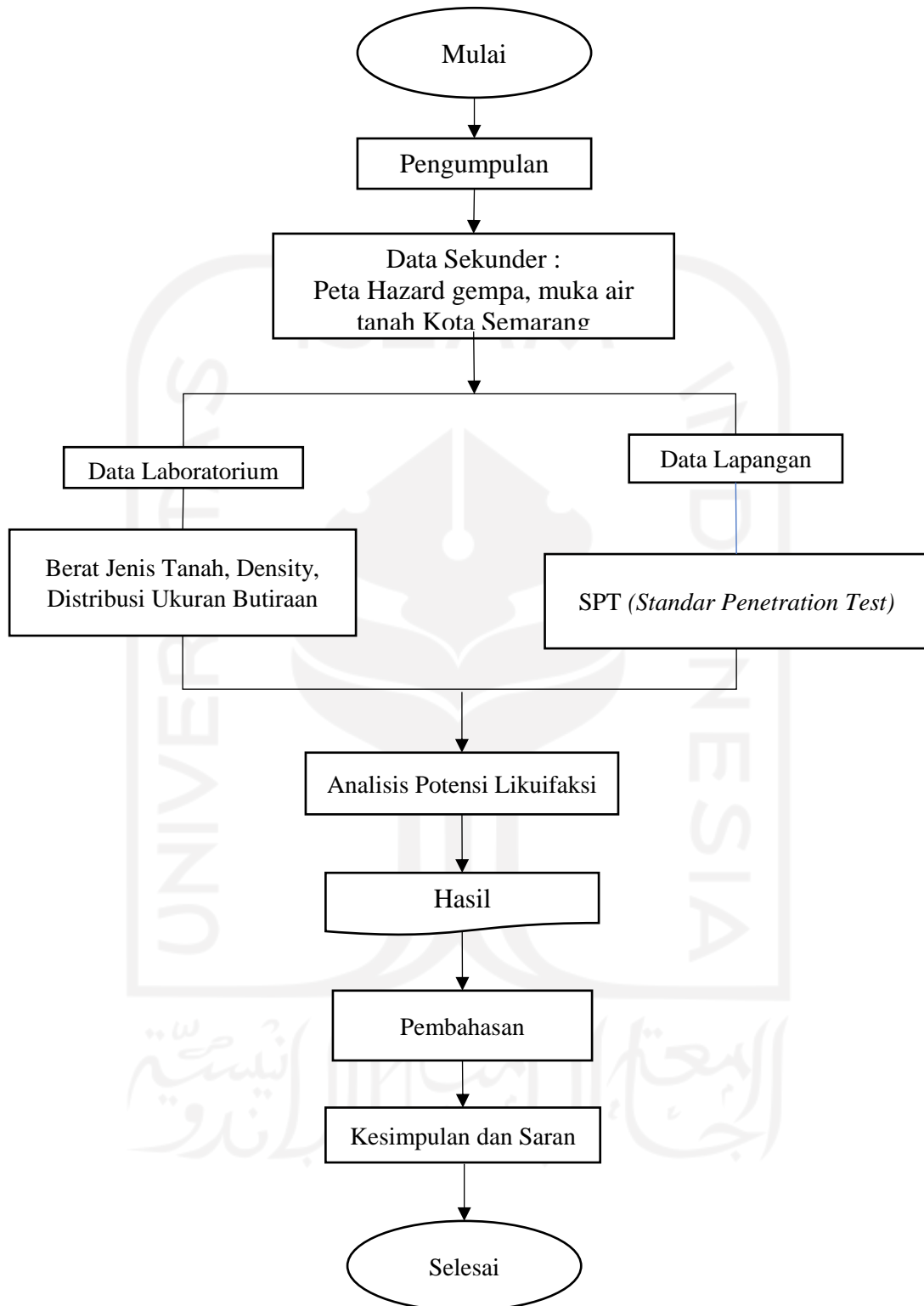
#### 4.2.1 Analisis Data SPT

Dari data bor dalam SPT yang ada dapat diketahui potensi likuifaksi pada titik tersebut pada kedalaman tertentu. Ada beberapa teknik untuk menganalisis likuifaksi yaitu dengan:

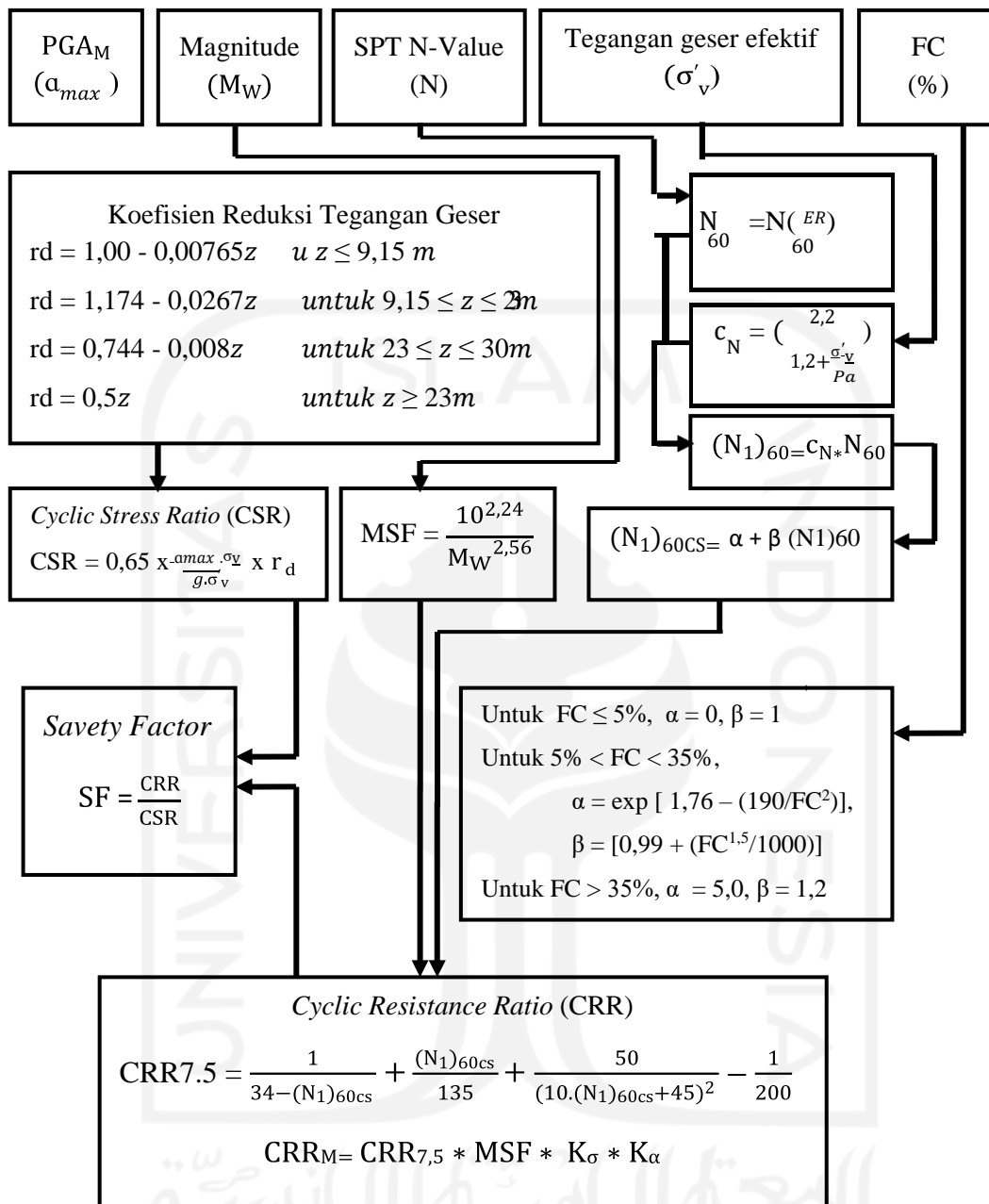
1. menentukan apakah tanah yang akan ditinjau memiliki kecenderungan likuifaksi atau tidak,
2. tanah harus berada dibawah muka air tanah,
3. langkah selanjutnya ialah menentukan nilai dari *cyclic stress ratio* (CSR),
4. dengan menggunakan nilai parameter tanah dari berbagai uji intrepetasi kekuatan tanah yang disini menggunakan data SPT, maka dapat dihitung nilai *cyclic resistance ratio* (CRR), dan
5. pada akhirnya akan didapatkan nilai faktor keamanan yang menunjukkan potensi likuifaksi pada tanah tersebut.

#### 4.3 Bagan Alir Penelitian (*Flowchart*)

Metode penelitian menunjukkan bagaimana melakukan penelitian mulai dari identifikasi masalah hingga analisis dan penarikan kesimpulan. Diagram alir (*flowchart*) dari setiap tahap metode penelitian diusulkan untuk membantu pembaca memahami. Diagram alir penelitian atau (*flowchart*) dapat dilihat pada Gambar 4.1 di halaman selanjutnya.



**Gambar 4.1** *Flowchart* Penelitian



**Gambar 4.2 Bagan Alir Analisis likuifaksi**



## BAB V DATA, ANALISIS, DAN PEMBAHASAN

### 5.1 Data Test Lapangan N-SPT

Data lapangan yang digunakan dalam analisis studi Tugas Akhir ini merupakan data sekunder yang didapat dari proyek *Soil Investigation* UGM Yogyakarta. Adapun titik koordinat data N-SPT proyek *Soil Investigation* UGM Yogyakarta untuk BH-01, BH-02, dan BH- 04 dapat dilihat pada Gambar 5.1 sampai Gambar 5.3 berikut.



**Gambar 5.1 Titik Koordinat Lokasi Data N-SPT titik BH-01 *Soil Investigation* UGM Yogyakarta**  
(Sumber: Data Proyek *Soil Investigation* UGM, 2018)



**Gambar 5.2 Titik Koordinat Lokasi Data N-SPT titik BH-02 Soil Investigation UGM Yogyakarta**  
(Sumber : Data Proyek Soil Investigation, 2018)



**Gambar 5.3 Titik Koordinat Lokasi Data N-SPT titik BH-04 Soil Investigation UGM Yogyakarta**  
(Sumber : Data Proyek Soil Investigation, 2018)

Diperlukan pula data propertis tanah dalam perhitungan analisis potensi likuifaksi yang dapat dilihat pada Tabel 5.1 hingga Tabel 5.3 sebagai berikut.

**Tabel 5.1 Propertis Tanah Titik Bor BH-01**

index properties									
Boring	Depth	Wn	$\gamma_d$	$\gamma_m$	G	e	n	Sr	% passing sieve No 200
No	M	%	gr/cm <sup>3</sup>	gr/cm <sup>3</sup>			%	%	
BH-01									
1	4.5-5.0 m	18,56	1,529	1,81	2,79	0,54	35,09	95,9	3,14
2	9.0-9.5 m	22,42	1,476	1,81	2,79	0,54	47,18	70,13	2,85

(Sumber: Data Proyek *Soil Investigation* UGM, 2018)

**Tabel 5.2 Propertis Tanah Titik Bor BH-02**

index properties									
Boring	Depth	Wn	$\gamma_d$	$\gamma_m$	G	e	n	Sr	% passing sieve No 200
No	M	%	gr/cm <sup>3</sup>	gr/cm <sup>3</sup>			%	%	
BH-02									
1	5,0-5,5 m	17,45	1,516	1,78	2,8	0,84	45,8	57,77	2,40
2	11,0-11,5 m	14,90	1,538	1,77	2,75	0,79	44,06	52,02	4,80

(Sumber: Data Proyek *Soil Investigation* UGM, 2018)

**Tabel 5.3 Propertis Tanah Titik Bor BH-04**

index properties									
Boring	Depth	Wn	$\gamma_d$	$\gamma_m$	G	e	n	Sr	% passing sieve No 200
No	M	%	gr/cm <sup>3</sup>	gr/cm <sup>3</sup>			%	%	
BH-04									
1	6,5-7 m	18,84	1,469	1,75	2,87	0,95	48,85	56,68	0
2	14,5-15 m	22,23	1,453	1,78	2,70	0,86	46,23	70,16	0,91

(Sumber: Data Proyek *Soil Investigation* UGM, 2018)

## 5.2 Penentuan Nilai Percepatan Gempa di Permukaan Tanah

Berdasarkan SNI 1726-2019 tentang tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung, percepatan tanah maksimum untuk evaluasi likuifaksi menggunakan percepatan puncak  $MCE_G$ . Perhitungan amaks diperoleh dari nilai  $PGA_M$  dengan menggunakan Persamaan 5.1 sebagai berikut.

$$PGA_M = F_{PGA} \times PGA \quad (5.1)$$

PGA adalah percepatan tanah puncak terpetakan yang diperoleh dari Gambar 3.8. Dalam peta PGA, nilai PGA Kawasan UGM Yogyakarta didapat 0,3 g.  $F_{PGA}$  adalah koefisien situs yang didapat tanah PGA Kawasan UGM Yogyakarta merupakan tanah sedang (SD) dengan N antara 1 sampai 60 dan PGA 0,3 g maka nilai  $F_{PGA}$  adalah 1,3. Maka nilai amaks dapat dihitung sebagai berikut.

$$\alpha_{max} = PGA_M = 1,3 \cdot 0,3$$

$$\alpha_{max} = PGA_M = 0,39$$



### 5.3 Analisis Likuifaksi Metode SPT (*Standard Penetration Test*)

Analisis ini ditujukan untuk mencari potensi kejadian likuifaksi berdasarkan nilai FS (*Factor of Safety*) atau faktor keamanan dengan menggunakan metode yang direkomendasikan oleh *National Centre for Earthquake Engineering Research* (NCEER). Dimana FS merupakan perbandingan dari nilai *cyclic stress ratio* (CSR) dan *cyclic resistance ratio* (CRR). CSR dan CRR merupakan parameter yang akan dipakai untuk menganalisis potensi likuifaksi pada perhitungan selanjutnya.

Pada bab V ini akan ditampilkan perhitungan pada titik BH-01, sedangkan untuk titik yang lain akan ditampilkan hasil analisisnya pada Tabel 5.4 dan Tabel 5.5. Diketahui data muka air tanah pada titik BH-01 adalah 10 m dan  $\gamma$  pada kedalaman 4-4,5 meter = 17,738 kN/m<sup>3</sup>,  $\gamma$  pada kedalaman 9-9,5 meter 17,738 kN/m<sup>3</sup>. Berikut merupakan langkah-langkah analisis likuifaksi metode yang diterapkan oleh *National Centre for Earthquake Engineering Research* (NCEER) dengan menggunakan data SPT (*Standard Penetration Test*).

#### 5.3.1 Perhitungan Nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) Setiap Lapisan Tanah

##### 1. Tegangan vertikal total ( $\sigma_v$ ) dan Tegangan vertikal efektif ( $\sigma'_v$ )

###### a. Kedalaman 2 meter

Tanah bukan tanah jenuh air maka perhitungan menggunakan persamaan (3.13) sebagai berikut.

$$\sigma_v = \sum (h \times \gamma)$$

$$\sigma_v = 2 \times 14,984$$

$$\sigma_v = 29,968 \text{ kN/m}^3$$

###### b. Kedalaman 4 m

Tanah bukan tanah jenuh air maka perhitungan menggunakan Persamaan (3.14) sebagai berikut.

$$\sigma_v = \sum (h \times \gamma)$$

$$\sigma_v = (2 \times 14,984) + ((4-2) \times 14,984)$$

$$\sigma_v = 59,937 \text{ kN/m}^3$$

###### c. Kedalaman 6 m

Tanah bukan tanah jenuh air maka perhitungan menggunakan Persamaan (3.14) sebagai berikut.

$$\sigma_v = \sum (h \times \gamma)$$

$$\sigma_v = (2 \times 14,984) + ((4-2) \times 14,984) + ((6-4) \times 14,984)$$

$$\sigma_v = 89,905 \text{ kN/m}^3$$

d. Kedalaman 8 m

Tanah bukan tanah jenuh air maka perhitungan menggunakan Persamaan (3.14) sebagai berikut.

$$\sigma_v = \sum (h \times \gamma)$$

$$\sigma_v = (2 \times 14,984) + ((4-2) \times 14,984) + ((6-4) \times 14,984) + ((8-6) \times 14,984)$$

$$\sigma_v = 119,874 \text{ kN/m}^3$$

e. Kedalaman 10 m (Batas Muka Air Tanah)

Tanah bukan tanah jenuh air maka perhitungan menggunakan Persamaan (3.14) sebagai berikut.

$$\sigma'_v = \sum (h \times \gamma)$$

$$\sigma'_v = (2 \times 14,984) + ((4-2) \times 14,984) + ((6-4) \times 14,984) + ((8-6) \times 14,984) + ((10-8) \times 14,984)$$

$$\sigma'_v = 148,862 \text{ kN/m}^3$$

f. Kedalaman 12 m

Lapisan tanah kedalaman 12 m hingga 30 m merupakan tanah jenuh air maka perhitungan menjadi tegangan yang terjadi diatas permukaan air ditambah dengan tegangan yang berada di bawah muka air hingga kedalaman tertentu. Perhitungan tegangan normal dan efektif dapat dilihat pada rangkaian perhitungan berikut.

1) Perhitungan angka pori menggunakan Persamaan (5.2) berikut.

$$e = \frac{n}{1-n} \tag{5.2}$$

$$e = \frac{0,3509}{1-0,3509} = 0,541$$

2) Perhitungan  $\gamma_{sat}$  menggunakan persamaan (5.3) berikut

$$\gamma_{sat} = \frac{\gamma_w(G_s+e)}{1+e} \tag{5.3}$$

$$\gamma_{sat} = \frac{17,738(2,79+0,541)}{1+0,541}$$

$$= 34,509 \text{ KN/m}^3$$

Oleh karena itu diperoleh tegangan vertical total dan tegangan efektif tanah pada kedalaman 10 m sebagai berikut

$$\sigma_v = \sum (h \times \gamma)$$

$$\sigma_v = 148,862 + ((12-10) \times 34,509)$$

$$\sigma_v = 217,880 \text{ KN/m}^3$$

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

$$\sigma'_v = 217,880 - ((12-10) \times 9,81)$$

$$\sigma'_v = 198,260 \text{ KN/m}^3$$

Untuk perhitungan selanjutnya pada titik BH-01 akan ditampilkan untuk hasil analisis pada kedalaman berikutnya dan pada 2 titik yang lain dapat dilihat pada Tabel 5.5 dan 5.6.

## 2. Faktor reduksi tegangan ( $r_d$ )

$$r_d = 1,00 - 0,00765z$$

$$r_d = 1,00 - 0,00765 \times 2$$

$$r_d = 0,985$$

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

$$\text{CSR} = 0,65 \times \frac{\alpha_{\max} \cdot \sigma_v}{g \cdot \sigma'_v} \times r_d$$

$$\text{CSR} = 0,6 \times \frac{0,3 \cdot 1,3 \cdot 1}{9,81} \times 0,985$$

$$\text{CSR} = 0,25$$

## 5.3.2 Perhitungan Nilai *Cyclic Resistant Ratio* (CRR) Setiap Lapisan Tanah

### 1. *Factor for normalize* ( $C_N$ )

$$C_N = \left( \frac{2,2}{1,2 + \frac{\sigma'_v}{Pa}} \right)$$

$$C_N = \left( \frac{2,2}{1,2 + \frac{29,968}{100}} \right)$$

$$C_N = 1,467$$

### 2. *Correction Standard Penetration Resistance* ( $(N_1)_{60}$ )

$$(N_1)_{60} = N_M \cdot C_N \cdot C_E \cdot C_B \cdot C_R \cdot C_S$$

$$= 15 \times 1,467 \times 1 \times 1 \times 0,75 \times 1$$

$$= 16,503$$

### 3. $(N_1)_{60}$ adjusted to equivalent clean sand value ( $(N_1)_{60cs}$ )

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

$$(N_1)_{60cs} = 0 + 1 \times (16,503)$$

$$(N_1)_{60cs} = 16,503$$

#### 4. Cyclic Resistance Ratio (CRR)

$$CRR = \frac{1}{34 - (N_1)_{60CS}} + \frac{(N_1)_{60CS}}{135} + \frac{50}{(10(N_1)_{60CS} + 45)^2} - \frac{1}{200}$$

$$CRR = \frac{1}{34 - 16,503} + \frac{16,503}{135} + \frac{50}{(10 \times 16,503 + 45)^2} - \frac{1}{200}$$

$$CRR = 0,176$$

CRR untuk magnitudo 6,5

$$MSF = \frac{10^{2,24}}{M_W^{2,56}} = \frac{10^{2,24}}{6,5^{2,56}} = 1,44192$$

$$CRR_{6,5} = CRR_{7,5} * MSF * K_\sigma * K_a$$

$$CRR_{6,5} = 0,176 * 1,44192 * 1 * 1$$

$$CRR_{6,5} = 0,253$$

CRR untuk magnitudo 8,5

$$MSF = \frac{10^{2,24}}{M_W^{2,56}} = \frac{10^{2,24}}{8,5^{2,56}} = 0,726$$

$$CRR_{8,5} = CRR_{7,5} * MSF * K_\sigma * K_a$$

$$CRR_{8,5} = 0,176 * 0,726 * 1 * 1$$

$$CRR_{8,5} = 0,127$$

#### 5. Safety Factor (SF)

$$SF_{M_W=7,5} = \frac{CRR}{CSR} = \frac{0,176}{0,250} = 0,703 < 1 \text{ artinya secara determinan}$$

“Likufaksi”

$$SF_{M_W=6,5} = \frac{CRR}{CSR} = \frac{0,253}{0,250} = 1,014 > 1 \text{ artinya secara determinan “Tidak}$$

Likufaksi”

$$SF_{M_W=8,5} = \frac{CRR}{CSR} = \frac{0,122}{0,250} = 0,488 < 1 \text{ artinya secara determinan}$$

“Likufaksi”



#### 5.4 Analisis Likuifaksi Metode HBF (2012)

Metode HBF untuk mengevaluasi potensi likuifaksi tanah berpasir. Metode HBF dibuat setelah Gempa Chi-Chi, Taiwan 1999 ( $M_w = 7.6$ ) menggunakan basis data sejarah kasus yang dikembangkan berdasarkan pengamatan lapangan dan uji in situ dan laboratorium di daerah yang terkena dampak peristiwa 1999. Metode HBF yang diperbarui yang dilaporkan di sini mencerminkan upaya penelitian dan praktik selama 20 tahun di Taiwan setelah peristiwa 1999. Dimana dengan mencari korelasi *cyclic resistance ratio* (CRR) dan *cyclic stress ratio* (CSR) merupakan parameter yang akan dipakai untuk menganalisis probabilitas likuifaksi yaitu nilai N-SPT terkoreksi pada setiap kedalaman yang akan ditinjau. Pada perhitungan selanjutnya yaitu dengan menampilkan nilai FS (*Factor of Safety*). Dibawah ini akan ditampilkan untuk perhitungan beberapa titik BH-01 dan untuk BH-02 dan BH-04 dapat dilihat pada Tabel 5.5 dan 5.6.

$$CRR_{7,5} = 0,08 + \frac{0,0035(N_1)_{60CS}}{1 - (N_1)_{60CS}/39}$$

a. Untuk titik BH-01 kedalaman 2 meter

$$CRR_{7,5} = 0,08 + \frac{0,0035 \times 16,503}{1 - 16,503/39}$$

$$CRR_{7,5} = 0,180$$

$$SF_{M_w=7,5} = \frac{CRR}{CSR} = \frac{0,180}{0,250} = 0,722 < 1 \text{ artinya secara determinan "Likuifaksi"}$$

b. Untuk titik BH-01 kedalaman 4 meter

$$CRR_{7,5} = 0,08 + \frac{0,0035 \times 19,257}{1 - 19,257/39}$$

$$CRR_{7,5} = 0,213$$

$$SF_{M_w=7,5} = \frac{CRR}{CSR} = \frac{0,213}{0,250} = 0,867 < 1 \text{ artinya secara determinan "Likuifaksi"}$$

c. Untuk titik BH-01 kedalaman 6 meter

$$CRR_{7,5} = 0,08 + \frac{0,0035 \times 20,438}{1 - 20,438/39}$$

$$CRR_{7,5} = 0,230$$

$$SF_{M_{W=7,5}} = \frac{CRR}{CSR} = \frac{0,230}{0,250} = 0,952 < 1 \text{ artinya secara determinan "Likuifaksi"}$$

Untuk perhitungan selanjutnya pada titik BH-01 akan ditampilkan untuk hasil analisis pada kedalaman berikutnya dan pada 2 titik yang lain dapat dilihat pada Tabel 5.5 dan 5.6.

### 5.5 Analisis Likuifaksi Metode Boulanger and Idriss (2014)

Boulanger and Idriss mengusulkan metode rumus analisis semi empiris untuk menganalisis likuifaksi akibat gempa. Metode ini menggunakan Fine Content (FC) dan data SPT terkoreksi ( $(N1)_{60cs}$ ) dalam perhitungan CRR. Metode ini juga menggunakan koreksi tekanan overburden ( $K_S$ ).

Berikut adalah persamaan metode Boulanger and Idriss (2014).

$$CRR_{7,5} = \exp\left(\frac{(N1)_{60cs}}{14,1} + \left(\frac{(N1)_{60cs}}{126}\right)^2 + \left(\frac{(N1)_{60cs}}{23,6}\right)^3 + \left(\frac{(N1)_{60cs}}{25,4}\right)^4 - 2,8\right)$$

a. Untuk titik BH-01 kedalaman 2 meter

$$CRR_{7,5} = \exp\left(\frac{16,503}{14,1} + \left(\frac{16,503}{126}\right)^2 + \left(\frac{16,503}{23,6}\right)^3 + \left(\frac{16,503}{25,4}\right)^4 - 2,8\right)$$

$$CRR_{7,5} = 0,169$$

$$SF_{M_{W=7,5}} = \frac{CRR}{CSR} = \frac{0,169}{0,250} = 0,678 < 1 \text{ artinya secara determinan "Likuifaksi"}$$

b. Untuk titik BH-01 kedalaman 4 meter

$$CRR_{7,5} = \exp\left(\frac{19,257}{14,1} + \left(\frac{19,257}{126}\right)^2 + \left(\frac{19,257}{23,6}\right)^3 + \left(\frac{19,257}{25,4}\right)^4 - 2,8\right)$$

$$CRR_{7,5} = 0,197$$

$$SF_{M_{W=7,5}} = \frac{CRR}{CSR} = \frac{0,197}{0,250} = 0,802 < 1 \text{ artinya secara determinan "Likuifaksi"}$$

c. Untuk titik BH-01 kedalaman 6 meter

$$CRR_{7,5} = \exp\left(\frac{20,538}{14,1} + \left(\frac{20,538}{126}\right)^2 + \left(\frac{20,538}{23,6}\right)^3 + \left(\frac{20,538}{25,4}\right)^4 - 2,8\right)$$

$$CRR_{7,5} = 0,211$$

$$SF_{M_{W=7,5}} = \frac{CRR}{CSR} = \frac{0,211}{0,250} = 0,874 < 1 \text{ artinya secara determinan "Likuifaksi"}$$

**Tabel 5.4 Rekapitulasi Analisis Potensi Likuifaksi untuk titik BH-01 dengan metode NCEER (2001), HBF (2012), dan Boulanger & Idriss (2014)**

Titik Bor	MAT (m)	Kedalaman (H) (m)	h	Jenis Tanah	Gs	amax/g	N - SPT	FC (%)	MSF for sand	Density						n	e	rd	σ <sub>v</sub>	U	σ' <sub>v</sub>	(σ'/σ')	CSR	Faktor Koreksi (N1)60						Faktor (N) <sub>60CS</sub>			NCEER (2001)			HBF (2012)			Boulanger & Idriss (2014)			
										Yb (gr/cm3)	Yb (kN/m3)	γd (g/cm3)	γd (kN/m3)	ysat (kN/m3)	γ' (kN/m3)									Cn	Ce	Cb	Cr	Cs	(N1)60	α	β	(N) <sub>60CS</sub>	CRR 7.5	SF	Cek	CRR 7.5	SF	Cek	CRR 7.5	SF	Cek	
																																										kN/m2
BH-01		2	2	clayey sand	2.79	0.39	15	3.14	1	1.78	17.444	1.529	14.984	38.015		0.3412	0.518	0.985	29.968	0	29.968	1.000	0.250	1.467	1	1	0.75	1	16.503	0.0	1.0	16.503	0.176	0.703	LIKUIFAKSI	0.180	0.722	LIKUIFAKSI	0.169	0.678	LIKUIFAKSI	
		4	2	sand	2.79	0.39	21	3.14	1	1.79	17.542	1.529	14.984	37.578		0.3619	0.567	0.969	59.937	0	59.937	1.000	0.246	1.223	1	1	0.75	1	19.257	0.0	1.0	19.257	0.206	0.840	LIKUIFAKSI	0.213	0.867	LIKUIFAKSI	0.197	0.802	LIKUIFAKSI	
		6	2	sand	2.79	0.39	26	3.14	1	1.81	17.738	1.529	14.984	38.348		0.3509	0.541	0.954	89.905	0	89.905	1.000	0.242	1.048	1	1	0.75	1	20.438	0.0	1.0	20.438	0.221	0.913	LIKUIFAKSI	0.230	0.952	LIKUIFAKSI	0.211	0.874	LIKUIFAKSI	
		8	2	sand	2.79	0.39	29	3.14	1	1.81	17.738	1.529	14.984	38.348		0.3509	0.541	0.939	119.874	0	119.874	1.000	0.238	0.917	1	1	0.75	1	19.948	0.0	1.2	23.938	0.243	1.021	TIDAK LIKUIFAKSI	0.297	0.986	LIKUIFAKSI	0.267	1.121	TIDAK LIKUIFAKSI	
		10	10	2	sand	2.79	0.39	33	2.85	1	1.81	17.738	1.479	14.494	34.509		0.4718	0.893	0.907	148.862	0	148.862	1.000	0.230	0.818	1	1	0.75	1	20.252	0.0	1.0	20.252	0.219	0.951	LIKUIFAKSI	0.227	0.989	LIKUIFAKSI	0.209	0.909	LIKUIFAKSI
		12	2	sand	2.79	0.39	33	2.85	1	1.81	17.738	1.479	14.494	34.509	24.699	0.4718	0.893	0.854	217.880	19.620	198.260	1.099	0.238	0.691	1	1	0.75	1	17.109	0.0	1.0	17.109	0.182	0.765	LIKUIFAKSI	0.187	0.785	LIKUIFAKSI	0.175	0.736	LIKUIFAKSI	
		14	2	sand	2.79	0.39	30	2.85	1	1.81	17.738	1.479	14.494	34.509	24.699	0.4718	0.893	0.800	286.898	39.240	247.658	1.158	0.235	0.598	1	1	0.75	1	13.464	0.0	1.0	13.464	0.145	0.617	LIKUIFAKSI	0.152	0.647	LIKUIFAKSI	0.144	0.611	LIKUIFAKSI	
		16	2	sand	2.105263	0.26	39	2.85	1	1.901	18.630	1.112	10.898	29.506	19.696	0.4718	0.893	0.747	345.909	58.860	287.049	1.205	0.152	0.540	1	1	0.75	1	15.809	0.0	1.0	15.809	0.168	1.107	TIDAK LIKUIFAKSI	0.173	1.138	TIDAK LIKUIFAKSI	0.163	1.072	TIDAK LIKUIFAKSI	
		18	2	sand	2.875805	0.26	50	2.85	1	1.953	19.139	1.519	14.886	38.103	28.293	0.4718	0.893	0.500	422.115	78.480	343.635	1.228	0.104	0.475	1	1	0.75	1	17.794	0.0	1.0	17.794	0.190	1.826	TIDAK LIKUIFAKSI	0.195	1.874	TIDAK LIKUIFAKSI	0.182	1.750	TIDAK LIKUIFAKSI	
		20	2	sand	1.992506	0.26	42	2.85	1	1.913	18.747	1.223	11.985	30.168	20.358	0.3862	0.629	0.640	482.451	98.100	384.351	1.255	0.136	0.436	1	1	0.75	1	13.740	0.0	1.0	13.740	0.148	1.087	TIDAK LIKUIFAKSI	0.154	1.136	TIDAK LIKUIFAKSI	0.146	1.074	TIDAK LIKUIFAKSI	
		22	2	sand	2.178315	0.26	45	2.85	1	1.93	18.914	1.334	13.073	32.562	22.752	0.3876	0.633	0.547	547.576	117.720	429.856	1.274	0.126	0.400	1	1	0.75	1	13.504	0.0	1.0	13.504	0.145	1.151	TIDAK LIKUIFAKSI	0.152	1.206	TIDAK LIKUIFAKSI	0.144	1.140	TIDAK LIKUIFAKSI	
		24	2	sand	2.304258	0.26	48	2.85	1	1.932	18.934	1.445	14.161	34.419	24.609	0.3729	0.595	0.552	616.415	137.340	479.075	1.287	0.120	0.367	1	1	0.75	1	13.220	0.0	1.0	13.220	0.143	1.188	TIDAK LIKUIFAKSI	0.150	1.250	TIDAK LIKUIFAKSI	0.142	1.181	TIDAK LIKUIFAKSI	
		26	2	sand	2.768766	0.26	56	2.85	1	1.977	19.306	1.741	17.062	40.778	30.968	0.3712	0.590	0.536	697.971	156.960	541.011	1.290	0.117	0.333	1	1	0.75	1	13.979	0.0	1.0	13.979	0.150	1.283	TIDAK LIKUIFAKSI	0.156	1.337	TIDAK LIKUIFAKSI	0.148	1.264	TIDAK LIKUIFAKSI	
	28	2	sand	2.489072	0.26	50	2.85	1	1.953	19.139	1.519	14.886	36.560	26.750	0.3912	0.643	0.520	771.091	176.580	594.511	1.297	0.114	0.308	1	1	0.75	1	11.546	0.0	1.0	11.546	0.127	1.114	TIDAK LIKUIFAKSI	0.137	1.206	TIDAK LIKUIFAKSI	0.129	1.133	TIDAK LIKUIFAKSI		
	30	2	sand	2.836429	0.26	56	2.85	1	1.972	19.326	1.741	17.062	41.109	31.299	0.3862	0.629	0.504	853.310	196.200	657.110	1.299	0.111	0.283	1	1	0.75	1	11.890	0.0	1.0	11.890	0.130	1.177	TIDAK LIKUIFAKSI	0.140	1.265	TIDAK LIKUIFAKSI	0.132	1.190	TIDAK LIKUIFAKSI		

**Tabel 5.5 Rekapitulasi Analisis Potensi Likuifaksi untuk titik BH-02 dengan metode NCEER (2001), HBF (2012), dan Boulanger & Idriss (2014)**

Titik Bor	MAT (m)	Kedalaman (H) (m)	h	Jenis Tanah	Gs	amax/g	N - SPT	FC (%)	MSF for sand	Density						n	e	rd	σ <sub>v</sub>	U	σ' <sub>v</sub>	(σ'/σ')	CSR	Faktor Koreksi (N1)60						Faktor (N) <sub>60CS</sub>			NCEER (2001)			HBF (2012)			Boulanger & Idriss (2014)			
										Yb (gr/cm3)	Yb (kN/m3)	γd (g/cm3)	γd (kN/m3)	ysat (kN/m3)	γ' (kN/m3)									Cn	Ce	Cb	Cr	Cs	(N1)60	α	β	(N) <sub>60CS</sub>	CRR 7.5	SF	Cek	CRR 7.5	SF	Cek	CRR 7.5	SF	Cek	
																																										kN/m2
BH-02		2	2	clayey silt	2.461688	0.39	16	2.4	1	1.77	17.346	1.516	14.861	32.964		0.384	0.623	0.985	29.721	0	29.721	1.000	0.250	1.469	1	1	0.75	1	17.633	0.0	1.0	17.633	0.188	0.752	LIKUIFAKSI	0.193	0.772	LIKUIFAKSI	0.180	0.721	LIKUIFAKSI	
		4	2	clayey sand	2.461688	0.39	18	2.4	1	1.77	17.346	1.516	14.861	32.964		0.384	0.623	0.969	59.443	0.000	59.443	1.000	0.246	1.226	1	1	0.75	1	16.551	0.0	1.0	16.551	0.176	0.716	LIKUIFAKSI	0.181	0.735	LIKUIFAKSI	0.170	0.691	LIKUIFAKSI	
		6	2	clayey sand	2.797786	0.39	23	2.4	1	1.78	17.444	1.516	14.861	34.441		0.458	0.845	0.954	89.164	0.000	89.164	1.000	0.242	1.052	1	1	0.75	1	18.144	0.0	1.0	18.144	0.193	0.800	LIKUIFAKSI	0.199	0.822	TIDAK LIKUIFAKSI	0.185	0.766	LIKUIFAKSI	
		7.3	7.3	1.3	clayey sand	2.797786	0.39	28	2.4	1	1.78	17.444	1.516	14.861	34.441		0.458	0.845	0.944	108.483	0.000	108.483	1.000	0.239	0.963	1	1	0.75	1	20.220	0.0	1.0	20.220	0.218	0.912	LIKUIFAKSI	0.227	0.948	LIKUIFAKSI	0.209	0.871	LIKUIFAKSI
		10	2.7	clayey sand	2.797786	0.39	28	2.4	1	1.78	17.444	1.516	14.861	34.441	24.631	0.458	0.845	0.924	201.475	26.487	174.988	1.151	0.270	0.746	1	1	0.75	1	15.662	0.0	1.0	15.662	0.167	0.619	LIKUIFAKSI	0.172	0.637	LIKUIFAKSI	0.162	0.600	LIKUIFAKSI	
		12	2	clayey sand	2.749911	0.39	32	4.8	1	1.783	17.473	1.538	15.075	34.578	24.768	0.4406	0.788	0.908	270.631	46.107	224.524	1.205	0.278	0.639	1	1	0.75	1	15.325	0.0	1.0	15.325	0.163	0.589	LIKUIFAKSI	0.168	0.607	LIKUIFAKSI	0.159	0.573	LIKUIFAKSI	
		14	2	sand	1.356121	0.39	32	4.8	1	1.783	17.473	0.853	8.359	21.387	11.577	0.371	0.590	0.893	313.406	65.727	247.679	1.265	0.286	0.598	1	1	0.75	1	14.360	0.0	1.0	14.360	0.154	0.537	LIKUIFAKSI	0.160	0.557	LIKUIFAKSI	0.151	0.527	LIKUIFAKSI	
		16	2	sand	1.301435	0.39	31	4.8	1	1.78	17.444	0.816	7.997	20.741	10.931	0.373	0.595	0.878	354.888	85.347	269.541	1.317	0.293	0.565	1	1	0.75	1	13.131	0.0	1.0	13.131	0.142	0.484	LIKUIFAKSI	0.149	0.510	LIKUIFAKSI	0.141	0.482	LIKUIFAKSI	
		18	2	sand	1.492754	0.39	34	4.8	1	1.785	17.493	0.927	9.085	22.846	13.036	0.379	0.610	0.862	400.580	104.967	295.613	1.355	0.296	0.529	1	1	0.75	1	13.498	0.0	1.0	13.498	0.145	0.491	LIKUIFAKSI	0.152	0.514	LIKUIFAKSI	0.144	0.486	LIKUIFAKSI	
		20	2	sand	1.532591	0.39	35	4.8	1	1.786	17.503	0.964																														

**Tabel 5.6 Rekapitulasi Analisis Potensi Likuifaksi untuk titik BH-04 dengan metode NCEER (2001), HBF (2012), dan Boulanger & Idriss (2014)**

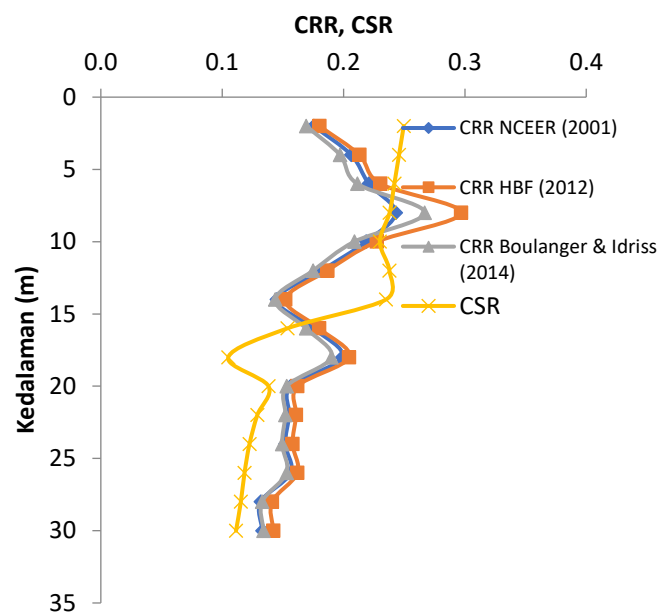
Titik Bor	MAT (m)	Kedalaman (H) (m)	h	Jenis Tanah	Gs	amax/g	N - SPT	FC (%)	MSF for sand	Density					n	e	rd	σ <sub>v</sub>	U	σ' <sub>v</sub>	(σ'/σ')	CSR	Faktor Koreksi (N1)60					(N1)60	Faktor (N <sub>1</sub> ) <sub>60CS</sub>			(N <sub>1</sub> ) <sub>60CS</sub>	NCEER (2001)			HBF (2012)			Boulanger & Idriss (2014)		
										γ <sub>b</sub> (gr/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>b</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	γ <sub>d</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	γ <sub>d</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	γ <sub>sat</sub> (kN/m <sup>3</sup> )									γ <sub>sat</sub> (kN/m <sup>3</sup> )	σ <sub>v</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	σ <sub>v</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	σ <sub>v</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	σ <sub>v</sub> (kN/m <sup>2</sup> )		σ <sub>v</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	Cn	Ce		Cb	Cr	Cs	α	β	CRR 7.5	SF	Cek	CRR 7.5
BH-04		2	2	clayey sand	2.87	0.39	14	3.88	1	1.611	15.788	1.345	13.178	34.033		0.382	0.618	0.985	26.356	0	26.356	1.000	0.250	1.503	1	1	0.75	1	15.783	0.0	1.0	15.783	0.168	0.673	LIKUIFAKSI	0.173	0.692	LIKUIFAKSI	0.163	0.652	LIKUIFAKSI
		4	2	sand	2.87	0.39	20	3.88	1	1.632	15.994	1.345	13.178	34.208		0.391	0.642	0.969	52.712	0.000	52.712	1.000	0.246	1.274	1	1	0.75	1	19.107	0.0	1.0	19.107	0.205	0.832	LIKUIFAKSI	0.211	0.859	LIKUIFAKSI	0.195	0.795	LIKUIFAKSI
		6	2	sand	2.87	0.39	25	3.88	1	1.632	15.994	1.345	13.178	34.208		0.391	0.642	0.954	79.068	0.000	79.068	1.000	0.242	1.105	1	1	0.75	1	20.722	0.0	1.0	20.722	0.225	0.929	LIKUIFAKSI	0.235	0.971	LIKUIFAKSI	0.215	0.889	LIKUIFAKSI
		8	2	sand	2.87	0.39	28	3.88	1	1.67	16.366	1.345	13.178	31.209		0.515	1.062	0.939	105.424	0.000	105.424	1.000	0.238	0.976	1	1	0.75	1	20.495	0.0	1.0	20.495	0.222	0.931	LIKUIFAKSI	0.231	0.971	LIKUIFAKSI	0.212	0.891	LIKUIFAKSI
		9.7	1.7	sand	2.87	0.39	32	3.88	1	1.67	16.366	1.345	13.178	31.209		0.515	1.062	0.915	127.827	0.000	127.827	1.000	0.232	0.888	1	1	0.75	1	21.305	0.0	1.0	21.305	0.232	1.002	TIDAK LIKUIFAKSI	0.244	1.053	TIDAK LIKUIFAKSI	0.223	0.961	LIKUIFAKSI
		12	2.3	sand	2.87	0.39	33	3.88	1	1.67	16.366	1.345	13.178	31.209	21.399	0.515	1.062	0.854	199.608	22.563	177.045	1.127	0.244	0.741	1	1	0.75	1	18.331	0.0	1.0	18.331	0.196	0.802	LIKUIFAKSI	0.201	0.824	LIKUIFAKSI	0.187	0.767	LIKUIFAKSI
		14	2	sand	2.87	0.39	41	3.88	1	1.67	16.366	1.345	13.178	31.209	21.399	0.515	1.062	0.800	225.964	42.183	183.781	1.230	0.249	0.724	1	1	0.75	1	22.269	0.0	1.0	22.269	0.246	0.986	LIKUIFAKSI	0.262	1.049	TIDAK LIKUIFAKSI	0.237	0.951	LIKUIFAKSI
		16	2	sand	2.132193	0.39	46	2.82	1	1.752	17.170	1.371	13.436	29.669	19.859	0.357	0.555	0.747	252.836	61.803	191.033	1.324	0.251	0.707	1	1	0.75	1	24.403	0.0	1.0	24.403	0.281	1.120	TIDAK LIKUIFAKSI	0.308	1.230	TIDAK LIKUIFAKSI	0.277	1.104	TIDAK LIKUIFAKSI
		18	2	sand	2.213836	0.39	47	2.82	1	1.754	17.189	1.408	13.798	30.459	20.649	0.364	0.572	0.693	280.433	81.423	199.010	1.409	0.248	0.690	1	1	0.75	1	24.310	0.0	1.0	24.310	0.279	1.126	TIDAK LIKUIFAKSI	0.306	1.235	TIDAK LIKUIFAKSI	0.275	1.108	TIDAK LIKUIFAKSI
		20	2	sand	2.229938	0.39	48	2.82	1	1.754	17.189	1.445	14.161	30.889	21.079	0.352	0.543	0.640	308.755	101.043	207.712	1.486	0.241	0.671	1	1	0.75	1	24.168	0.0	1.0	24.168	0.276	1.146	TIDAK LIKUIFAKSI	0.302	1.254	TIDAK LIKUIFAKSI	0.272	1.126	TIDAK LIKUIFAKSI
		22	2	sand	2.93323	0.39	60	2.82	1	1.801	17.650	1.889	18.512	39.624	29.814	0.356	0.553	0.587	345.779	120.663	225.116	1.536	0.228	0.637	1	1	0.75	1	28.686	0.0	1.0	28.686	0.396	1.734	TIDAK LIKUIFAKSI	0.460	2.012	TIDAK LIKUIFAKSI	0.414	1.811	TIDAK LIKUIFAKSI
		24	2	sand	2.915123	0.39	60	2.82	1	1.801	17.650	1.889	18.512	39.553	29.743	0.352	0.543	0.552	382.804	140.283	242.521	1.578	0.221	0.607	1	1	0.75	1	27.309	0.0	1.0	27.309	0.347	1.572	TIDAK LIKUIFAKSI	0.399	1.806	TIDAK LIKUIFAKSI	0.357	1.617	TIDAK LIKUIFAKSI
		26	2	sand	2.853621	0.39	59	2.82	1	1.801	17.650	1.852	18.150	38.883	29.073	0.351	0.541	0.536	419.103	159.903	259.200	1.617	0.220	0.580	1	1	0.75	1	25.672	0.0	1.0	25.672	0.306	1.392	TIDAK LIKUIFAKSI	0.343	1.561	TIDAK LIKUIFAKSI	0.307	1.397	TIDAK LIKUIFAKSI
	28	2	sand	2.910632	0.39	60	2.82	1	1.801	17.650	1.889	18.512	39.536	29.726	0.351	0.541	0.520	456.127	179.523	276.604	1.649	0.217	0.555	1	1	0.75	1	24.962	0.0	1.0	24.962	0.291	1.339	TIDAK LIKUIFAKSI	0.323	1.485	TIDAK LIKUIFAKSI	0.289	1.330	TIDAK LIKUIFAKSI	
	30	2	sand	2.910632	0.39	60	2.82	1	1.801	17.650	1.889	18.512	39.536	29.726	0.351	0.541	0.504	493.152	199.143	294.009	1.677	0.214	0.531	1	1	0.75	1	23.913	0.0	1.0	23.913	0.272	1.269	TIDAK LIKUIFAKSI	0.296	1.383	TIDAK LIKUIFAKSI	0.266	1.243	TIDAK LIKUIFAKSI	

## 5.6 Pembahasan

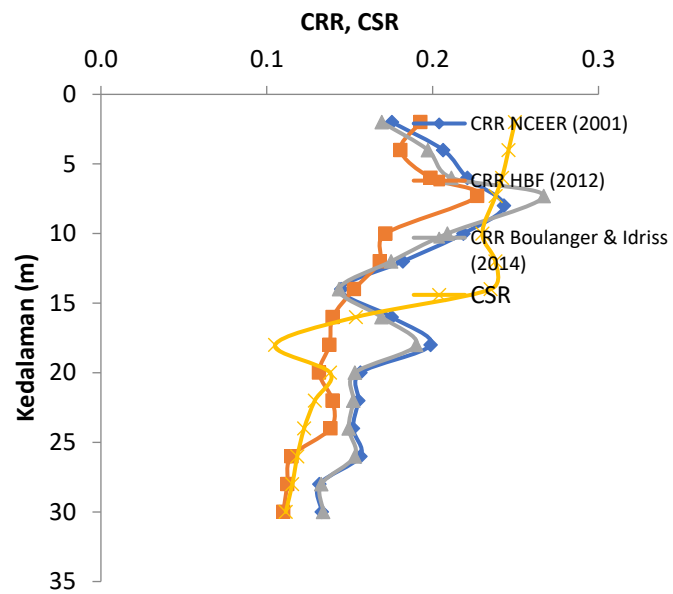
Berdasarkan analisis potensi likuifaksi berdasarkan data N-SPT menggunakan metode NCEER (2001), HBF (2012) dan metode Boulanger-Idriss (2014) didapatkan hasil sebagai berikut.

### 5.6.1 *Cyclic Resistance Ratio* dan *Cyclic Stress Ratio Magnitude Scale 7,5* ( $M_w$ )

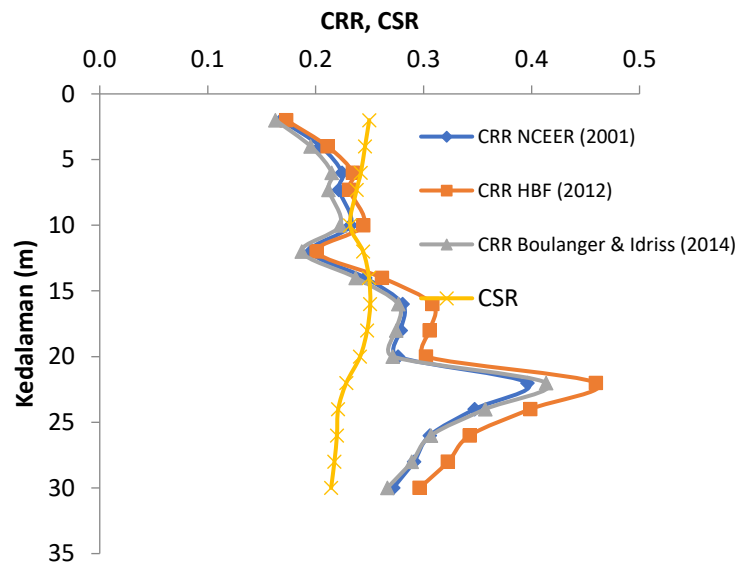
Pada perhitungan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dan *Cyclic Stress Ratio* (CSR) dilakukan pada setiap kedalaman dari nilai N-SPT dan dengan *magnitude Scale 7,5* diketahui Hasil perhitungan dengan metode NCEER (2001), HBF (2012) dan metode Boulanger-Idriss (2014) menunjukkan bahwa besarnya nilai CSR tersebar secara acak pada setiap kedalaman tanpa pola tertentu sehingga besarnya CRR juga acak bervariasi dan berbeda sesuai dengan metode yang digunakan. Pola penyebaran CRR dan CSR pada tiap titik dapat dilihat pada Gambar 5.4 sampai Gambar 5.6 sebagai berikut.



**Gambar 5.4 Grafik Sebaran CRR dan CSR Pada  $M_w$  7,5 Titik BH-01 Universitas Gadjah Mada**



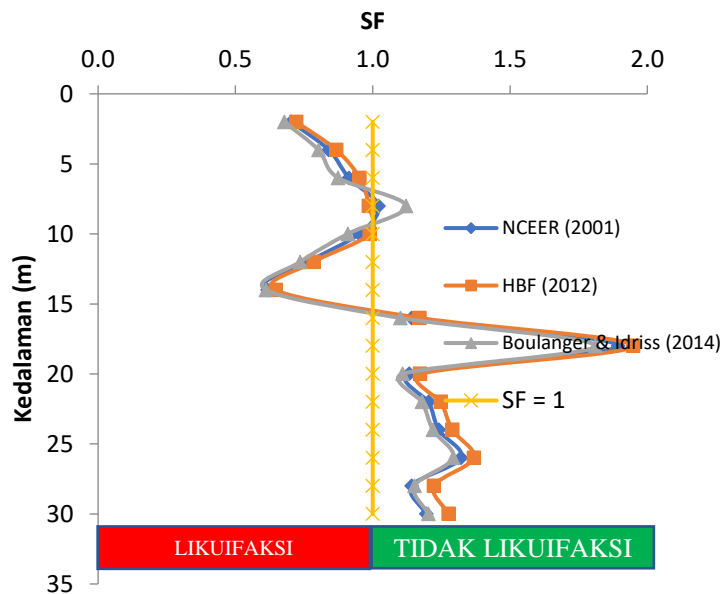
**Gambar 5.5 Grafik Sebaran CRR dan CSR Mw 7,5  
Titik BH-02 Universitas Gadjah Mada**



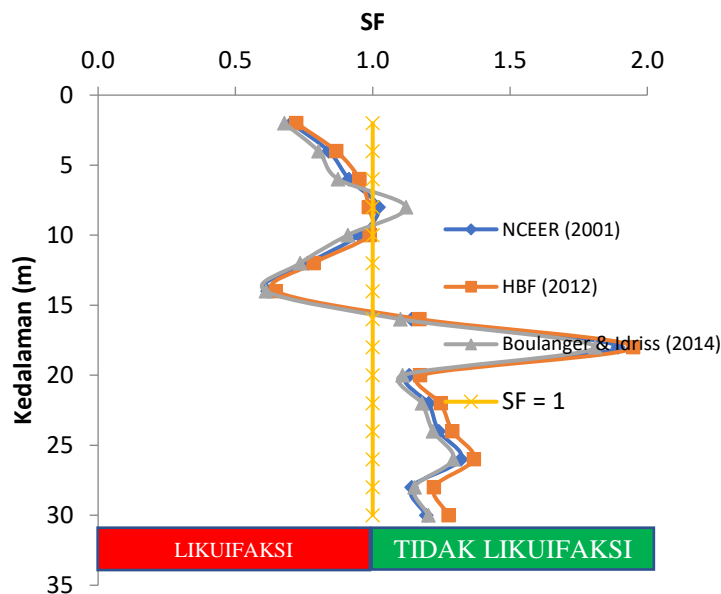
**Gambar 5.6 Grafik Sebaran CRR dan CSR Mw 7,5  
Titik BH-04 Universitas Gadjah Mada**

### 5.6.2 Pengaruh *Moment Magnitude Scale 7,5 (M<sub>w</sub>)*

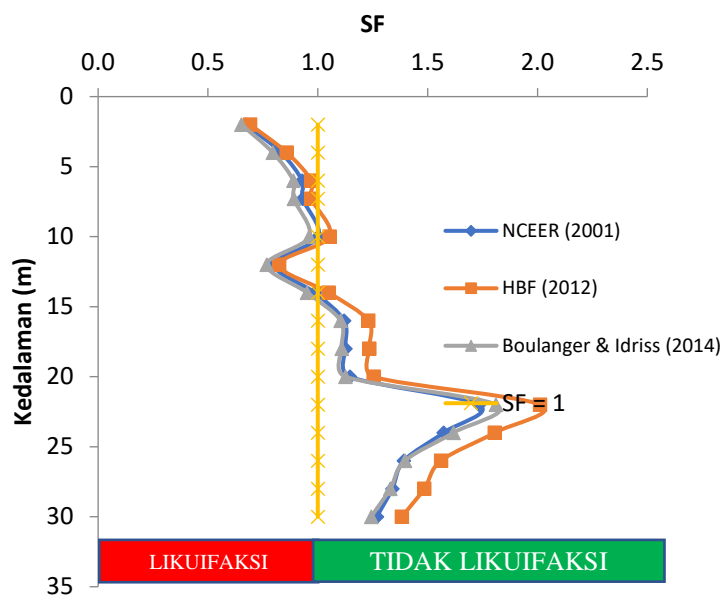
Untuk dapat melihat potensi likuifaksi akibat perbedaan besarnya gempa bumi berdasarkan momen seismik dibuat hubungannya dengan CSR dan CRR, dimana besarnya CSR dan CRR dipresentasikan sebagai faktor keamanan atau *Factor of Safety* (FS) yaitu perbandingan *Cyclic Stress Ratio* (CSR) dan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR), dan dari hasil analisis perhitungan yang dilakukan pada setiap kedalaman di setiap titik didapatkan pola hubungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.7 sampai Gambar 5.9 berikut.



**Gambar 5.7 Potensi Likuifaksi Pada Magnitudo 7,5 di Titik BH-01**



**Gambar 5.8 Potensi Likuifaksi Pada Magnitudo 7,5 di Titik BH-02**



**Gambar 5.9 Potensi Likuifaksi Pada Magnitudo 7,5 di Titik BH-04**

Gambar 5.7 menunjukkan bahwa potensi likuifaksi untuk titik BH-01 dengan skala magnitudo 7,5 dengan uji metode NCEER (2001), HBF (2012) dan metode Boulanger-Idriss (2014) terjadi pada permukaan tanah kedalaman tanah 2 m sampai dengan kedalaman 14 m.

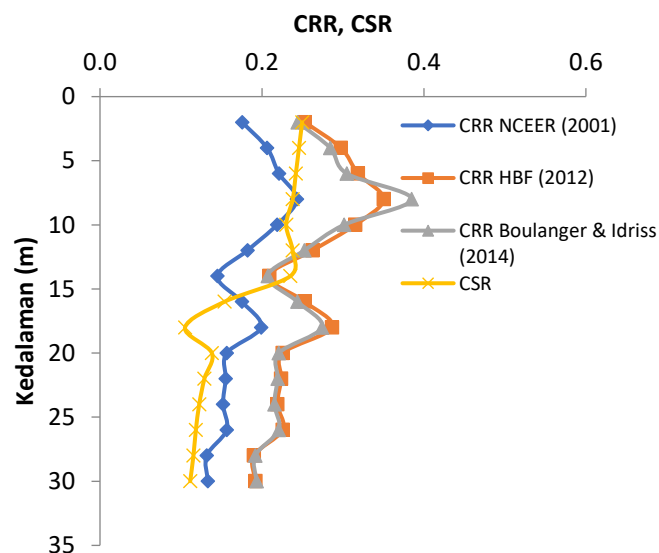


Gambar 5.8 menunjukkan bahwa potensi likuifaksi untuk titik BH-02 dengan skala magnitude 7,5 dengan uji metode NCEER (2001), HBF (2012) dan metode Boulanger-Idriss (2014) terjadi pada permukaan tanah kedalaman tanah 2 m sampai dengan kedalaman 14 m.

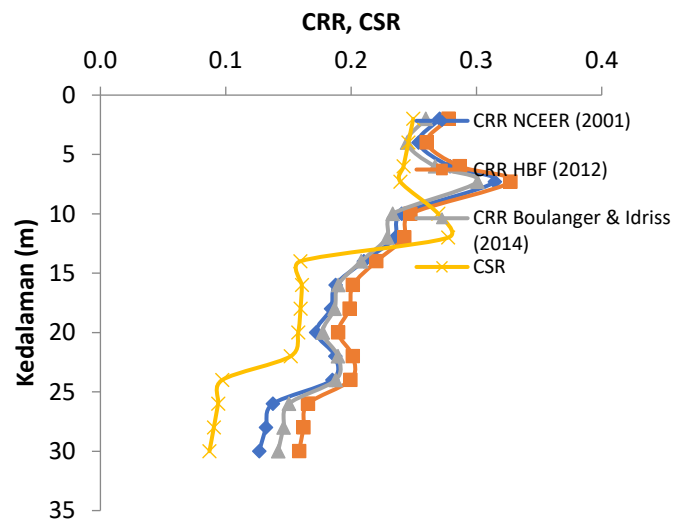
Gambar 5.9 menunjukkan bahwa potensi likuifaksi untuk titik BH-04 dengan skala magnitude 7,5 dengan uji metode NCEER (2001), HBF (2012) dan metode Boulanger-Idriss (2014) terjadi pada permukaan tanah kedalaman tanah 2 m sampai dengan kedalaman 14 m dan untuk kedalaman lebih dari 14 m aman terhadap potensi likuifaksi.

### 5.6.3 *Cyclic Resistance Ratio* dan *Cyclic Stress Ratio Magnitude Scale 6,5* ( $M_w$ )

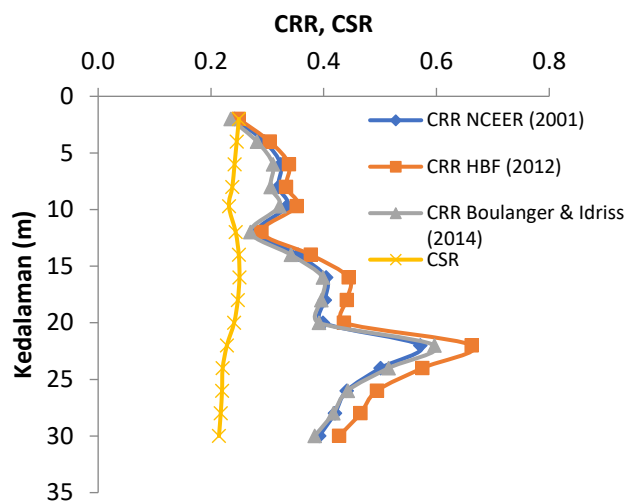
Pada perhitungan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dan *Cyclic Stress Ratio* (CSR) dilakukan pada setiap kedalaman dari nilai N-SPT dan dengan *magnitude Scale 6,5* diketahui Hasil perhitungan dengan metode NCEER (2001), HBF (2012) dan metode Boulanger-Idriss (2014) menunjukkan bahwa besarnya nilai CSR tersebar secara acak pada setiap kedalaman tanpa pola tertentu sehingga besarnya CRR juga acak bervariasi dan berbeda sesuai dengan metode yang digunakan. Pola penyebaran CRR dan CSR pada tiap titik dapat dilihat pada Gambar 5.10 sampai Gambar 5.12 sebagai berikut.



**Gambar 5.10 Grafik Sebaran CRR dan CSR Pada  $M_w$  6,5  
Titik BH-01 Universitas Gadjah Mada**



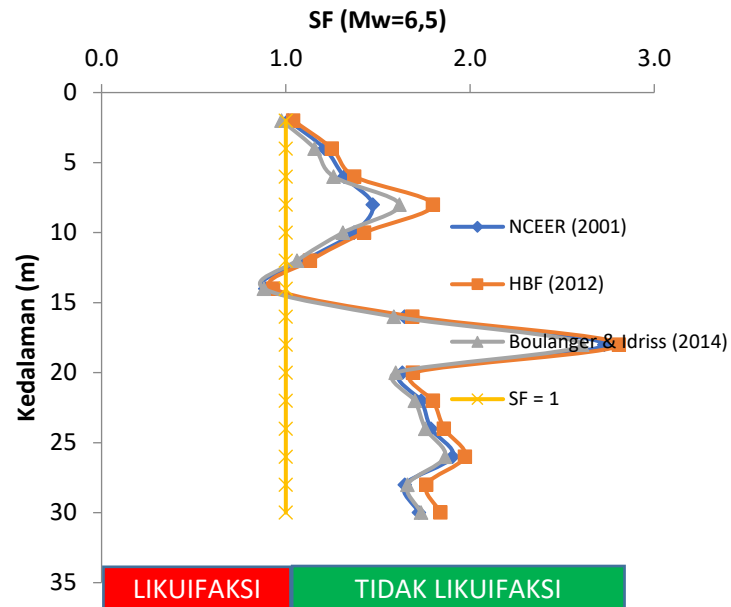
**Gambar 5.11 Grafik Sebaran CRR dan CSR Pada Mw 6,5  
Titik BH-02 Universitas Gadjah Mada**



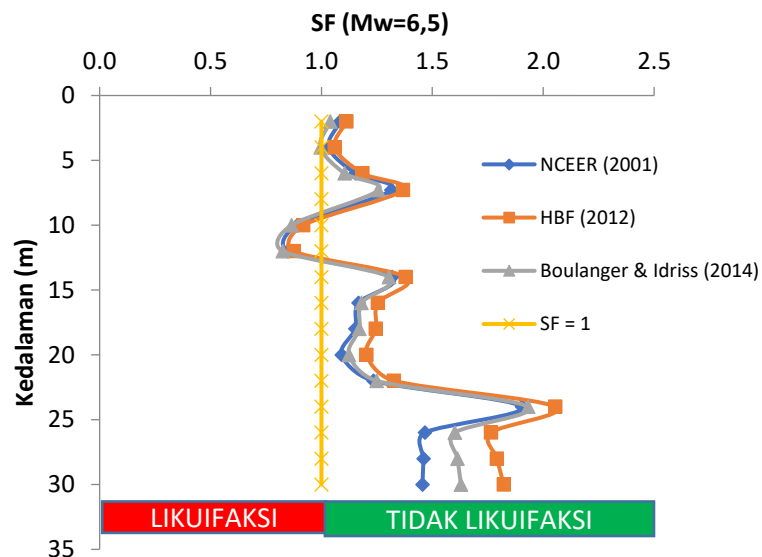
**Gambar 5.12 Grafik Sebaran CRR dan CSR Pada Mw 6,5  
Titik BH-04 Universitas Gadjah Mada**

Untuk dapat melihat potensi likuifaksi akibat perbedaan besarnya gempa bumi berdasarkan momen seismik dibuat hubungannya dengan CSR dan CRR, dimana besarnya CSR dan CRR dipresentasikan sebagai faktor keamanan atau *Factor of Safety* (FS) yaitu perbandingan *Cyclic Stress Ratio* (CSR) dan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR), dan dari hasil analisis perhitungan yang dilakukan pada

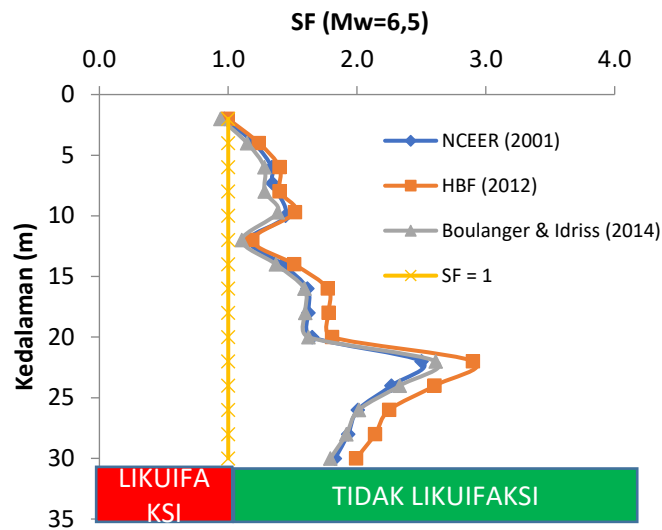
setiap kedalaman di setiap titik didapatkan pola hubungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.13 sampai Gambar 5.15 di halaman selanjutnya.



**Gambar 5.13 Pengaruh Likuifaksi Pada Magnitudo 6,5 di Titik BH-01**



**Gambar 5.14 Potensi Likuifaksi Pada Magnitudo 6,5 di Titik BH-02**



**Gambar 5.15 Potensi Likuifaksi Pada Magnitudo 6,5 di Titik BH-04**

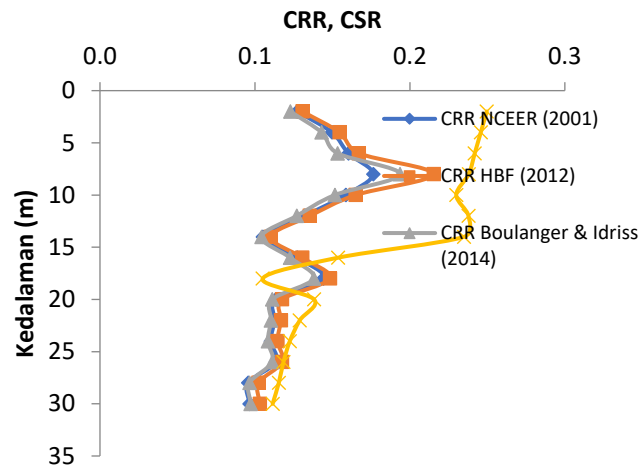
Gambar 5.13 menunjukkan bahwa potensi likuifaksi untuk titik BH-01 dengan skala magnitudo 6,5 dengan uji metode NCEER (2001), HBF (2012) dan metode Boulanger-Idriss (2014) terjadi pada kedalaman 13-14 m.

Gambar 5.14 menunjukkan bahwa potensi likuifaksi untuk titik BH-02 dengan skala magnitudo 6,5 dengan uji metode NCEER (2001), HBF (2012) dan metode Boulanger-Idriss (2014) terjadi pada kedalaman 10 m-12 m.

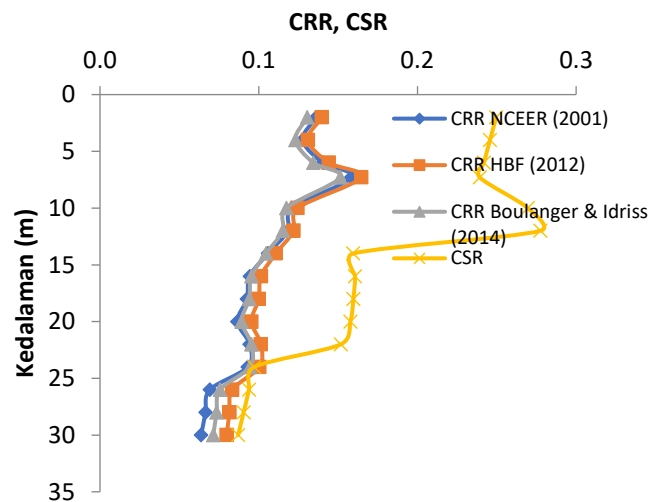
Gambar 5.15 menunjukkan bahwa potensi likuifaksi untuk titik BH-04 dengan skala magnitudo 6,5 dengan uji metode NCEER (2001), HBF (2012) dan metode Boulanger-Idriss (2014) terjadi pada kedalaman 2 m.

#### 5.6.4 *Cyclic Resistance Ratio* dan *Cyclic Stress Ratio Magnitude Scale 8,5 (M<sub>w</sub>)*

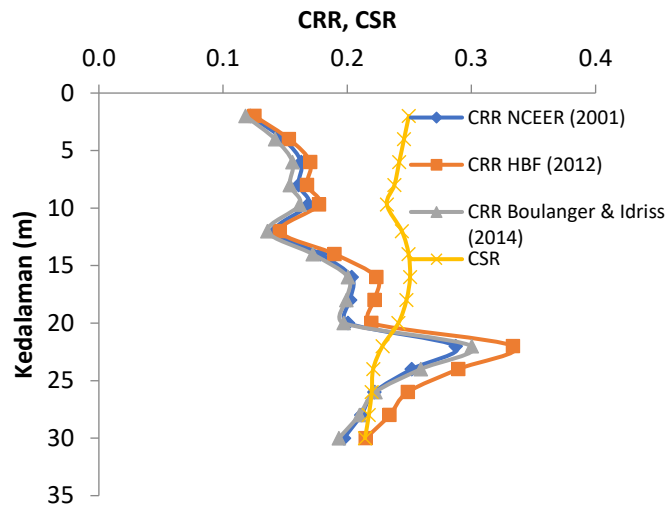
Pada perhitungan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dan *Cyclic Stress Ratio* (CSR) dilakukan pada setiap kedalaman dari nilai N-SPT dan dengan *magnitude Scale 8,5* diketahui Hasil perhitungan dengan metode NCEER (2001), HBF (2012) dan metode Boulanger-Idriss (2014) menunjukkan bahwa besarnya nilai CSR tersebar secara acak pada setiap kedalaman tanpa pola tertentu sehingga besarnya CRR juga acak bervariasi dan berbeda sesuai dengan metode yang digunakan. Pola penyebaran CRR dan CSR pada tiap titik dapat dilihat pada Gambar 5.16 sampai Gambar 5.18 sebagai berikut.



**Gambar 5.16 Grafik Sebaran CRR dan CSR Pada Mw 8,5  
Titik BH-01 Universitas Gadjah Mada**



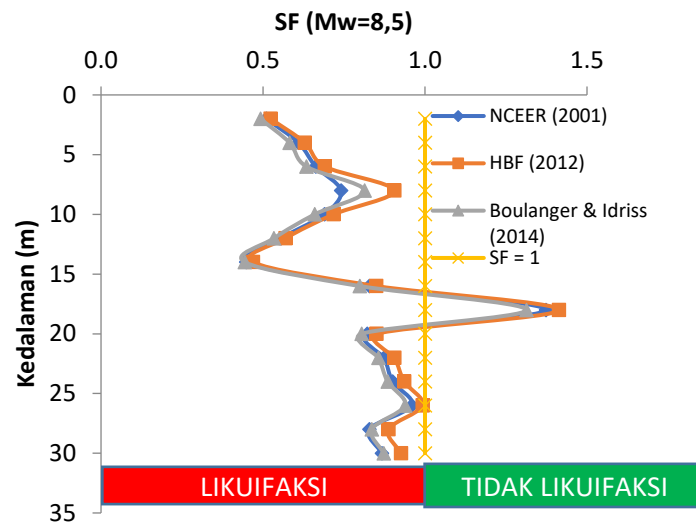
**Gambar 5.17 Grafik Sebaran CRR dan CSR Pada Mw 8,5  
Titik BH-02 Universitas Gadjah Mada**



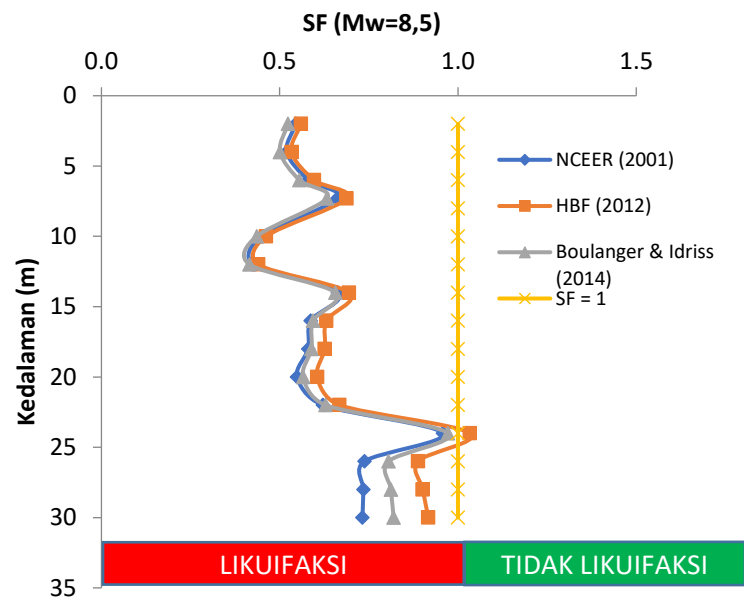
**Gambar 5.18 Grafik Sebaran CRR dan CSR Pada Mw 8,5  
Titik BH-04 Universitas Gadjah Mada**

#### 5.6.5 Pengaruh *Moment Magnitude Scale 8,5 (M<sub>w</sub>)*

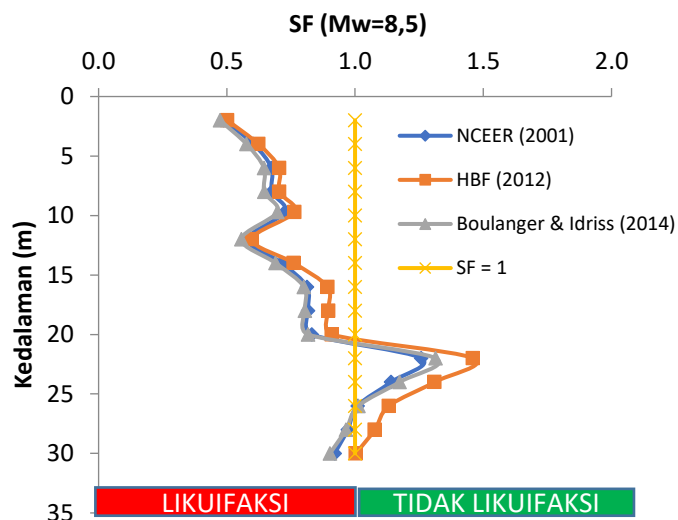
Untuk dapat melihat potensi likuifaksi akibat perbedaan besarnya gempa bumi berdasarkan momen seismik dibuat hubungannya dengan CSR dan CRR, dimana besarnya CSR dan CRR dipresentasikan sebagai faktor keamanan atau *Factor of Safety (FS)* yaitu perbandingan *Cyclic Stress Ratio (CSR)* dan *Cyclic Resistance Ratio (CRR)*, dan dari hasil analisis perhitungan yang dilakukan pada setiap kedalaman di setiap titik didapatkan pola hubungan yang dapat dilihat pada Gambar 5.19 sampai Gambar 5.21 di halaman selanjutnya.



**Gambar 5.19 Potensi Likuifaksi Pada Magnitudo 8,5 di Titik BH-01**



**Gambar 5.20 Potensi Likuifaksi Pada Magnitudo 8,5 di Titik BH-02**



**Gambar 5.21 Potensi Likuifaksi Pada Magnitudo 8,5 di Titik BH-04**

Gambar 5.19 menunjukkan bahwa potensi likuifaksi untuk titik BH-01 dengan skala magnitudo 8,5 dengan uji metode NCEER (2001), HBF (2012) dan metode Boulanger-Idriss (2014) terjadi pada permukaan tanah kedalaman tanah 2 m sampai dengan kedalaman 30 m.

Gambar 5.20 menunjukkan bahwa potensi likuifaksi untuk titik BH-02 dengan skala magnitudo 8,5 dengan uji metode NCEER (2001), HBF (2012) dan metode Boulanger-Idriss (2014) terjadi pada permukaan tanah kedalaman tanah 2 m sampai dengan kedalaman 30 m.

Gambar 5.21 menunjukkan bahwa potensi likuifaksi untuk titik BH-04 dengan skala magnitudo 8,5 dengan uji metode NCEER (2001), HBF (2012) dan metode Boulanger-Idriss (2014) terjadi pada permukaan tanah kedalaman tanah 2 m sampai dengan kedalaman 20 m dan untuk kedalaman lebih dari 20 m aman terhadap potensi likuifaksi.

Dari analisis perhitungan dan beberapa skema metode dan kekuatan magnitudo gempa diatas menunjukkan bahwa potensi likuifaksi dapat terjadi pada tanah dengan kondisi sebagai berikut.

1. Potensi likuifaksi akan terjadi dimana saat  $CRR/CSR < 1$ .
2. Tanah dengan kohesif tinggi / tanah lepas yang memiliki kandungan butir halus (*finer content*) kurang dari 10 persen (berat) dari sampel tanah yang diuji.



3. Semakin tinggi kekuatan magnitude gempa maka ketahanan tanah terhadap potensi likuifaksi semakin rendah.



## **BAB VI**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **6.1 Kesimpulan**

Dari hasil analisis potensi likuifaksi dengan menggunakan data N-SPT di 3 titik pada proyek *Soil Investigation* Universitas Gadjah Mada Yogyakarta dengan metode NCEER (2001), HBF (2012) dan metode Boulanger-Idriss (2014) dapat disimpulkan sebagai berikut.

1. Potensi likuifaksi berdasarkan data N-SPT dengan metode NCEER (2001), HBF (2012) dan metode Boulanger-Idriss (2014) pada magnitudo gempa 6,5 SR nilai CRR menunjukkan nilai lebih besar dibandingkan CRR pada kondisi gempa 7,5 SR dan 8,5 SR sehingga memberikan angka keamanan / safety factor yang lebih besar. Jadi kesimpulan dari analisis sebelumnya dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kekuatan gempa maka ketahanan tanah terhadap potensi likuifaksi semakin rendah atau semakin tinggi kekuatan gempa maka semakin tinggi potensi daerah tersebut berpotensi likuifaksi.
2. Dari hasil analisis sebelumnya menggunakan data N-SPT dan menggunakan metode NCEER (2001), HBF (2012) dan metode Boulanger-Idriss (2014) dapat disimpulkan bahwa hasil analisis likuifaksi CRR/CSR memiliki hasil nominal *variable of safety factor* mendekati sama.
3. Hubungan nilai N-SPT terhadap potensi likuifaksi dari hasil analisis dapat disimpulkan bahwa semakin bertambah nilai N-SPT akan berkorelasi dengan penurunan potensi likuifaksi. Penambahan nilai N-SPT terkoreksi ( $N_1)_{60cs}$ ) berkorelasi dengan meningkatnya nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dan selanjutnya potensi likuifaksi semakin menurun.

#### **6.2 Saran**

Saran yang dapat diberikan penulis untuk penelitian selanjutnya sebagai berikut.

1. Memperluas area penelitian dengan mencakup seluruh wilayah Universitas

Gajah Mada dengan analisis perhitungan pada interval kedalaman lapisan tanah yang lebih kecil.

2. Untuk hasil yang lebih rinci dan detail digunakan metode yang lebih luas seperti menggunakan metode CPT (*Cone Penetration Test*) atau dengan yang lainnya.
3. Dilakukan usaha untuk menanggulangi terjadinya potensi likuifaksi di daerah tersebut sesuai kebutuhan karakteristik tanah daerah tersebut.



## DAFTAR PUSTAKA

- Artati, Hanindya Kusuma, et al. "Analisis Potensi Likuifaksi Pada Pasir Vulkanik Di Pantai Glagah Kulonprogo Berdasarkan Data N-Spt." *Teknisia*, vol. XXV, no. 2, 2020, pp. 50–62, doi:10.20885/teknisia.vol25.iss2.art6.
- ASTM D4318, et al. "Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils." *Report*, vol. 04, no. March 2010, 2014, doi:10.1520/D4318-10E01.
- Badan Standardisasi Nasional. *SNI 1726 ; Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Struktur Bangunan Gedung Dan Non Gedung*. Badan Standardisasi Nasional, 2012, doi:10.1080/0893569032000131613.
- Das, Braja M. "Advanced Soil Mechanics." *Advanced Soil Mechanics*, 5th ed., Taylor & Francis Group, 2019, doi:10.1201/9781351215183.
- . "Principles of Geotechnical Engineering." *Cengage Learning*, 8th ed., vol. 7, no. 2, Cengage Learning, 2012.
- Day, Robert W. "Geotechnical Earthquake Engineering Handbook." *Current Science*, 2nd ed., vol. 97, no. 1, Mc Graw Hill, 2012, doi:10.1201/b16200-141.
- Encyclopedia, Britannica Online. "Soil Liquefaction." *Earthquake Spectra*, vol. 17, no. SUPPL., 2001, pp. 37–60, doi:10.1007/978-3-642-41714-6\_195248.
- Hardiyatmo, Hary Christady. "Mekanika Tanah I." *Gadjah Mada University Press*, 3rd ed., Gadjah Mada University Press, 2002.
- Hidayat, Nur, and Eko Widi Santoso. "Gempa Bumi Dan Mekanismenya." *Alami*, vol. 2, 1997, pp. 50–52.
- Hutagalung, Mario, and Simon Dertha Tarigan. "Analisis Potensi Likuifaksi Akibat Gempa (Studi Kasus : Reklamasi Pelabuhan Kontainer Belawan)." *Rekayasa Konstruksi Mekanika Sipil*, vol. 2, no. 1, 2019, pp. 15–33.
- Idriss, I. M., and R. W. Boulanger. "Semi-Empirical Procedures for Evaluating Liquefaction Potential during Earthquakes." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 26, no. 2-4 SPEC. ISS., 2006, pp. 115–30,

doi:10.1016/j.soildyn.2004.11.023.

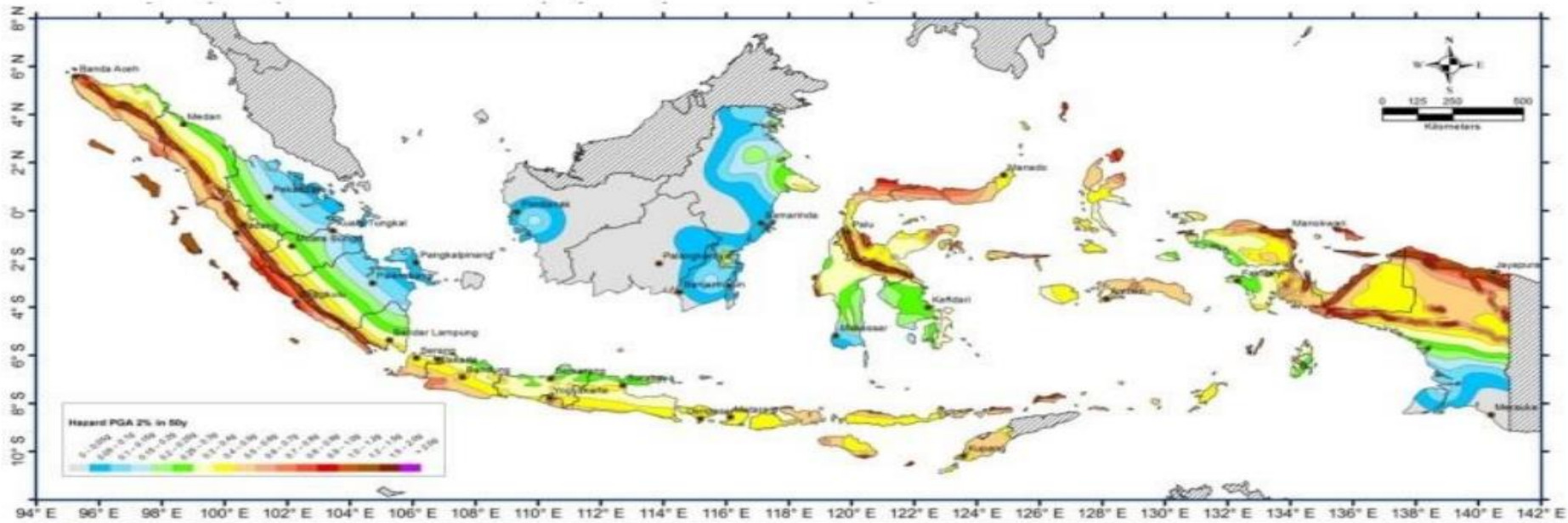
- Iwasaki, T., et al. "Soil Liquefaction Potential Evaluation with Use of the Simplified Procedure." *First International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*, 1981, pp. 209–14.
- Jefferies, M. G., and D. A. Shuttle. "Understanding Liquefaction through Applied Mechanics." *5th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, 2011.
- Kious, W. J., and R. I. Tilling. "The Dynamic Earth: The Story of Plate Tectonics." *U.S. Geological Survey*, U.S. Geological Survey, 1996.
- Kramer, Steven L. *EVALUATION OF LIQUEFACTION HAZARDS IN WASHINGTON STATE*. no. December, 2008, doi:10.1016/0148-9062(94)91043-x.
- Railsback. *Plate Tectonics : Divergent , Convergent , and Transform Plate Boundaries*. 2012, p. 2012.
- Robertson, P. K., and C. E. Wride. "Evaluating Cyclic Liquefaction Potential Using the Cone Penetration Test." *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 35, no. 3, 1998, pp. 442–59, doi:10.1139/t98-017.
- Seed, H. B., et al. *Evaluation of Soil Liquefaction Potential for Level Ground during Earthquakes: A Summary Report*. Shanon & Wilson, Inc, 1976, <http://www.osti.gov/servlets/purl/7146067>.
- Seed, H. B., and I. .. Idriss. "Simplified Liquefaction Prediction and Assessment Method Considering Waveforms and Durations of Earthquakes." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 1971, doi:10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001597.
- Skempton, A. W. "Standard Penetration Test Procedures and the Effects in Sands of Overburden Pressure, Relative Density, Particle Size, Ageing and Overconsolidation." *Geotechnique*, vol. 37, no. 3, 1986, pp. 411–12, doi:10.1680/geot.1987.37.3.411.
- Tijow, Kurnia Christy, et al. "Analisis Potensi Likuifaksi Tanah Berdasarkan Data Standart Penetration Test (SPT), Studi Kasus : Dermaga Bitung, Sulawesi

- Utara.” *Jurnal Sipil Statik*, vol. 6, no. 7, 2018, pp. 491–500.
- Warouw. Manoppo., and Rondonuwu. “NILAI SPT ( Studi Kasus : Jembatan Ir . Soekarno Manado ).” *Jurnal Sipil Statik*, vol. 7, no. 11, 2019, pp. 1453–64.
- Whitman, Robert V. “Resistance of Soil to Liquefaction and Settlement.” *Chemical Pharmaceutical Bulletin*, vol. 11, 1971,  
<http://www.mendeley.com/research/geology-volcanic-history-eruptive-style-yakedake-volcano-group-central-japan/>.
- Youd, T. L., and I. M. Idriss. “Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 127, no. 4, 2001, pp. 297–313, doi:10.1061/(asce)1090-0241(2001)127:4(297).
- . “Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils.” *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 127, no. 4, 2001, pp. 297–313, doi:10.1061/(asce)1090-0241(2001)127:4(297).



# LAMPIRAN

# Lampiran 1 Peta Sumber dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017



**TIM PEMUTAKHIRAN PETA SUMBER DAN BAHAYA GEMPABUMI INDONESIA TAHUN 2017**

- Prof. Dr. Masyhur Insyam (Ketua)
- Ir. Lutfi Faizal (Wakil Ketua)
- Dr. Danny Hilman Natawidjaja (Ketua Pokja Geologi)
- Dr. Iwan Meilano (Ketua Pokja Geodesi)
- Prof. Dr. Sri Widyanitono (Ketua Pokja Seismologi)
- Dr. Wahyu Triyoso (Ketua Pokja Katalog)
- Ariska Rudyanto, M.Phil. (Ketua Pokja GMPE)
- Dr. Sri Hidayati (Ketua Pokja SHA)
- Dr. M. Asurifak
- Dr. M. Ridwan
- Prof. Dr. Phil Cumming



Jakarta, 4 September 2017  
 Menteri Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat  
  
 Dr. Ir. M. Basuki Hadimoeljono, M.Sc.





## Lampiran 2 Data Uji Lapangan N-SPT BH-01

PT. Sadhya Grahaicara		BORING LOG GEOTEKNIK				No. Bor : BH-01												
Proyek : Soil Investigation UGM Yogyakarta		Kedalaman : 30 m				Koordinat : 431781.42 mE 9141077.84 mS												
Lokasi : BH-01 Fakultas Hukum		Elevasi : 143 m				Dilonging oleh : Rizal Taufiqurrohmah												
Paket No : -		Elevasi MAT : 10 m				Diperiksa oleh : Adi Andhika												
Pemberi Kerja : Universitas Gadjah Mada		Jenis Core Barrel : STCB OD 73 mm				Juru Bor : Arif Ramdan												
Jenis Pemboran : Basah Putar		Tipe Mesin Bor : KSK-01				Tanggal Bor : 6-8 Oktober 2018												
Progres Harian Metode Bor dan Ø Inti Bor	Casing Ø & Kedalaman MAY & Tanggal	Instalasi Piezometer	Elevasi ( m )	Kedalaman (m)	Satuan Stratifikasi	Simbol Log	Diskripsi Tanah / Batuan	Tingkat Kelapukan	Kekuatan Batuan RQD ( % )	SPT VALUE							Samples	
										N1	N2	N3	N-Value	10	20	30		40
				1			<b>Clayey Sand</b> Brownish Grey, Clayey, Fine Sand, loose	W4										
				2														
				3			<b>Sand</b> Dark Grey, rounded, fine-medium sand, loose											
				4														
				5														DS
				6														4.50-5
				7														
				8														
				9			<b>Sand</b> Dark grey, fine-medium sand, rounded, medium dense											
				10														
				11														
				12														
				13														
				14														
				15														
				16														
				17														
				18			<b>Sand</b> Dark grey, fine-medium sand, rounded, dense - very dense											
				19														
				20														
<b>Keterangan :</b>		<b>Komposisi Campuran Butir Tanah</b>		<b>Tingkat Kelapukan :</b>		<b>Kekuatan Batuan:</b>												
STCB : Single Tube Core Barrel	sedikit 0 - 10 %	W <sub>6</sub> : Tanah Residu/Residual Soil	R <sub>0</sub> : Batuan Lunak Ekstrem															
DTCB : Double Tube Core Barrel	beberapa 10 - 20 %	W <sub>5</sub> : Lapuk Sempurna/Completely Weathered	R <sub>1</sub> : Batuan Sangat Lunak															
TCR : Total Core Recovery	akhir an 20 - 35 %	W <sub>4</sub> : Lapuk Kuat/Highly Weathered	R <sub>2</sub> : Batuan Lunak															
RQD : Rock Quality Designation	dan 35 - 50 %	W <sub>3</sub> : Lapuk sedang/Moderately Weathered	R <sub>3</sub> : Batuan Kuat Sedang															
SPT : Uji Penetrasi Standar		W <sub>2</sub> : Lapuk Lemah/Slightly Weathered	R <sub>4</sub> : Batuan Kuat															
UP : Uji Permeabilitas		W <sub>1</sub> : Segar/Fresh Rock	R <sub>5</sub> : Batuan Sangat Kuat															
k : Koefisien Permeabilitas			R <sub>6</sub> : Batuan Kuat Ekstrem															
Lu : Nilai Lugeon																		

## Lampiran 2 Data Uji Lapangan N-SPT BH-02

PT. Sadhya Grahaicara		BORING LOG GEOTEKNIK				No. Bor : BH-02														
Proyek : Soil Investigation UGM Yogyakarta		Kedalaman : 30 m				Koordinat : 432346.50 mE 9141315.44 mS														
Lokasi : BH-02 Fakultas Peternakan		Elevasi : 145 m				Diloding oleh : Rizal Taufiqurrohman														
Paket No : -		Elevasi MAT : 7.8 m				Diperiksa oleh : Adi Andhika														
Pemberi Kerja : Universitas Gadjah Mada		Jenis Core Barrel : STCB OD 73 mm				Juru Bor : Anif Ramdan														
Jenis Pembooran : Basah Putar						Tanggal Bor : 9 - 13 Oktober 2018														
Tipe Mesin Bor : KSK-01																				
Progres Harian Metode Bor dan @ Inti Bor	Casing @ & Kedalaman	IMAT & Tanggal	Instansi Promeber	Elevasi (m)	Kedalaman (m)	Satuan Stratifikasi	Simbol Log	Diskripsi Tanah / Batuan	Tingkat Kelapukan	Kekuatan Batuan	RQD (%)	SPT VALUE						Samples		
												N1	N2	N3	N4-Value	10	20		30	40
					1			<b>Clayey Silt</b> Brownish Grey, Clayey, low plasticity, stiff	W4											
					2															
					3															
					4			<b>Clayey Sand</b> Dark grey, rounded, fine-medium sand, medium dense	W3											
					5															
					6															
					7															
					8															
					9															
					10			<b>Gravelly Sand</b> Dark Grey, gravelly, fine-medium sand, rounded - subangular, medium-coarse sand, medium density												
					11															
					12			<b>Sand</b> Dark grey, medium sand, rounded, rounded dense	W3											
					13															
					14															
					15															
					16															
					17															
					18			<b>Sand</b> Dark grey, fine-medium sand, rounded, dense - very dense												
					19															
					20															
<b>Keterangan :</b>		<b>Komposisi Campuran Butir Tanah</b>		<b>Tingkat Kelapukan :</b>		<b>Kekuatan Batuan:</b>														
STCB : Single Tube Core Barrel		sedikit 0 - 10 %		W <sub>0</sub> : Tanah Residu/Residuan Soil		R <sub>0</sub> : Batuan Lunak Ekstrim														
DTCB : Double Tube Core Barrel		beberapa 10 - 20 %		W <sub>1</sub> : Lapuk Sempurna/Completely Weathered		R <sub>1</sub> : Batuan Sangat Lunak														
TCR : Total Core Recovery		akhir an 20 - 35 %		W <sub>2</sub> : Lapuk Kuat/Highly Weathered		R <sub>2</sub> : Batuan Lunak														
RQD : Rock Quality Designation		dan 35 - 50 %		W <sub>3</sub> : Lapuk sedang/Moderately Weathered		R <sub>3</sub> : Batuan Kuat Sedang														
SPT : Uji Penetrasi Standar				W <sub>4</sub> : Lapuk Lemah/Slightly Weathered		R <sub>4</sub> : Batuan Kuat														
UP : Uji Permeabilitas				W <sub>5</sub> : Segar/Fresh Rock		R <sub>5</sub> : Batuan Sangat Kuat														
k : Koefisien Permeabilitas						R <sub>6</sub> : Batuan Kuat Ekstrim														
Lu : Nilai Lugeon																				

## Lampiran 2 Data Uji Lapangan N-SPT BH-04

PT. Sadhya Graha cara		BORING LOG GEOTEKNIK				No. Bor : BH-04												
Proyek : Soil Investigation UGM Yogyakarta Lokasi : BH-04 Fakultas Pertanian Paket No : Pemberi Kerja : Universitas Gadjah Mada Jenis Pemboran : Basah Putar Tipe Mesin Bor : KSK-01					Kedalaman : 30 m Koordinat : 431794.48 mE 9141154.63 mS Elevasi : 144 m Diloging oleh : Rizal Taufiqurrohmah Diperiksa oleh : Adi Andhika Juru Bor : Arif Ramdan Tanggal Bor : 19 - 22 Oktober 2018													
Progres Harian dan @ 100 Bor	Metode Bor	Coating @ & kedalaman	MAT & Tanggal	Instalasi Prosektor	Kedalaman (m)	Sedimen Stratifikasi	Symbol Log	Diskripsi Tanah / Batuan	Tingkat Kelapukan	Kekuatan Batuan	RQD (%)	SPT VALUE						Samples
												N1	N2	N3	N4 Value	10	20	
					1		W4	Clayey Sand Brownish Grey, fine sand, highly weathered, medium dense										
					2		W3	Sand Dark Grey, moderately weathered Rounded - sub rounded, fine-medium sand medium dense										
					3													
					4													
					5													
					6													
					7													
					8													
					9													
					10													
					11													
					12													
					13													
					14													
					15													
					16													
					17													
					18													
					19													
					20													
<b>Keterangan :</b> STCB : Single Tube Core Barrel DTCB : Double Tube Core Barrel TCR : Total Core Recovery RQD : Rock Quality Designation SPT : Uji Penetrasi Standar I <sub>P</sub> : Uji Permeabilitas k : Koefisien Permeabilitas Lu : Nilai Lugeon												<b>Komposisi Campuran Butir Tanah</b> sedikit 0 - 10 % beberapa 10 - 20 % akhira n 20 - 35 % dan 35 - 50 %		<b>Tingkat Kelapukan :</b> W <sub>2</sub> : Tanah Residu/Residuan Soil W <sub>3</sub> : Lapuk Sempurna/Completely Weathered W <sub>4</sub> : Lapuk Kuat/Highly Weathered W <sub>5</sub> : Lapuk sedang/Moderately Weathered W <sub>6</sub> : Lapuk Lemah/Slightly Weathered W <sub>7</sub> : Segar/Fresh Rock		<b>Kekuatan Batuan:</b> R <sub>0</sub> : Batuan Lunak Ekstrim R <sub>1</sub> : Batuan Sangat Lunak R <sub>2</sub> : Batuan Lunak R <sub>3</sub> : Batuan Kuat Sedang R <sub>4</sub> : Batuan Kuat R <sub>5</sub> : Batuan Sangat Kuat R <sub>6</sub> : Batuan Kuat Ekstrim		

**Lampiran 3 Data Properties Tanah BH-01**

		INDEX PROPERTIES													UNCONFINED COMPRESSION TEST			DIRECT SHEAR TEST		TRIAXIAL COMPRESSION TEST (UU,CU)		Consolidation
Boring No.	Depth. M	Wn %	$\gamma_d$ g/cm <sup>3</sup>	$\gamma_m$ g/cm <sup>3</sup>	WI %	Wp %	Ip %	Ws	G	e	n	Sr %	% passing sieve No. 200	$\alpha$ °	$\phi$ °	c kg/cm <sup>2</sup>	$\phi$ °	c kg/cm <sup>2</sup>	$\phi$ °	c kg/cm <sup>2</sup>	Cc	
BH-1																						
1	: 4,50 - 5,00 m	18,56	1,529	1,81					2,79	0,54	35,09	95,9	3,14				30,96	0,00				
2	: 9,00 - 9,50 m	22,42	1,476	1,81					2,79	0,89	47,18	70,13	2,85				31,17	0,00				



### Lampiran 3 Data Properties Tanah BH-02

		INDEX PROPERTIES													UNCONFINED COMPRESSION TEST			DIRECT SHEAR TEST		TRIAXIAL COMPRESSION TEST (UU;CU)		Consolidation
Boring No.	Depth. M	W <sub>n</sub> %	γ <sub>d</sub> g/cm <sup>3</sup>	γ <sub>m</sub> g/cm <sup>3</sup>	W <sub>I</sub> %	W <sub>p</sub> %	l <sub>p</sub> %	W <sub>s</sub> %	G	e	n	Sr	% passing sieve No. 200	α °	φ °	c kg/cm <sup>2</sup>	φ °	c kg/cm <sup>2</sup>	φ °	c kg/cm <sup>2</sup>	Cc	
BH - 2																						
1	: 5,00 - 5,50 m	17,45	1,5164	1,78					2,80	0,84	45,80	57,77	2,40				32,42	0,00				
2	: 11,00 - 11,50 m	14,90	1,5383	1,77					2,75	0,79	44,06	52,02	4,80				31,59	0,00				



**Lampiran 3 Data Properties Tanah BH-04**

		INDEX PROPERTIES													UNCONFINED COMPRESSION TEST			DIRECT SHEAR TEST		TRIAxIAL COMPRESSION TEST (UU;CU)		Consolidation
Boring No.	Depth. M	Wn %	$\gamma_d$ g/cm <sup>3</sup>	$\gamma_m$ g/cm <sup>3</sup>	WI %	Wp %	Ip %	Ws	G	e	n	Sr	% passing sieve No. 200	$\alpha$ .....	$\phi$ .....	c kg/cm <sup>2</sup>	$\phi$ .....	c kg/cm <sup>2</sup>	$\phi$ .....	c kg/cm <sup>2</sup>	Cc	
BH - 4																						
1	: 6,50 - 07,00 m	18,84	1,4695	1,75					2,87	0,95	48,85	56,68	0,00				33,82	0,10				
2	: 14,50 - 15,00 m	22,33	1,453	1,78					2,70	0,86	46,23	70,16	0,91				34,80	0,214				



## Lampiran 4 Tabel Perhitungan Analisis Likuifaksi Metode SPT

Titik Bor	MAT (m)	Kedalaman (H) (m)	h	lenis Tanah	Gs	amax/g	N-SPT	FC (%)	MSF for sand	Density					n	e	rd	σ <sub>v</sub>	U	σ' <sub>v</sub>	(σ'/σ <sub>v</sub> )	CSR	Faktor Koreksi (N1)60					(N1)60	Faktor (N1)w/cs			NCEER (2001)			HBF (2012)			Boulanger & Idress (2014)			
										γb (gr/cm3)	γb (kN/m3)	γd(g/cm3)	γd(kN/m3)	ysat(kN/m3)									lkN/m3	Cn	Ce	Cb	Cr		Cs	α	β	(N1)w/cs	CRR 7.5	SF	Cek	CRR 7.5	SF	Cek	CRR 7.5	SF	Cek
BH-01	2	2	2	clayey sand	2.79	0.39	15	3.14	1	1.78	17.444	1.529	14.984	38.015	0.3412	0.518	0.985	29.968	0	29.968	1.000	0.250	1.467	1	1	0.75	1	16.503	0.0	1.0	16.503	0.176	0.703	LUKUFAKSI	0.180	0.722	LUKUFAKSI	0.169	0.678	LUKUFAKSI	
	4	2	2	sand	2.79	0.39	21	3.14	1	1.79	17.542	1.529	14.984	37.578	0.3619	0.567	0.969	59.937	0	59.937	1.000	0.246	1.223	1	1	0.75	1	19.257	0.0	1.0	19.257	0.206	0.840	LUKUFAKSI	0.213	0.867	LUKUFAKSI	0.197	0.802	LUKUFAKSI	
	6	2	2	sand	2.79	0.39	26	3.14	1	1.81	17.738	1.529	14.984	38.348	0.3509	0.541	0.954	89.905	0	89.905	1.000	0.242	1.048	1	1	0.75	1	20.438	0.0	1.0	20.438	0.221	0.913	LUKUFAKSI	0.230	0.952	LUKUFAKSI	0.211	0.874	LUKUFAKSI	
	8	2	2	sand	2.79	0.39	29	3.14	1	1.81	17.738	1.529	14.984	38.348	0.3509	0.541	0.939	119.874	0	119.874	1.000	0.238	0.917	1	1	0.75	1	19.948	0.0	1.2	23.938	0.243	1.021	TIDAK LUKUFAKSI	0.297	0.986	LUKUFAKSI	0.267	1.121	TIDAK LUKUFAKSI	
	10	10	2	sand	2.79	0.39	33	2.85	1	1.81	17.738	1.479	14.494	34.509	0.4718	0.893	0.907	148.862	0	148.862	1.000	0.230	0.818	1	1	0.75	1	20.252	0.0	1.0	20.252	0.219	0.951	LUKUFAKSI	0.227	0.989	LUKUFAKSI	0.209	0.909	LUKUFAKSI	
	12	2	2	sand	2.79	0.39	33	2.85	1	1.81	17.738	1.479	14.494	34.509	0.4718	0.893	0.854	217.880	19.620	198.260	1.099	0.238	0.691	1	1	0.75	1	17.109	0.0	1.0	17.109	0.182	0.765	LUKUFAKSI	0.187	0.785	LUKUFAKSI	0.175	0.736	LUKUFAKSI	
	14	2	2	sand	2.79	0.39	30	2.85	1	1.81	17.738	1.479	14.494	34.509	0.4718	0.893	0.800	286.898	39.240	247.658	1.158	0.235	0.598	1	1	0.75	1	13.464	0.145	0.617	LUKUFAKSI	0.152	0.647	LUKUFAKSI	0.144	0.611	LUKUFAKSI				
	16	2	2	sand	2.105263	0.26	39	2.85	1	1.901	18.630	1.112	10.898	29.506	19.696	0.4718	0.893	0.747	345.909	58.860	287.049	1.205	0.152	0.540	1	1	0.75	1	15.809	0.168	1.107	TIDAK LUKUFAKSI	0.173	1.138	TIDAK LUKUFAKSI	0.163	1.072	TIDAK LUKUFAKSI			
	18	2	2	sand	2.878085	0.26	50	2.85	1	1.953	19.139	1.519	14.886	38.103	28.293	0.4718	0.893	0.500	422.115	78.480	343.635	1.228	0.104	0.475	1	1	0.75	1	17.794	0.0	1.0	17.794	0.190	1.816	TIDAK LUKUFAKSI	0.195	1.874	TIDAK LUKUFAKSI	0.182	1.750	TIDAK LUKUFAKSI
	20	2	2	sand	1.992506	0.26	42	2.85	1	1.913	18.747	1.223	11.985	30.168	20.358	0.3862	0.629	0.640	482.451	98.100	384.351	1.255	0.136	0.436	1	1	0.75	1	13.740	0.148	1.087	TIDAK LUKUFAKSI	0.154	1.136	TIDAK LUKUFAKSI	0.146	1.074	TIDAK LUKUFAKSI			
	22	2	2	sand	2.178315	0.26	45	2.85	1	1.93	18.914	1.334	13.073	32.562	22.752	0.3876	0.633	0.587	547.576	117.720	429.856	1.274	0.126	0.400	1	1	0.75	1	13.504	0.145	1.151	TIDAK LUKUFAKSI	0.152	1.206	TIDAK LUKUFAKSI	0.144	1.140	TIDAK LUKUFAKSI			
	24	2	2	sand	2.304258	0.26	48	2.85	1	1.932	18.934	1.445	14.161	34.419	24.609	0.3729	0.595	0.552	616.415	137.340	479.075	1.287	0.120	0.367	1	1	0.75	1	13.220	0.143	1.188	TIDAK LUKUFAKSI	0.150	1.250	TIDAK LUKUFAKSI	0.142	1.181	TIDAK LUKUFAKSI			
	26	2	2	sand	2.769766	0.26	56	2.85	1	1.97	19.306	1.741	17.062	40.778	30.968	0.3712	0.590	0.536	697.971	156.960	541.011	1.290	0.117	0.333	1	1	0.75	1	13.979	0.150	1.283	TIDAK LUKUFAKSI	0.156	1.337	TIDAK LUKUFAKSI	0.148	1.264	TIDAK LUKUFAKSI			
	28	2	2	sand	2.495072	0.26	50	2.85	1	1.953	19.139	1.519	14.886	36.560	26.750	0.3912	0.643	0.520	771.091	176.580	594.511	1.297	0.114	0.308	1	1	0.75	1	11.546	0.100	1.114	TIDAK LUKUFAKSI	0.137	1.206	TIDAK LUKUFAKSI	0.129	1.133	TIDAK LUKUFAKSI			
30	2	2	sand	2.836429	0.26	56	2.85	1	1.972	19.326	1.741	17.062	41.109	31.299	0.3862	0.629	0.504	853.310	196.200	657.110	1.299	0.111	0.283	1	1	0.75	1	11.880	0.100	1.177	TIDAK LUKUFAKSI	0.140	1.265	TIDAK LUKUFAKSI	0.132	1.190	TIDAK LUKUFAKSI				
BH-02	2	2	2	clayey silt	2.461688	0.39	16	2.4	1	1.77	17.346	1.516	14.861	32.964	0.384	0.623	0.985	29.721	0	29.721	1.000	0.250	1.469	1	1	0.75	1	17.633	0.188	0.752	LUKUFAKSI	0.193	0.772	LUKUFAKSI	0.180	0.721	LUKUFAKSI				
	4	2	2	clayey sand	2.461688	0.39	18	2.4	1	1.77	17.346	1.516	14.861	32.964	0.384	0.623	0.969	59.443	0.000	59.443	1.000	0.246	1.226	1	1	0.75	1	16.551	0.176	0.716	LUKUFAKSI	0.181	0.735	LUKUFAKSI	0.170	0.691	LUKUFAKSI				
	6	2	2	clayey sand	2.797786	0.39	23	2.4	1	1.78	17.444	1.516	14.861	34.441	0.458	0.845	0.944	89.164	0.000	89.164	1.000	0.242	1.052	1	1	0.75	1	18.144	0.0	1.0	18.144	0.193	0.800	LUKUFAKSI	0.199	0.822	LUKUFAKSI	0.185	0.766	LUKUFAKSI	
	7.3	7.3	1.3	clayey sand	2.797786	0.39	28	2.4	1	1.78	17.444	1.516	14.861	34.441	0.458	0.845	0.944	108.483	0.000	108.483	1.000	0.239	0.963	1	1	0.75	1	20.220	0.0	1.0	20.220	0.218	0.912	LUKUFAKSI	0.227	0.948	LUKUFAKSI	0.209	0.871	LUKUFAKSI	
	10	2.7	2.7	clayey sand	2.797786	0.39	28	2.4	1	1.78	17.444	1.516	14.861	34.441	0.458	0.845	0.924	201.475	26.487	174.988	1.151	0.270	0.746	1	1	0.75	1	15.662	0.160	0.619	LUKUFAKSI	0.172	0.637	LUKUFAKSI	0.162	0.600	LUKUFAKSI				
	12	2	2	clayey sand	2.749911	0.39	32	4.8	1	1.783	17.473	1.538	15.075	34.578	24.768	0.4406	0.788	0.908	270.631	46.107	224.524	1.205	0.278	0.639	1	1	0.75	1	15.325	0.163	0.589	LUKUFAKSI	0.168	0.607	LUKUFAKSI	0.159	0.573	LUKUFAKSI			
	14	2	2	sand	1.356121	0.39	32	4.8	1	1.783	17.473	0.853	8.359	21.387	11.577	0.371	0.590	0.893	313.406	65.727	247.679	1.265	0.286	0.598	1	1	0.75	1	14.360	0.154	0.537	LUKUFAKSI	0.160	0.557	LUKUFAKSI	0.151	0.527	LUKUFAKSI			
	16	2	2	sand	1.301455	0.39	31	4.8	1	1.78	17.444	0.816	7.997	20.741	10.931	0.373	0.595	0.878	354.888	85.347	269.541	1.317	0.293	0.565	1	1	0.75	1	13.131	0.142	0.494	LUKUFAKSI	0.149	0.510	LUKUFAKSI	0.141	0.482	LUKUFAKSI			
	18	2	2	sand	1.402754	0.39	34	4.8	1	1.785	17.493	0.927	9.085	22.846	13.036	0.379	0.610	0.862	400.580	104.967	295.613	1.355	0.296	0.539	1	1	0.75	1	13.498	0.145	0.491	LUKUFAKSI	0.152	0.514	LUKUFAKSI	0.144	0.486	LUKUFAKSI			
	20	2	2	sand	1.532591	0.39	35	4.8	1	1.786	17.505	0.964	9.447	23.366	13.556	0.371	0.590	0.847	447.312	124.587	322.725	1.386	0.298	0.497	1	1	0.75	1	13.044	0.141	0.474	LUKUFAKSI	0.149	0.499	LUKUFAKSI	0.140	0.472	LUKUFAKSI			
	22	2	2	sand	2.516982	0.39	47	4.8	1	1.932	18.934	1.408	13.798	35.001	25.191	0.4406	0.788	0.832	517.314	144.207	373.107	1.387	0.292	0.446	1	1	0.75	1	15.727	0.167	0.573	LUKUFAKSI	0.172	0.589	LUKUFAKSI	0.162	0.555	LUKUFAKSI			
	24	2	2	sand	2.910632	0.286	60	4.8	1	2.04	19.992	1.889	18.512	44.782	34.972	0.351	0.541	0.552	606.878	163.827	443.051	1.370	0.141	0.391	1	1	0.75	1	17.583	0.187	1.332	TIDAK LUKUFAKSI	0.192	1.366	TIDAK LUKUFAKSI	0.180	1.277	TIDAK LUKUFAKSI			
	26	2	2	sand	2.33323	0.286	46	4.8	1	1.89	18.522	1.371	13.436	33.032	23.222	0.4124	0.702	0.536	672.942	183.447	489.495	1.375	0.137	0.361	1	1	0.75	1	12.453	0.135	0.988	LUKUFAKSI	0.144	1.051	TIDAK LUKUFAKSI	0.136	0.992	LUKUFAKSI			
	28	2	2	sand	2.569912	0.286	49	4.8	1	1.937	18.983	1.482	14.524	36.130	26.320	0.4213	0.728	0.520																							

**Lampiran 5 Tabel Perhitungan Analisis Likuifaksi Metode SPT untuk Mw 7,5**

Titik Bor	Kedalaman (H) (m)	h	CSR kN/m <sup>2</sup>	NCEER (2001)			HBF (2012)			Boulanger & Idriss (2014)			SF =1
				CRR 7.5	SF	LPI	CRR 7.5	SF	LPI	CRR 7.5	SF	LPI	
BH-01	2	2	0.250	0.176	0.703	14.840	0.180	0.722	14.758	0.169	0.678	14.953	1
	4	2	0.246	0.206	0.840	12.698	0.213	0.867	12.590	0.197	0.802	12.846	1
	6	2	0.242	0.221	0.913	10.907	0.230	0.952	10.776	0.211	0.874	11.042	1
	8	2	0.238	0.243	1.021	9.084	0.297	0.986	8.437	0.267	1.121	8.797	1
	10	2	0.230	0.219	0.951	7.814	0.227	0.989	7.725	0.209	0.909	7.910	1
	12	2	0.238	0.182	0.765	6.544	0.187	0.785	6.507	0.175	0.736	6.601	1
	14	2	0.235	0.145	0.617	5.130	0.152	0.647	5.088	0.144	0.611	5.138	1
	16	2	0.154	0.175	1.141	3.299	0.180	1.171	3.280	0.169	1.101	3.323	1
	18	2	0.105	0.199	1.893	1.602	0.205	1.948	1.591	0.190	1.810	1.620	1
	20	2	0.138	0.156	1.132	0.000	0.162	1.173	0.000	0.153	1.108	0.000	1
	22	2	0.129	0.155	1.204	0.000	0.161	1.248	0.000	0.152	1.180	0.000	1
	24	2	0.123	0.152	1.240	0.000	0.158	1.290	0.000	0.149	1.219	0.000	1
	26	2	0.118	0.156	1.321	0.000	0.162	1.368	0.000	0.153	1.293	0.000	1
28	2	0.115	0.132	1.142	0.000	0.141	1.223	0.000	0.133	1.152	0.000	1	
30	2	0.111	0.133	1.195	0.000	0.142	1.276	0.000	0.134	1.203	0.000	1	
BH-02	2	2	0.249621	0.176	0.703	14.840	0.193	0.772	14.532	0.169	0.678	14.953	1
	4	2	0.245743	0.206	0.840	12.698	0.181	0.735	13.110	0.197	0.802	12.846	1
	6	2	0.241864	0.221	0.913	10.907	0.199	0.822	11.218	0.211	0.874	11.042	1
	7.3	1.3	0.237986	0.243	1.021	6.249	0.227	0.948	6.381	0.267	1.121	6.052	1
	10	2.7	0.229925	0.219	0.951	10.549	0.172	0.637	11.184	0.209	0.909	10.679	1
	12	2	0.237802	0.182	0.765	6.544	0.168	0.606	6.654	0.175	0.736	6.601	1
	14	2	0.234991	0.145	0.617	5.130	0.153	0.957	5.084	0.144	0.611	5.138	1
	16	2	0.153693	0.175	1.141	3.299	0.140	0.870	3.441	0.169	1.101	3.323	1
	18	2	0.105016	0.199	1.893	1.602	0.138	0.863	1.724	0.190	1.810	1.620	1
	20	2	0.138188	0.156	1.132	0.000	0.132	0.834	0.000	0.153	1.108	0.000	1
	22	2	0.128942	0.155	1.204	0.000	0.140	0.920	0.000	0.152	1.180	0.000	1
	24	2	0.122515	0.152	1.240	0.000	0.138	1.425	0.000	0.149	1.219	0.000	1
	26	2	0.118398	0.156	1.321	0.000	0.115	1.224	0.000	0.153	1.293	0.000	1
28	2	0.115388	0.132	1.142	0.000	0.112	1.242	0.000	0.133	1.152	0.000	1	
30	2	0.111413	0.133	1.195	0.000	0.110	1.264	0.000	0.134	1.203	0.000	1	
BH-04	2	2	0.249621	0.168	0.673	14.976	0.173	0.692	14.890	0.163	0.652	15.069	1
	4	2	0.245743	0.205	0.832	12.727	0.211	0.859	12.622	0.195	0.795	12.873	1
	6	2	0.241864	0.225	0.929	10.856	0.235	0.971	10.714	0.215	0.889	10.991	1
	7.3	2	0.237986	0.222	0.931	9.885	0.231	0.971	9.764	0.212	0.891	10.007	1
	10	1.7	0.231955	0.232	1.002	6.525	0.244	1.053	6.423	0.223	0.961	6.606	1
	12	2.3	0.243964	0.196	0.802	7.401	0.201	0.824	7.350	0.187	0.767	7.479	1
	14	2	0.249411	0.246	0.986	4.525	0.262	1.049	4.430	0.237	0.951	4.577	1
	16	2	0.250561	0.281	1.120	2.878	0.308	1.230	2.767	0.277	1.104	2.894	1
	18	2	0.247694	0.279	1.126	1.442	0.306	1.235	1.388	0.275	1.108	1.451	1
	20	2	0.241163	0.276	1.146	0.000	0.302	1.254	0.000	0.272	1.126	0.000	1
	22	2	0.228408	0.396	1.734	0.000	0.460	2.012	0.000	0.414	1.811	0.000	1
	24	2	0.220874	0.347	1.572	0.000	0.399	1.806	0.000	0.357	1.617	0.000	1
	26	2	0.219699	0.306	1.392	0.000	0.343	1.561	0.000	0.307	1.397	0.000	1
28	2	0.217374	0.291	1.339	0.000	0.323	1.485	0.000	0.289	1.330	0.000	1	
30	2	0.214303	0.272	1.269	0.000	0.296	1.383	0.000	0.266	1.243	0.000	1	



**Lampiran 5 Tabel Perhitungan Analisis Likuifaksi Metode SPT untuk Mw 6,5**

Titik Bor	Kedalaman (H) (m)	h	CSR		NCEER (2001)				HBF (2012)				Boulanger & Idriss (2014)				SF =1
			kN/m <sup>2</sup>	CRR 7.5	MSF	CRR 6.5	SF	CRR 7.5	MSF	CRR 6.5	SF	CRR 7.5	MSF	CRR 6.5	SF		
BH-01	2	2	0.249621	0.175536	1.442	0.253	1.01397	0.180137	1.442	0.260	1.040547	0.169292	1.442	0.244	0.977902129	1	
	4	2	0.245743	0.206356	1.442	0.298	1.210817	0.213137	1.442	0.307	1.250601	0.197145	1.442	0.284	1.156770706	1	
	6	2	0.241864	0.220929	1.442	0.319	1.317114	0.230292	1.442	0.332	1.372934	0.211295	1.442	0.305	1.259676628	1	
	8	2	0.237986	0.242979	1.442	0.350	1.472178	0.29693	1.442	0.428	1.799056	0.266895	1.442	0.385	1.617080169	1	
	10	2	0.229925	0.218569	1.442	0.315	1.370709	0.227451	1.442	0.328	1.426408	0.208955	1.442	0.301	1.310417089	1	
	12	2	0.237802	0.182004	1.442	0.262	1.103588	0.186678	1.442	0.269	1.131934	0.174937	1.442	0.252	1.06073744	1	
	14	2	0.234991	0.144974	1.442	0.209	0.88957	0.151967	1.442	0.219	0.932481	0.14364	1.442	0.207	0.881383486	1	
	16	2	0.153693	0.175367	1.442	0.253	1.645265	0.179968	1.442	0.260	1.688438	0.169145	1.442	0.244	1.586897594	1	
	18	2	0.105016	0.198801	1.442	0.287	2.729639	0.204624	1.442	0.295	2.809584	0.190077	1.442	0.274	2.609846468	1	
	20	2	0.138188	0.156466	1.442	0.226	1.632636	0.162038	1.442	0.234	1.690777	0.153119	1.442	0.221	1.597719057	1	
	22	2	0.128942	0.155226	1.442	0.224	1.735843	0.160921	1.442	0.232	1.799536	0.152088	1.442	0.219	1.700757368	1	
	24	2	0.122515	0.151965	1.442	0.219	1.788529	0.15802	1.442	0.228	1.859798	0.149387	1.442	0.215	1.758184137	1	
	26	2	0.118398	0.156453	1.442	0.226	1.905383	0.162026	1.442	0.234	1.973257	0.153109	1.442	0.221	1.864655144	1	
	28	2	0.115388	0.131728	1.442	0.190	1.646113	0.1411	1.442	0.203	1.763227	0.132896	1.442	0.192	1.660708664	1	
30	2	0.111413	0.1331	1.442	0.192	1.722593	0.14219	1.442	0.205	1.840239	0.134001	1.442	0.193	1.734254412	1		
BH-02	2	2	0.249621	0.188	1.442	0.271	1.084	0.193	1.442	0.278	1.113	0.180	1.442	0.260	1.040	1	
	4	2	0.245743	0.176	1.442	0.254	1.033	0.181	1.442	0.260	1.060	0.170	1.442	0.245	0.996	1	
	6	2	0.241864	0.193	1.442	0.279	1.153	0.199	1.442	0.287	1.185	0.185	1.442	0.267	1.104	1	
	7.3	1.3	0.239343	0.218	1.442	0.315	1.314	0.227	1.442	0.327	1.367	0.209	1.442	0.301	1.256	1	
	10	2.7	0.269531	0.167	1.442	0.240	0.892	0.172	1.442	0.247	0.918	0.162	1.442	0.233	0.865	1	
	12	2	0.277438	0.163	1.442	0.235	0.848	0.168	1.442	0.243	0.874	0.159	1.442	0.229	0.825	1	
	14	2	0.159532	0.146	1.442	0.210	1.318	0.153	1.442	0.220	1.380	0.144	1.442	0.208	1.305	1	
	16	2	0.160699	0.130	1.442	0.188	1.167	0.140	1.442	0.202	1.254	0.132	1.442	0.190	1.180	1	
	18	2	0.159667	0.128	1.442	0.184	1.152	0.138	1.442	0.199	1.245	0.130	1.442	0.187	1.170	1	
	20	2	0.157782	0.119	1.442	0.172	1.091	0.132	1.442	0.190	1.203	0.123	1.442	0.177	1.124	1	
	22	2	0.151768	0.130	1.442	0.187	1.235	0.140	1.442	0.201	1.327	0.131	1.442	0.190	1.249	1	
	24	2	0.097164	0.128	1.442	0.185	1.904	0.138	1.442	0.200	2.054	0.130	1.442	0.188	1.931	1	
	26	2	0.093906	0.095	1.442	0.138	1.466	0.115	1.442	0.166	1.765	0.104	1.442	0.150	1.600	1	
	28	2	0.090497	0.092	1.442	0.132	1.460	0.112	1.442	0.162	1.791	0.101	1.442	0.146	1.614	1	
30	2	0.087026	0.088	1.442	0.127	1.455	0.110	1.442	0.159	1.822	0.098	1.442	0.142	1.629	1		
BH-04	2	2	0.249621	0.168	1.442	0.242	0.971	0.173	1.442	0.249	0.998	0.163	1.442	0.235	0.941	1	
	4	2	0.245743	0.205	1.442	0.295	1.200	0.211	1.442	0.304	1.239	0.195	1.442	0.282	1.147	1	
	6	2	0.241864	0.225	1.442	0.324	1.339	0.235	1.442	0.338	1.399	0.215	1.442	0.310	1.282	1	
	8	2	0.237986	0.222	1.442	0.320	1.343	0.231	1.442	0.333	1.401	0.212	1.442	0.306	1.285	1	
	9.7	1.7	0.231955	0.232	1.442	0.335	1.444	0.244	1.442	0.352	1.519	0.223	1.442	0.321	1.385	1	
	12	2.3	0.243964	0.196	1.442	0.282	1.156	0.201	1.442	0.290	1.188	0.187	1.442	0.270	1.106	1	
	14	2	0.249411	0.246	1.442	0.355	1.422	0.262	1.442	0.377	1.513	0.237	1.442	0.342	1.372	1	
	16	2	0.250561	0.281	1.442	0.405	1.615	0.308	1.442	0.444	1.774	0.277	1.442	0.399	1.591	1	
	18	2	0.247694	0.279	1.442	0.402	1.623	0.306	1.442	0.441	1.781	0.275	1.442	0.396	1.598	1	
	20	2	0.241163	0.276	1.442	0.398	1.652	0.302	1.442	0.436	1.808	0.272	1.442	0.392	1.624	1	
	22	2	0.228408	0.396	1.442	0.571	2.501	0.460	1.442	0.663	2.902	0.414	1.442	0.596	2.611	1	
	24	2	0.220874	0.347	1.442	0.501	2.267	0.399	1.442	0.575	2.604	0.357	1.442	0.515	2.332	1	
	26	2	0.219699	0.306	1.442	0.441	2.007	0.343	1.442	0.494	2.251	0.307	1.442	0.442	2.014	1	
	28	2	0.217374	0.291	1.442	0.420	1.931	0.323	1.442	0.465	2.141	0.289	1.442	0.417	1.918	1	
30	2	0.214303	0.272	1.442	0.392	1.829	0.296	1.442	0.427	1.994	0.266	1.442	0.384	1.792	1		

**Lampiran 5 Tabel Perhitungan Analisis Likuifaksi Metode SPT untuk Mw 8,5**

Titik Bor	Kedalaman (H) (m)	h	CSR	NCEER (2001)				HBF (2012)				Boulanger & Idriss (2014)				SF =1
			kN/m2	CRR 7.5	MSF	CRR 8.5	SF	CRR 7.5	MSF	CRR 8.5	SF	CRR 7.5	MSF	CRR 8.5	SF	
	2	2	0.250	0.176	0.726	0.127	0.510	0.180	0.726	0.131	0.524	0.169	0.726	0.123	0.492	1
	4	2	0.246	0.206	0.726	0.150	0.609	0.213	0.726	0.155	0.629	0.197	0.726	0.143	0.582	1
	6	2	0.242	0.221	0.726	0.160	0.663	0.230	0.726	0.167	0.691	0.211	0.726	0.153	0.634	1
	8	2	0.238	0.243	0.726	0.176	0.741	0.297	0.726	0.215	0.905	0.267	0.726	0.194	0.814	1
	10	2	0.230	0.219	0.726	0.159	0.690	0.227	0.726	0.165	0.718	0.209	0.726	0.152	0.659	1
	12	2	0.238	0.182	0.726	0.132	0.555	0.187	0.726	0.135	0.570	0.175	0.726	0.127	0.534	1
	14	2	0.235	0.145	0.726	0.105	0.448	0.152	0.726	0.110	0.469	0.144	0.726	0.104	0.444	1
	16	2	0.154	0.175	0.726	0.127	0.828	0.180	0.726	0.131	0.850	0.169	0.726	0.123	0.799	1
	18	2	0.105	0.199	0.726	0.144	1.374	0.205	0.726	0.148	1.414	0.190	0.726	0.138	1.313	1
	20	2	0.138	0.156	0.726	0.114	0.822	0.162	0.726	0.118	0.851	0.153	0.726	0.111	0.804	1
	22	2	0.129	0.155	0.726	0.113	0.873	0.161	0.726	0.117	0.906	0.152	0.726	0.110	0.856	1
	24	2	0.123	0.152	0.726	0.110	0.900	0.158	0.726	0.115	0.936	0.149	0.726	0.108	0.885	1
	26	2	0.118	0.156	0.726	0.114	0.959	0.162	0.726	0.118	0.993	0.153	0.726	0.111	0.938	1
	28	2	0.115	0.132	0.726	0.096	0.828	0.141	0.726	0.102	0.887	0.133	0.726	0.096	0.836	1
	30	2	0.111	0.133	0.726	0.097	0.867	0.142	0.726	0.103	0.926	0.134	0.726	0.097	0.873	1
Titik Bor	Kedalaman (H) (m)	h	CSR	NCEER (2001)				HBF (2012)				Boulanger & Idriss (2014)				SF =1
			kN/m2	CRR 7.5	MSF	CRR 8.5	SF	CRR 7.5	MSF	CRR 8.5	SF	CRR 7.5	MSF	CRR 8.5	SF	
	2	2	0.249621	0.188	0.726	0.136	0.546	0.193	0.726	0.140	0.560	0.180	0.726	0.131	0.523	1
	4	2	0.245743	0.176	0.726	0.128	0.520	0.181	0.726	0.131	0.533	0.170	0.726	0.123	0.501	1
	6	2	0.241864	0.193	0.726	0.140	0.580	0.199	0.726	0.144	0.596	0.185	0.726	0.134	0.555	1
	7.3	1.3	0.239343	0.218	0.726	0.158	0.661	0.227	0.726	0.165	0.688	0.209	0.726	0.151	0.632	1
	10	2.7	0.269531	0.167	0.726	0.121	0.449	0.172	0.726	0.124	0.462	0.162	0.726	0.117	0.435	1
	12	2	0.277438	0.163	0.726	0.118	0.427	0.168	0.726	0.122	0.440	0.159	0.726	0.115	0.415	1
	14	2	0.159532	0.146	0.726	0.106	0.663	0.153	0.726	0.111	0.694	0.144	0.726	0.105	0.656	1
	16	2	0.160699	0.130	0.726	0.094	0.587	0.140	0.726	0.101	0.631	0.132	0.726	0.095	0.594	1
	18	2	0.159667	0.128	0.726	0.093	0.580	0.138	0.726	0.100	0.626	0.130	0.726	0.094	0.589	1
	20	2	0.157782	0.119	0.726	0.087	0.549	0.132	0.726	0.095	0.605	0.123	0.726	0.089	0.566	1
	22	2	0.151768	0.130	0.726	0.094	0.621	0.140	0.726	0.101	0.668	0.131	0.726	0.095	0.629	1
	24	2	0.097164	0.128	0.726	0.093	0.958	0.138	0.726	0.100	1.034	0.130	0.726	0.094	0.972	1
	26	2	0.093906	0.095	0.726	0.069	0.738	0.115	0.726	0.083	0.888	0.104	0.726	0.076	0.805	1
	28	2	0.090497	0.092	0.726	0.066	0.735	0.112	0.726	0.082	0.901	0.101	0.726	0.073	0.812	1
	30	2	0.087026	0.088	0.726	0.064	0.732	0.110	0.726	0.080	0.917	0.098	0.726	0.071	0.820	1
Titik Bor	Kedalaman (H) (m)	h	CSR	NCEER (2001)				HBF (2012)				Boulanger & Idriss (2014)				SF =1
			kN/m2	CRR 7.5	MSF	CRR 8.5	SF	CRR 7.5	MSF	CRR 8.5	SF	CRR 7.5	MSF	CRR 8.5	SF	
	2	2	0.249621	0.168	0.726	0.122	0.488	0.173	0.726	0.125	0.502	0.163	0.726	0.118	0.473	1
	4	2	0.245743	0.205	0.726	0.148	0.604	0.211	0.726	0.153	0.623	0.195	0.726	0.142	0.577	1
	6	2	0.241864	0.225	0.726	0.163	0.674	0.235	0.726	0.170	0.704	0.215	0.726	0.156	0.645	1
	8	2	0.237986	0.222	0.726	0.161	0.676	0.231	0.726	0.168	0.705	0.212	0.726	0.154	0.646	1
	9.7	1.7	0.231955	0.232	0.726	0.169	0.727	0.244	0.726	0.177	0.764	0.223	0.726	0.162	0.697	1
	12	2.3	0.243964	0.196	0.726	0.142	0.582	0.201	0.726	0.146	0.598	0.187	0.726	0.136	0.556	1
	14	2	0.249411	0.246	0.726	0.178	0.715	0.262	0.726	0.190	0.761	0.237	0.726	0.172	0.690	1
	16	2	0.250561	0.281	0.726	0.204	0.812	0.308	0.726	0.224	0.892	0.277	0.726	0.201	0.801	1
	18	2	0.247694	0.279	0.726	0.202	0.817	0.306	0.726	0.222	0.896	0.275	0.726	0.199	0.804	1
	20	2	0.241163	0.276	0.726	0.201	0.831	0.302	0.726	0.219	0.910	0.272	0.726	0.197	0.817	1
	22	2	0.228408	0.396	0.726	0.287	1.258	0.460	0.726	0.334	1.460	0.414	0.726	0.300	1.314	1
	24	2	0.220874	0.347	0.726	0.252	1.141	0.399	0.726	0.289	1.310	0.357	0.726	0.259	1.173	1
	26	2	0.219699	0.306	0.726	0.222	1.010	0.343	0.726	0.249	1.133	0.307	0.726	0.223	1.013	1
	28	2	0.217374	0.291	0.726	0.211	0.972	0.323	0.726	0.234	1.077	0.289	0.726	0.210	0.965	1
	30	2	0.214303	0.272	0.726	0.197	0.921	0.296	0.726	0.215	1.003	0.266	0.726	0.193	0.902	1