

# ANALISIS POTENSI LIKUEFAKSI PADA DAERAH ENDAPAN DANAU TONDANO

Joshua Banua

Hendra Riogilang, Steeva G. Rondonuwu

Jurusan Sipil Fakultas Teknik Universitas Sam Ratulangi Manado

Email: Joshua.Banua@gmail.com

## ABSTRAK

*Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui potensi terjadinya likuefaksi di daerah endapan Danau Tondano, tepatnya di Desa Paslaten, Kecamatan Kakas. Analisis potensi likuefaksi dilakukan dengan metode Idriss dan Boulanger (2004) dengan cara menghitung perbandingan antara rasio tahanan siklik dan rasio tekanan siklik. Dimana nilai rasio tekanan siklik dan rasio tahanan siklik bergantung dari tiap parameter tanah seperti berat jenis, kadar air, fines content, tegangan tanah, dan tegangan efektif tanah juga dari parameter luar seperti magnitude gempa, dan kecepatan rambat gelombang tanah. Dilakukan uji standard penetration test di Desa Paslaten, Kecamatan Kakas untuk mengambil nilai N dari standard penetration test yang akan dipakai dalam analisis. Kemudian dilakukan pengujian di laboratorium untuk mengetahui jenis tanah dan tiap parameternya. Uji laboratorium yang dilakukan berupa pengujian analisa saringan, pengujian kadar air, dan pengujian batas-batas Atterberg. Setelah itu dilakukan analisis likuefaksi untuk mengetahui faktor keamanan dari likuefaksi terhadap magnitude gempa  $M=5$ ,  $M=5.5$ ,  $M=6$ ,  $M=6.5$ ,  $M=7$ ,  $M=7.5$ . Dari penelitian yang dilakukan didapatkan nilai faktor keamanan terhadap likuefaksi berada di bawah 1 terhadap magnitude gempa  $M=5$ ,  $M=5.5$ ,  $M=6$ , dan  $M=6.5$  pada kedalaman 0.4 – 8 m, dan terhadap magnitude gempa  $M=7$ , dan  $M=7.5$  faktor keamanan dibawah 1 untuk kedalaman 0.4 - 10 m. Sehingga dapat disimpulkan bahwa daerah endapan Danau Tondano di Desa Paslaten, Kecamatan Kakas memiliki potensi tinggi terjadinya likuefaksi.*

**Kata Kunci:** Endapan Danau Tondano, Likuefaksi, Standard Penetration Test.

## PENDAHULUAN

Likuefaksi adalah fenomena alam yang dapat terjadi di lapisan tanah non kohesif (lanau sampai pasir) yang memiliki kedalaman muka air yang tinggi seperti daerah endapan Danau Tondano, dimana lapisan tanah tersebut akan bersifat seperti benda cair dan “menenggelamkan” semua struktur yang berada di atasnya. Likuefaksi dapat terjadi karena adanya gempa bumi yang mengurangi kekuatan tanah akibat naiknya tekanan air pori secara spontan. Peristiwa likuefaksi dapat menyebabkan amblasan tanah, keruntuhan, tilting, kerusakan pada bangunan, retakan pada tanah, longsor, semburan pasir, dan lain-lain.

Beberapa penelitian telah dilakukan di lokasi-lokasi endapan danau (Lacustrine & Fluvial Deposits), menurut penelitian yang dilakukan di beberapa lokasi endapan danau di India (Verma, dkk., 2014), ditemukan bahwa sebagian besar daerah endapan danau mengalami likuefaksi dikarenakan adanya

muka air tanah yang tinggi, profil tanah berupa pasir dan kerikil, dan peak ground acceleration (PGA) pada endapan lacustrine yang umumnya nilainya tinggi. Adapun contoh kasus-kasus likuefaksi pada daerah endapan danau dapat dilihat pada tiap-tiap gempa besar seperti gempa San Fransisco, Amerika Serikat; gempa Lorna Prieta, Amerika Serikat; Fucino Basin, Italia; Gempa Palu, Indonesia; Gempa Niigata, Jepang; dan banyak lagi.

Tondano merupakan kaldera quarternary, dimana terdapat danau Tondano yang menempati kaldera tersebut. Pembentukan kaldera Tondano terjadi dalam dua fase, yaitu erupsi vulkanik pertama yang membentuk tuf “Domato” pada zaman Pliosen, dan tuf “Teras” pada zaman Pleistosen. Pembentukan cekungan Tondano kemudian berlanjut dengan adanya pola sesar *strike-slip* yang membentuk danau Tondano menjadi cekungan berorientasi NNE-SSW. Pada penelitian yang dilakukan oleh Dam dkk (2001) mengatakan bahwa daerah

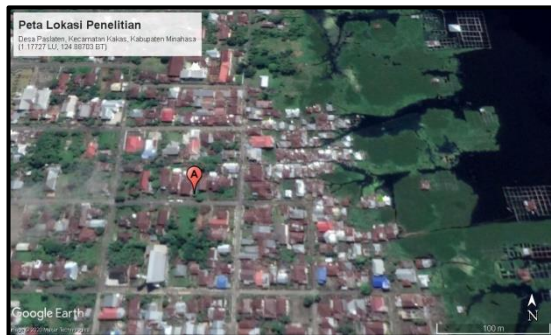
endapan Danau Tondano sebagian besar merupakan endapan *lacustrine* dan ada juga endapan *alluvial*.

Menurut Peta Geologi Sulawesi Utara Desa Paslaten di Kecamatan Kakas merupakan daerah bekas endapan danau/sungai Tondano yang memiliki jenis tanah yang bersifat non-kohesif atau pasir yang membuat potensi likuefaksi nya lebih besar (Tsuchida, 1970). Tetapi menurut Atlas Zona Kerentanan Likuefaksi Indonesia daerah endapan Danau Tondano ini memiliki potensi untuk terjadi likuefaksi yang rendah, sehingga perlu dilakukan kajian lebih lanjut.

Hal ini melatarbelakangi penulisan untuk menganalisis potensi likuefaksi di daerah endapan Danau Tondano di desa Paslaten Kecamatan Kakas berdasarkan hasil Uji Standard Penetration Test (SPT).

**METODE PENELITIAN**

Lokasi Penelitian yaitu di Desa Paslaten, Kecamatan Kakas, Kabupaten Minahasa. Penelitian dilakukan pada titik (1.17727 LU, 124.88703BT).



Gambar 1. Peta Lokasi Penelitian

Desa paslaten Kecamatan Kakas memiliki kondisi tanah berpasir dengan muka air tanah yang tinggi karena berada pada daerah endapan Danau Tondano.

Menurut jejak rekaman gempa oleh USCS, lokasi penelitian dalam radius 150 km memiliki 362 gempa dari tahun 1900-2020, dimana 332 diantaranya merupakan gempa berskala M=5.0 sampai M=5.9, 27 diantaranya merupakan gempa berskala M=6.0 sampai M=6.9, dan 3 diantaranya berskala diatas 7, hal ini mendasari tinjauan skala gempa dalam penelitian yaitu M=5.0; M=5.5; M=6.0; M=6.5; M=7.0; dan M=7.5.

Data yang digunakan adalah data tanah yaitu data N-SPT yang didapatkan dengan uji SPT dengan standar uji SNI 4153-2008, *finest content* (FC) yang didapatkan dari uji analisa saringan, dan berat isi tanah ( $\gamma$ ) yang diambil dari tabel korelasi N-SPT terhadap parameter tanah (Peck, dkk. 1998; Bowles, 1997; BNBC, 2015).

Tabel 1. Korelasi N-SPT

| SPT N-value                            | 0 to 4            | 4 to 10  | 10 to 30     | 30 to 50     | >50          |       |
|--|-------------------|----------|--------------|--------------|--------------|-------|
| Compactness                            | very loose        | loose    | medium       | dense        | very dense   |       |
| Relative Density, D <sub>r</sub> (%)   | 0 to 15           | 15 to 35 | 35 to 65     | 65 to 85     | 85 to 100    |       |
| Angle of Internal Friction, $\phi$ (°) | <28               | 28 to 30 | 30 to 36     | 36 to 41     | >41          |       |
| Unit Weight (moist)                    | pcf               | <100     | 95 to 125    | 110 to 130   | 110 to 140   | >130  |
|  | kN/m <sup>3</sup> | <15.7    | 14.9 to 19.6 | 17.3 to 20.4 | 17.3 to 22.0 | >20.4 |
| Submerged unit weight                  | pcf               | <60      | 55 to 65     | 60 to 70     | 65 to 85     | >75   |
|  | kN/m <sup>3</sup> | <9.4     | 8.6-10.2     | 9.4 to 11.0  | 10.5 to 13.4 | >11.8 |

Kemudian dilakukan perhitungan nilai tekanan tanah menggunakan persamaan:

untuk kondisi  $H < h_w$

$$\sigma_{vc} = H \times \gamma_{moist} \tag{1}$$

untuk kondisi  $H > h_w$

$$\sigma_{vc} = h_w \times \gamma_{moist} + (H_{soil} - h_w) \times \gamma_{moist} \tag{2}$$

Tekanan efektif kemudian dapat dihitung berdasarkan kedalaman muka air tanah, dengan menggunakan persamaan:

$$\sigma'_{vc} = \sigma_{vc} - (H \times \gamma_w) \tag{3}$$

Data N-SPT yang didapatkan dikoreksi terhadap 60% tumbukan dengan menggunakan nilai-nilai koreksi oleh Robertson dan Wride (1998), dimana untuk menghitung nilai N-SPT terkoreksi dapat digunakan persamaan dari Youd dan Idriss (2001) dan Cetin, dkk (2004):

$$(N_1)_{60} = N C_N C_E C_B C_S C_R \tag{4}$$

Setelah dikoreksi terhadap 60% rasio energi, nilai  $(N_1)_{60}$  kemudian dikoreksi terhadap nilai FC, dimana untuk mendapatkan nilai koreksi N-SPT terhadap FC  $((N_1)_{60CS})$  dapat digunakan persamaan:

$$(N_1)_{60CS} = (N_1)_{60} + \exp \left( 1.63 + \frac{9.7}{FC+0.01} - \left( \frac{15.7}{FC+0.01} \right)^2 \right) \tag{5}$$

Selain data tanah, juga diperlukan data gempa berupa magnitude gempa dan percepatan tanah maksimum di permukaan ( $a_{max}$ ) dimana, untuk mendapatkan  $a_{max}$  membutuhkan nilai percepatan tanah di batuan dasar ( $S_{PGA}$ ) dan koefisien amplifikasi tanah ( $F_{PGA}$ ):

$$a_{max} = PGA_M = F_{PGA} \times S_{PGA} \quad (6)$$

Nilai  $S_{PGA}$  dan  $F_{PGA}$  ditentukan berdasarkan situs yang dapat diperoleh dari peta gempa Indonesia, SNI 1726-2012, dan PUSKIM.

Tabel 2. Klasifikasi Situs

| Klasifikasi Site                       | $\bar{V}_z$ (m/dt)          | $\bar{N}$                 | $\bar{S}_s$ (kPa)            |
|--|-----------------------------|---------------------------|------------------------------|
| A. Batuan Keras                        | $\bar{V}_z \geq 1500$       | N/A                       | N/A                          |
| B. Batuan                              | $750 < \bar{V}_z \leq 1500$ | N/A                       | N/A                          |
| C. Tanah Sangat Padat dan Batuan Lunak | $350 < \bar{V}_z \leq 750$  | $\bar{N} > 50$            | $\bar{S}_s \geq 100$         |
| D. Tanah Sedang                        | $175 < \bar{V}_z \leq 350$  | $15 \leq \bar{N} \leq 50$ | $50 \leq \bar{S}_s \leq 100$ |
| E. Tanah Lunak                         | $\bar{V}_z < 175$           | $\bar{N} < 15$            | $\bar{S}_s < 50$             |

Atau setiap profil lapisan tanah dengan ketebalan lebih dari 3 m dengan karakteristik sebagai berikut :

1. Indeks plastisitas,  $PI > 20$ ,
2. Kadar air ( $w$ )  $\geq 40\%$ , dan
3. Kuat geser tak terdrainase  $\bar{S}_s < 25$  kPa

(Sumber: SNI 1726-2012)

Analisis potensi likuefaksi dilakukan dengan metode Seed dan Idriss (1971) yang dikembangkan oleh Idriss dan Boulanger (2008) yang merupakan perbandingan nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dan *Cyclic Stress Ratio* (CSR)

$$FS = \frac{CRR_{M,\sigma'_{vc}}}{CSR_{M,\sigma'_{vc}}} \quad (7)$$

$$CRR_{M,\sigma'_{vc}} = CRR_{M=7.5,\sigma'_{vc}=1} \cdot MSF \cdot K\sigma \quad (8)$$

$$CSR_{M,\sigma'_{vc}} = 0.65 \cdot \frac{a_{max}}{g} \cdot \frac{\sigma'_{vc}}{\sigma'_{vc}} \cdot r_d \quad (9)$$

Metode ini menggunakan nilai *Magnitude Scaling Factor* (MSF) oleh Idriss (1999) yang mengatur nilai CRR dan CSR terhadap suatu magnitude tertentu. Selain MSF:

$$MSF = 6.9 \exp\left(-\frac{M}{4}\right) - 0.058 < 1.8 \quad (10)$$

$K_\sigma$  merupakan nilai koreksi *overburden* yang digunakan untuk mengatur nilai CSR atau CRR pada tekanan 1 atm (101.325 Pa). Boulanger (2003b), menyatakan persamaan untuk menghitung nilai  $K_\sigma$  adalah:

$$K_\sigma = 1 - C_\sigma \ln\left(\frac{\sigma'_{vc}}{P_a}\right) \leq 1.1 \quad (11)$$

$$C_\sigma = \frac{1}{18.9 - 2.55\sqrt{(N_1)_{60}}} < 0.3 \quad (12)$$

Metode ini juga memperhitungkan nilai reduksi tekanan ( $r_d$ ) terhadap kedalaman dan magnitude gempa (M) yang diusulkan oleh Idris (1999) yang dapat dilihat pada persamaan dibawah:

$$r_d = \exp(\alpha(z) + \beta(z)M_W) \quad (13)$$

$$\alpha(z) = -1.012 - 1.126 \sin\left(\frac{(z)}{11.73} + 5.133\right) \quad (14)$$

$$\beta(z) = 0.106 - 0.118 \sin\left(\frac{(z)}{11.38} + 5.412\right) \quad (15)$$

Untuk melihat jarak maksimum ( $R_c$ ) titik gempa berskala tertentu terhadap titik lokasi penelitian untuk dapat terjadi likuefaksi, digunakan persamaan oleh Kuribayashi dan Tatsuoka (1975).

## HASIL DAN PEMBAHASAN

### Standard Penetration Test

Tes penetrasi sederhana dilakukan dengan menggunakan automatic trip hammer, dengan sampler standard, diameter pengeboran 10 cm, dan panjang rod 10-20 m

Tabel 3. Nilai N-SPT

| Kedalaman (m) | $N_1$ | $N_2$ | $N_3$ | $N_m$ |
|---------------|-------|-------|-------|-------|
| 0.0           | 1     | 1     | 1     | 2     |
| 2.0           | 1     | 1     | 2     | 3     |
| 4.0           | 2     | 2     | 2     | 4     |
| 6.0           | 7     | 7     | 7     | 14    |
| 8.0           | 7     | 10    | 10    | 20    |
| 10.0          | 10    | 12    | 13    | 25    |

Kemudian dilakukan koreksi dengan persamaan 1 dan koefisien koreksi dari Robertson dan Wride (1998) berdasarkan jenis peralatan yang digunakan, untuk mendapatkan nilai  $(N_1)_{60}$  yaitu:

Tabel 4. Nilai  $(N_1)_{60}$

| Kedalaman | $N_m$ | $C_E$ | $C_B$ | $C_S$ | $N_{60}$ |
|-----------|-------|-------|-------|-------|----------|
| 0.00 m    | 2     | 1.25  | 1     | 1     | 2.38     |
| 2.00 m    | 3     |       |       |       | 3.56     |
| 4.00 m    | 4     |       |       |       | 4.75     |
| 6.00 m    | 14    |       |       |       | 14.63    |
| 8.00 m    | 20    |       |       |       | 23.75    |
| 10.00 m   | 25    |       |       |       | 29.69    |
| 12.00 m   | 30    |       |       |       | 35.63    |
| 14.00 m   | 34    | 40.38 |       |       |          |

**Berat Isi Tanah**

Berat isi tanah dalam penelitian ini digunakan tabel korelasi antara nilai N-SPT dengan parameter tanah (tabel 1), sehingga didapatkan nilai berat isi:

Tabel 5. Nilai Berat Isi Tanah

| Kedalaman | $\gamma_{moist}$<br>( $kN/m^3$ ) | Kedalaman | $\gamma_{moist}$<br>( $kN/m^3$ ) | $\gamma_{moist}$<br>( $kN/m^3$ ) |
|-----------|----------------------------------|-----------|----------------------------------|----------------------------------|
| 0         | 15.3                             | 4.2       | 15.7                             | 17.7                             |
| 0.2       | 14.8                             | 4.4       | 15.1                             | 20.1                             |
| 0.4       | 15.6                             | 4.6       | 15.1                             | 17.5                             |
| 0.6       | 15.2                             | 4.8       | 15.7                             | 19.3                             |
| 0.8       | 14.9                             | 5         | 15                               | 21                               |
| 1         | 15.6                             | 5.2       | 14.9                             | 21.8                             |
| 1.2       | 15.1                             | 5.4       | 14.7                             | 21.7                             |
| 1.4       | 14.7                             | 5.6       | 15.2                             | 18.3                             |
| 1.6       | 14.8                             | 5.8       | 15.7                             | 18.1                             |
| 1.8       | 14.8                             | 6         | 21.3                             |                                  |
| 2         | 15.6                             | 6.2       | 20.7                             |                                  |
| 2.2       | 14.8                             | 6.4       | 18.3                             |                                  |
| 2.4       | 14.9                             | 6.6       | 19.6                             |                                  |
| 2.6       | 15.4                             | 6.8       | 17.9                             |                                  |
| 2.8       | 14.9                             | 7         | 20.7                             |                                  |
| 3         | 15.6                             | 7.2       | 18.6                             |                                  |
| 3.2       | 15.3                             | 7.4       | 20.9                             |                                  |
| 3.4       | 15.2                             | 7.6       | 19.5                             |                                  |
| 3.6       | 15.1                             | 7.8       | 20.4                             |                                  |
| 3.8       | 15                               | 8         | 17.6                             |                                  |
| 4         | 15.6                             | 8.2       | 21.9                             |                                  |

**Tekanan pada Tanah**

Nilai tekanan tanah dan tekanan efektif tanah diperoleh dengan persamaan (1), (2), dan (3). Dengan menghitung titik awal muka air tanah di lokasi penelitian sedalam 0.5 m dari permukaan tanah, didapatkan:

Tabel 6. Tekanan Vertikal Tanah

| Kedalaman<br>(m) | $\sigma_v$<br>( $kN/m^2$ ) |
|------------------|----------------------------|
| 0.0              | 0.00                       |
| 0.2              | 3.05                       |
| 0.4              | 6.09                       |
| 0.6              | 9.33                       |
| 0.8              | 12.76                      |
| 1.0              | 16.18                      |
| 1.2              | 19.61                      |
| 1.4              | 23.04                      |
| 1.6              | 26.47                      |
| 1.8              | 29.89                      |
| 2.0              | 33.32                      |
| 2.2              | 36.75                      |
| 2.4              | 40.17                      |
| 2.6              | 43.60                      |
| 2.8              | 47.03                      |
| 3.0              | 50.46                      |
| 3.2              | 53.88                      |
| 3.4              | 57.31                      |
| 3.6              | 60.74                      |
| 3.8              | 64.16                      |
| 4.0              | 67.59                      |

**Lanjutan.**

| Kedalaman<br>(m) | $\sigma_{vc}$<br>( $kN/m^2$ ) |
|------------------|-------------------------------|
| 4.2              | 71.02                         |
| 4.4              | 74.44                         |
| 4.6              | 77.87                         |
| 4.8              | 81.30                         |
| 5.0              | 84.73                         |
| 5.2              | 88.15                         |
| 5.4              | 91.58                         |
| 5.6              | 95.01                         |
| 5.8              | 98.43                         |
| 6.0              | 101.86                        |
| 6.2              | 105.29                        |
| 6.4              | 108.72                        |
| 6.6              | 112.14                        |
| 6.8              | 115.57                        |
| 7.0              | 119.00                        |
| 7.2              | 122.42                        |
| 7.4              | 125.85                        |
| 7.6              | 129.28                        |
| 7.8              | 132.71                        |
| 8.0              | 136.13                        |
| 8.2              | 139.56                        |
| 8.4              | 0.00                          |
| 8.6              | 0.00                          |
| 8.8              | 0.00                          |
| 9.0              | 0.00                          |
| 9.2              | 0.00                          |
| 9.4              | 0.00                          |
| 9.6              | 0.00                          |
| 9.8              | 0.00                          |
| 10.0             | 0.00                          |

Tabel 7. Tekanan Efektif Tanah

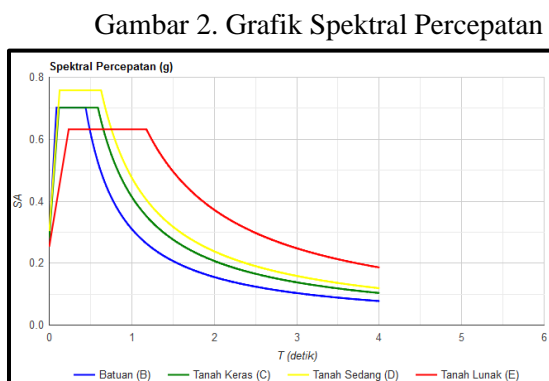
| Kedalaman<br>(m) | $\sigma_{vc}$<br>( $kN/m^2$ ) |
|------------------|-------------------------------|
| 0.0              | 0.00                          |
| 0.2              | 3.05                          |
| 0.4              | 6.09                          |
| 0.6              | 8.35                          |
| 0.8              | 9.81                          |
| 1.0              | 11.28                         |
| 1.2              | 12.74                         |
| 1.4              | 14.21                         |
| 1.6              | 15.67                         |
| 1.8              | 17.14                         |
| 2.0              | 18.60                         |
| 2.2              | 20.07                         |
| 2.4              | 21.53                         |
| 2.6              | 23.00                         |
| 2.8              | 24.47                         |
| 3.0              | 25.93                         |
| 3.2              | 27.40                         |
| 3.4              | 28.86                         |
| 3.6              | 30.33                         |
| 3.8              | 31.79                         |
| 4.0              | 33.26                         |

Lanjutan.

| Kedalaman (m) | $\sigma_{vc}$ (kN/m <sup>2</sup> ) |
|---------------|------------------------------------|
| 4.2           | 34.72                              |
| 4.4           | 36.19                              |
| 4.6           | 37.65                              |
| 4.8           | 39.12                              |
| 5.0           | 40.58                              |
| 5.2           | 42.05                              |
| 5.4           | 43.51                              |
| 5.6           | 44.98                              |
| 5.8           | 46.44                              |
| 6.0           | 47.91                              |
| 6.2           | 49.37                              |
| 6.4           | 50.84                              |
| 6.6           | 52.30                              |
| 6.8           | 53.77                              |
| 7.0           | 55.23                              |
| 7.2           | 56.70                              |
| 7.4           | 58.16                              |
| 7.6           | 59.63                              |
| 7.8           | 61.09                              |
| 8.0           | 62.56                              |
| 8.2           | 64.02                              |
| 8.4           | 65.49                              |
| 8.6           | 66.95                              |
| 8.8           | 68.42                              |
| 9.0           | 69.88                              |
| 9.2           | 71.35                              |
| 9.4           | 72.81                              |
| 9.6           | 74.28                              |
| 9.8           | 75.74                              |
| 10.0          | 77.21                              |

### Percepatan Tanah Maksimum

Percepatan tanah maksimum ( $a_{max}$ ) diperoleh dari website PUSKIM, dengan memasukkan koordinat lokasi penelitian, untuk klasifikasi tanah sedang (SD), didapatkan nilai  $S_{PGA} = 0.444g$  dan  $F_{PGA} = 1.056g$ .



(Sumber: Desain Spektra Indonesia 2011)

Dengan memakai persamaan (6), diperoleh percepatan maksimum tanah permusaan  $a_{max} = PGA_M$  sebesar 0.469g.

### Magnitude Scaling Factor

Faktor Skala Gempa (MSF) diperoleh dengan menggunakan persamaan (10), dimana skala magnitude gempa disesuaikan terhadap magnitude  $M=7.5$ , didapatkan hasil:

Tabel 3. Hasil *Magnitude Scaling Factor*

| Magnitude | MSF  |
|-----------|------|
| 5.0       | 1.8  |
| 5.5       | 1.69 |
| 6.0       | 1.48 |
| 6.5       | 1.3  |
| 7.0       | 1.14 |
| 7.5       | 1.00 |

### Faktor Koreksi Overburden

Faktor koreksi overburden ( $K_\sigma$ ) dihitung dengan menggunakan persamaan (11) dan (12), nilai  $C_\sigma$  sudah langsung disubstitusikan kedalam persamaan (11), sehingga didapatkan hasil:

Tabel 4. Hasil Faktor Koreksi *Overburden*

| Kedalaman (m) | $K_\sigma$ | Kedalaman (m) | $K_\sigma$ | Kedalaman (m) | $K_\sigma$ |
|---------------|------------|---------------|------------|---------------|------------|
| 0.0           | n.a        | 4.2           | 1.093      | 8.4           | 1.086      |
| 0.2           | n.a        | 4.4           | 1.090      | 8.6           | 1.081      |
| 0.4           | n.a        | 4.6           | 1.086      | 8.8           | 1.076      |
| 0.6           | 1.100      | 4.8           | 1.083      | 9.0           | 1.071      |
| 0.8           | 1.100      | 5.0           | 1.079      | 9.2           | 1.066      |
| 1.0           | 1.100      | 5.2           | 1.076      | 9.4           | 1.062      |
| 1.2           | 1.100      | 5.4           | 1.073      | 9.6           | 1.058      |
| 1.4           | 1.100      | 5.6           | 1.069      | 9.8           | 1.054      |
| 1.6           | 1.100      | 5.8           | 1.066      | 10.0          | 1.050      |
| 1.8           | 1.100      | 6.0           | 1.100      |               |            |
| 2.0           | 1.100      | 6.2           | 1.100      |               |            |
| 2.2           | 1.100      | 6.4           | 1.100      |               |            |
| 2.4           | 1.100      | 6.6           | 1.099      |               |            |
| 2.6           | 1.100      | 6.8           | 1.094      |               |            |
| 2.8           | 1.100      | 7.0           | 1.089      |               |            |
| 3.0           | 1.100      | 7.2           | 1.085      |               |            |
| 3.2           | 1.100      | 7.4           | 1.080      |               |            |
| 3.4           | 1.100      | 7.6           | 1.076      |               |            |
| 3.6           | 1.097      | 7.8           | 1.072      |               |            |
| 3.8           | 1.093      | 8.0           | 1.068      |               |            |
| 4.0           | 1.097      | 8.2           | 1.091      |               |            |

**Cyclic Resistance Ratio**

Rasio tahanan siklik (CRR) diperoleh dengan menggunakan persamaan dari persamaan (8) sehingga, dengan menggunakan nilai MSF,  $K_{\sigma}$ , dan  $CRR_{M=7.5, \sigma'_{vc}=1}$  didapatkan hasil yang dapat dilihat pada tabel:

Tabel 5. Cyclic Resistance Ratio

| Kedalaman (m) | CSR M=5.0 | CSR M=5.5 | CSR M=6.0 | CSR M=6.5 | CSR M=7.0 | CSR M=7.5 |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.0           | n.a       | n.a       | n.a       | n.a       | n.a       | n.a       |
| 0.2           | 0.69      | 0.76      | 0.83      | 0.92      | 1.01      | 1.12      |
| 0.4           | 0.67      | 0.74      | 0.82      | 0.90      | 0.99      | 1.09      |
| 0.6           | 0.74      | 0.81      | 0.89      | 0.98      | 1.08      | 1.19      |
| 0.8           | 0.84      | 0.92      | 1.02      | 1.12      | 1.23      | 1.35      |
| 1.0           | 0.91      | 1.00      | 1.10      | 1.20      | 1.32      | 1.46      |
| 1.2           | 0.95      | 1.05      | 1.15      | 1.26      | 1.39      | 1.52      |
| 1.4           | 0.98      | 1.08      | 1.18      | 1.30      | 1.42      | 1.56      |
| 1.6           | 1.00      | 1.10      | 1.20      | 1.32      | 1.45      | 1.59      |
| 1.8           | 1.01      | 1.11      | 1.21      | 1.33      | 1.46      | 1.59      |
| 2.0           | 1.01      | 1.11      | 1.21      | 1.33      | 1.46      | 1.59      |
| 2.2           | 1.01      | 1.11      | 1.21      | 1.32      | 1.45      | 1.59      |
| 2.4           | 1.01      | 1.10      | 1.20      | 1.31      | 1.44      | 1.57      |
| 2.6           | 1.00      | 1.09      | 1.19      | 1.30      | 1.42      | 1.55      |
| 2.8           | 0.99      | 1.08      | 1.18      | 1.28      | 1.40      | 1.53      |
| 3.0           | 0.98      | 1.06      | 1.16      | 1.27      | 1.38      | 1.50      |
| 3.2           | 0.96      | 1.05      | 1.14      | 1.24      | 1.36      | 1.48      |
| 3.4           | 0.95      | 1.03      | 1.12      | 1.22      | 1.33      | 1.45      |
| 3.6           | 0.93      | 1.01      | 1.10      | 1.20      | 1.30      | 1.42      |
| 3.8           | 0.91      | 0.99      | 1.08      | 1.17      | 1.28      | 1.39      |
| 4.0           | 0.90      | 0.97      | 1.06      | 1.15      | 1.25      | 1.35      |
| 4.2           | 0.88      | 0.95      | 1.03      | 1.12      | 1.22      | 1.32      |
| 4.4           | 0.86      | 0.93      | 1.01      | 1.10      | 1.19      | 1.29      |
| 4.6           | 0.84      | 0.91      | 0.99      | 1.07      | 1.16      | 1.25      |
| 4.8           | 0.82      | 0.89      | 0.97      | 1.04      | 1.13      | 1.22      |
| 5.0           | 0.81      | 0.87      | 0.94      | 1.02      | 1.10      | 1.19      |
| 5.2           | 0.79      | 0.85      | 0.92      | 0.99      | 1.07      | 1.16      |
| 5.4           | 0.77      | 0.83      | 0.89      | 0.97      | 1.04      | 1.12      |
| 5.6           | 0.75      | 0.81      | 0.87      | 0.94      | 1.01      | 1.09      |
| 5.8           | 0.73      | 0.79      | 0.85      | 0.91      | 0.98      | 1.06      |
| 6.0           | 0.71      | 0.77      | 0.83      | 0.89      | 0.96      | 1.03      |
| 6.2           | 0.70      | 0.75      | 0.80      | 0.86      | 0.93      | 1.00      |
| 6.4           | 0.68      | 0.73      | 0.78      | 0.84      | 0.90      | 0.97      |
| 6.6           | 0.66      | 0.71      | 0.76      | 0.81      | 0.87      | 0.94      |
| 6.8           | 0.64      | 0.69      | 0.74      | 0.79      | 0.85      | 0.91      |
| 7.0           | 0.63      | 0.67      | 0.72      | 0.77      | 0.82      | 0.88      |
| 7.2           | 0.61      | 0.65      | 0.70      | 0.75      | 0.80      | 0.85      |
| 7.4           | 0.59      | 0.63      | 0.68      | 0.72      | 0.77      | 0.82      |
| 7.6           | 0.58      | 0.62      | 0.66      | 0.70      | 0.75      | 0.80      |
| 7.8           | 0.56      | 0.60      | 0.64      | 0.68      | 0.72      | 0.77      |
| 8.0           | 0.55      | 0.58      | 0.62      | 0.66      | 0.70      | 0.75      |
| 8.2           | 0.53      | 0.56      | 0.60      | 0.64      | 0.68      | 0.72      |
| 8.4           | 0.52      | 0.55      | 0.58      | 0.62      | 0.66      | 0.70      |
| 8.6           | 0.50      | 0.53      | 0.57      | 0.60      | 0.64      | 0.68      |
| 8.8           | 0.49      | 0.52      | 0.55      | 0.58      | 0.62      | 0.65      |
| 9.0           | 0.47      | 0.50      | 0.53      | 0.56      | 0.60      | 0.63      |
| 9.2           | 0.46      | 0.49      | 0.52      | 0.55      | 0.58      | 0.61      |
| 9.4           | 0.45      | 0.47      | 0.50      | 0.53      | 0.56      | 0.59      |
| 9.6           | 0.43      | 0.46      | 0.48      | 0.51      | 0.54      | 0.57      |
| 9.8           | 0.42      | 0.45      | 0.47      | 0.50      | 0.52      | 0.55      |
| 10.0          | 0.41      | 0.43      | 0.46      | 0.48      | 0.51      | 0.53      |

**Koefisien Reduksi Tekanan ( $r_d$ )**

Koefisien reduksi tekanan digunakan untuk menghitung nilai CSR, dengan menggunakan persamaan (13), (14), dan (15), didapatkan hasil  $r_d$ :

Tabel 6. Koefisien Tekanan Reduksi

| Kedalaman (m) | $r_d$ M=5.0 | $r_d$ M=5.5 | $r_d$ M=6.0 | $r_d$ M=6.5 | $r_d$ M=7.0 | $r_d$ M=7.5 |
|---------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 0.0           | 2.30        | 2.53        | 2.79        | 3.08        | 3.40        | 3.75        |
| 0.2           | 2.25        | 2.48        | 2.74        | 3.02        | 3.32        | 3.66        |
| 0.4           | 2.21        | 2.43        | 2.68        | 2.95        | 3.25        | 3.58        |
| 0.6           | 2.16        | 2.38        | 2.62        | 2.88        | 3.17        | 3.49        |
| 0.8           | 2.12        | 2.33        | 2.56        | 2.82        | 3.10        | 3.41        |
| 1.0           | 2.07        | 2.28        | 2.50        | 2.75        | 3.03        | 3.33        |
| 1.2           | 2.03        | 2.23        | 2.45        | 2.69        | 2.95        | 3.24        |
| 1.4           | 1.98        | 2.18        | 2.39        | 2.62        | 2.88        | 3.16        |
| 1.6           | 1.94        | 2.13        | 2.33        | 2.56        | 2.81        | 3.08        |
| 1.8           | 1.90        | 2.08        | 2.28        | 2.50        | 2.74        | 3.00        |
| 2.0           | 1.85        | 2.03        | 2.22        | 2.43        | 2.67        | 2.92        |
| 2.2           | 1.81        | 1.98        | 2.17        | 2.37        | 2.60        | 2.84        |
| 2.4           | 1.77        | 1.93        | 2.11        | 2.31        | 2.53        | 2.76        |
| 2.6           | 1.73        | 1.89        | 2.06        | 2.25        | 2.46        | 2.69        |
| 2.8           | 1.69        | 1.84        | 2.01        | 2.19        | 2.39        | 2.61        |
| 3.0           | 1.64        | 1.79        | 1.96        | 2.13        | 2.33        | 2.54        |
| 3.2           | 1.60        | 1.75        | 1.90        | 2.08        | 2.26        | 2.46        |
| 3.4           | 1.56        | 1.70        | 1.85        | 2.02        | 2.20        | 2.39        |
| 3.6           | 1.53        | 1.66        | 1.80        | 1.96        | 2.13        | 2.32        |
| 3.8           | 1.49        | 1.62        | 1.76        | 1.91        | 2.07        | 2.25        |
| 4.0           | 1.45        | 1.57        | 1.71        | 1.85        | 2.01        | 2.19        |
| 4.2           | 1.41        | 1.53        | 1.66        | 1.80        | 1.95        | 2.12        |
| 4.4           | 1.37        | 1.49        | 1.61        | 1.75        | 1.90        | 2.05        |
| 4.6           | 1.34        | 1.45        | 1.57        | 1.70        | 1.84        | 1.99        |
| 4.8           | 1.30        | 1.41        | 1.52        | 1.65        | 1.78        | 1.93        |
| 5.0           | 1.27        | 1.37        | 1.48        | 1.60        | 1.73        | 1.87        |
| 5.2           | 1.23        | 1.33        | 1.44        | 1.55        | 1.67        | 1.81        |
| 5.4           | 1.20        | 1.29        | 1.39        | 1.50        | 1.62        | 1.75        |
| 5.6           | 1.17        | 1.26        | 1.35        | 1.46        | 1.57        | 1.69        |
| 5.8           | 1.13        | 1.22        | 1.31        | 1.41        | 1.52        | 1.64        |
| 6.0           | 1.10        | 1.18        | 1.27        | 1.37        | 1.47        | 1.59        |
| 6.2           | 1.07        | 1.15        | 1.24        | 1.33        | 1.43        | 1.53        |
| 6.4           | 1.04        | 1.12        | 1.20        | 1.29        | 1.38        | 1.48        |
| 6.6           | 1.01        | 1.08        | 1.16        | 1.25        | 1.34        | 1.43        |
| 6.8           | 0.98        | 1.05        | 1.13        | 1.21        | 1.29        | 1.39        |
| 7.0           | 0.95        | 1.02        | 1.09        | 1.17        | 1.25        | 1.34        |
| 7.2           | 0.93        | 0.99        | 1.06        | 1.13        | 1.21        | 1.29        |
| 7.4           | 0.90        | 0.96        | 1.03        | 1.10        | 1.17        | 1.25        |
| 7.6           | 0.87        | 0.93        | 0.99        | 1.06        | 1.13        | 1.21        |
| 7.8           | 0.85        | 0.90        | 0.96        | 1.03        | 1.09        | 1.17        |
| 8.0           | 0.82        | 0.88        | 0.93        | 0.99        | 1.06        | 1.13        |
| 8.2           | 0.80        | 0.85        | 0.90        | 0.96        | 1.02        | 1.09        |
| 8.4           | 0.78        | 0.82        | 0.88        | 0.93        | 0.99        | 1.05        |
| 8.6           | 0.75        | 0.80        | 0.85        | 0.90        | 0.96        | 1.01        |
| 8.8           | 0.73        | 0.77        | 0.82        | 0.87        | 0.92        | 0.98        |
| 9.0           | 0.71        | 0.75        | 0.80        | 0.84        | 0.89        | 0.95        |
| 9.2           | 0.69        | 0.73        | 0.77        | 0.82        | 0.86        | 0.91        |
| 9.4           | 0.67        | 0.71        | 0.75        | 0.79        | 0.83        | 0.88        |
| 9.6           | 0.65        | 0.68        | 0.72        | 0.76        | 0.81        | 0.85        |
| 9.8           | 0.63        | 0.66        | 0.70        | 0.74        | 0.78        | 0.82        |
| 10.0          | 0.61        | 0.64        | 0.68        | 0.71        | 0.75        | 0.79        |

**Cyclic Stress Ratio (CSR)**

Rasio tekanan siklik (CRR) diperoleh dengan menggunakan persamaan dari persamaan (9) sehingga, percepatan maksimum tanah ( $a_{max}$ ), tekanan tanah dan tekanan efektif tanah, dan koefisien reduksi tekanan, didapatkan hasil yang dapat dilihat pada tabel:

Tabel 7. Cyclic Stress Ratio

| Kedalaman (m) | CSR M=5.0 | CSR M=5.5 | CSR M=6.0 | CSR M=6.5 | CSR M=7.0 | CSR M=7.5 |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.0           | na        | na        | na        | na        | na        | na        |
| 0.2           | 0.69      | 0.76      | 0.83      | 0.92      | 1.01      | 1.12      |
| 0.4           | 0.67      | 0.74      | 0.82      | 0.90      | 0.99      | 1.09      |
| 0.6           | 0.74      | 0.81      | 0.89      | 0.98      | 1.08      | 1.19      |
| 0.8           | 0.84      | 0.92      | 1.02      | 1.12      | 1.23      | 1.35      |
| 1.0           | 0.91      | 1.00      | 1.10      | 1.20      | 1.32      | 1.46      |
| 1.2           | 0.95      | 1.05      | 1.15      | 1.26      | 1.39      | 1.52      |
| 1.4           | 0.98      | 1.08      | 1.18      | 1.30      | 1.42      | 1.56      |
| 1.6           | 1.00      | 1.10      | 1.20      | 1.32      | 1.45      | 1.59      |
| 1.8           | 1.01      | 1.11      | 1.21      | 1.33      | 1.46      | 1.59      |
| 2.0           | 1.01      | 1.11      | 1.21      | 1.33      | 1.46      | 1.59      |
| 2.2           | 1.01      | 1.11      | 1.21      | 1.32      | 1.45      | 1.59      |
| 2.4           | 1.01      | 1.10      | 1.20      | 1.31      | 1.44      | 1.57      |
| 2.6           | 1.00      | 1.09      | 1.19      | 1.30      | 1.42      | 1.55      |
| 2.8           | 0.99      | 1.08      | 1.18      | 1.28      | 1.40      | 1.53      |
| 3.0           | 0.98      | 1.06      | 1.16      | 1.27      | 1.38      | 1.50      |
| 3.2           | 0.96      | 1.05      | 1.14      | 1.24      | 1.36      | 1.48      |
| 3.4           | 0.95      | 1.03      | 1.12      | 1.22      | 1.33      | 1.45      |
| 3.6           | 0.93      | 1.01      | 1.10      | 1.20      | 1.30      | 1.42      |
| 3.8           | 0.91      | 0.99      | 1.08      | 1.17      | 1.28      | 1.39      |
| 4.0           | 0.90      | 0.97      | 1.06      | 1.15      | 1.25      | 1.35      |
| 4.2           | 0.88      | 0.95      | 1.03      | 1.12      | 1.22      | 1.32      |
| 4.4           | 0.86      | 0.93      | 1.01      | 1.10      | 1.19      | 1.29      |
| 4.6           | 0.84      | 0.91      | 0.99      | 1.07      | 1.16      | 1.25      |
| 4.8           | 0.82      | 0.89      | 0.97      | 1.04      | 1.13      | 1.22      |
| 5.0           | 0.81      | 0.87      | 0.94      | 1.02      | 1.10      | 1.19      |
| 5.2           | 0.79      | 0.85      | 0.92      | 0.99      | 1.07      | 1.16      |
| 5.4           | 0.77      | 0.83      | 0.89      | 0.97      | 1.04      | 1.12      |
| 5.6           | 0.75      | 0.81      | 0.87      | 0.94      | 1.01      | 1.09      |
| 5.8           | 0.73      | 0.79      | 0.85      | 0.91      | 0.98      | 1.06      |
| 6.0           | 0.71      | 0.77      | 0.83      | 0.89      | 0.96      | 1.03      |
| 6.2           | 0.70      | 0.75      | 0.80      | 0.86      | 0.93      | 1.00      |
| 6.4           | 0.68      | 0.73      | 0.78      | 0.84      | 0.90      | 0.97      |
| 6.6           | 0.66      | 0.71      | 0.76      | 0.81      | 0.87      | 0.94      |
| 6.8           | 0.64      | 0.69      | 0.74      | 0.79      | 0.85      | 0.91      |
| 7.0           | 0.63      | 0.67      | 0.72      | 0.77      | 0.82      | 0.88      |
| 7.2           | 0.61      | 0.65      | 0.70      | 0.75      | 0.80      | 0.85      |
| 7.4           | 0.59      | 0.63      | 0.68      | 0.72      | 0.77      | 0.82      |
| 7.6           | 0.58      | 0.62      | 0.66      | 0.70      | 0.75      | 0.80      |
| 7.8           | 0.56      | 0.60      | 0.64      | 0.68      | 0.72      | 0.77      |
| 8.0           | 0.55      | 0.58      | 0.62      | 0.66      | 0.70      | 0.75      |
| 8.2           | 0.53      | 0.56      | 0.60      | 0.64      | 0.68      | 0.72      |
| 8.4           | 0.52      | 0.55      | 0.58      | 0.62      | 0.66      | 0.70      |
| 8.6           | 0.50      | 0.53      | 0.57      | 0.60      | 0.64      | 0.68      |
| 8.8           | 0.49      | 0.52      | 0.55      | 0.58      | 0.62      | 0.65      |
| 9.0           | 0.47      | 0.50      | 0.53      | 0.56      | 0.60      | 0.63      |
| 9.2           | 0.46      | 0.49      | 0.52      | 0.55      | 0.58      | 0.61      |
| 9.4           | 0.45      | 0.47      | 0.50      | 0.53      | 0.56      | 0.59      |
| 9.6           | 0.43      | 0.46      | 0.48      | 0.51      | 0.54      | 0.57      |
| 9.8           | 0.42      | 0.45      | 0.47      | 0.50      | 0.52      | 0.55      |
| 10.0          | 0.41      | 0.43      | 0.46      | 0.48      | 0.51      | 0.53      |

**Faktor Keamanan Potensi Likuefaksi**

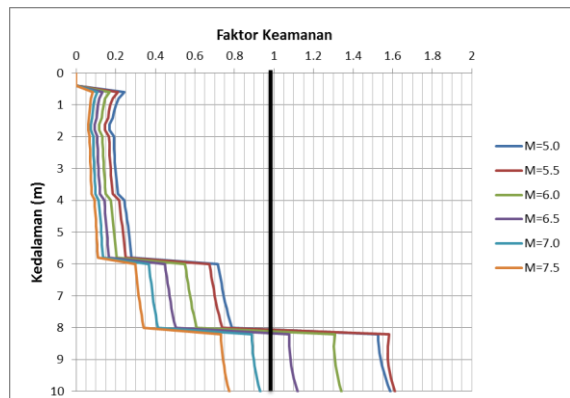
Faktor keamanan potensi likuefaksi dihitung dengan menggunakan perbandingan antara CRR dan CSR seperti pada persamaan (7) didapatkan hasil:

Tabel 8. Faktor Keamanan Likuefaksi

| Kedalaman (m) | CSR M=5.0 | CSR M=5.5 | CSR M=6.0 | CSR M=6.5 | CSR M=7.0 | CSR M=7.5 |
|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 0.0           | na        | na        | na        | na        | na        | na        |
| 0.2           | na        | na        | na        | na        | na        | na        |
| 0.4           | na        | na        | na        | na        | na        | na        |
| 0.6           | 0.24      | 0.20      | 0.16      | 0.13      | 0.10      | 0.08      |
| 0.8           | 0.20      | 0.17      | 0.14      | 0.11      | 0.09      | 0.07      |
| 1.0           | 0.19      | 0.16      | 0.13      | 0.10      | 0.08      | 0.07      |
| 1.2           | 0.18      | 0.16      | 0.13      | 0.10      | 0.08      | 0.06      |
| 1.4           | 0.18      | 0.15      | 0.12      | 0.10      | 0.08      | 0.06      |
| 1.6           | 0.16      | 0.14      | 0.11      | 0.09      | 0.07      | 0.06      |
| 1.8           | 0.16      | 0.14      | 0.11      | 0.09      | 0.07      | 0.06      |
| 2.0           | 0.18      | 0.16      | 0.13      | 0.10      | 0.08      | 0.07      |
| 2.2           | 0.18      | 0.16      | 0.13      | 0.10      | 0.08      | 0.07      |
| 2.4           | 0.18      | 0.16      | 0.13      | 0.10      | 0.08      | 0.07      |
| 2.6           | 0.18      | 0.16      | 0.13      | 0.10      | 0.08      | 0.07      |
| 2.8           | 0.19      | 0.16      | 0.13      | 0.11      | 0.08      | 0.07      |
| 3.0           | 0.19      | 0.16      | 0.13      | 0.11      | 0.09      | 0.07      |
| 3.2           | 0.19      | 0.17      | 0.13      | 0.11      | 0.09      | 0.07      |
| 3.4           | 0.19      | 0.17      | 0.14      | 0.11      | 0.09      | 0.07      |
| 3.6           | 0.20      | 0.17      | 0.14      | 0.11      | 0.09      | 0.07      |
| 3.8           | 0.20      | 0.17      | 0.14      | 0.11      | 0.09      | 0.07      |
| 4.0           | 0.23      | 0.20      | 0.17      | 0.13      | 0.11      | 0.09      |
| 4.2           | 0.23      | 0.21      | 0.17      | 0.14      | 0.11      | 0.09      |
| 4.4           | 0.24      | 0.21      | 0.17      | 0.14      | 0.11      | 0.09      |
| 4.6           | 0.24      | 0.22      | 0.18      | 0.14      | 0.12      | 0.09      |
| 4.8           | 0.25      | 0.22      | 0.18      | 0.15      | 0.12      | 0.10      |
| 5.0           | 0.25      | 0.22      | 0.18      | 0.15      | 0.12      | 0.10      |
| 5.2           | 0.25      | 0.23      | 0.18      | 0.15      | 0.12      | 0.10      |
| 5.4           | 0.26      | 0.23      | 0.19      | 0.15      | 0.12      | 0.10      |
| 5.6           | 0.26      | 0.23      | 0.19      | 0.15      | 0.13      | 0.10      |
| 5.8           | 0.26      | 0.24      | 0.19      | 0.16      | 0.13      | 0.10      |
| 6.0           | 0.68      | 0.64      | 0.52      | 0.42      | 0.35      | 0.28      |
| 6.2           | 0.68      | 0.64      | 0.53      | 0.43      | 0.35      | 0.29      |
| 6.4           | 0.69      | 0.65      | 0.53      | 0.43      | 0.35      | 0.29      |
| 6.6           | 0.70      | 0.65      | 0.54      | 0.44      | 0.36      | 0.29      |
| 6.8           | 0.70      | 0.66      | 0.54      | 0.44      | 0.36      | 0.30      |
| 7.0           | 0.71      | 0.66      | 0.54      | 0.45      | 0.37      | 0.30      |
| 7.2           | 0.71      | 0.67      | 0.55      | 0.45      | 0.37      | 0.30      |
| 7.4           | 0.72      | 0.68      | 0.56      | 0.46      | 0.38      | 0.31      |
| 7.6           | 0.73      | 0.68      | 0.56      | 0.46      | 0.38      | 0.31      |
| 7.8           | 0.74      | 0.69      | 0.57      | 0.47      | 0.39      | 0.32      |
| 8.0           | 0.75      | 0.70      | 0.58      | 0.48      | 0.39      | 0.32      |
| 8.2           | 1.45      | 1.50      | 1.24      | 1.02      | 0.84      | 0.69      |
| 8.4           | 1.45      | 1.49      | 1.23      | 1.02      | 0.84      | 0.69      |
| 8.6           | 1.45      | 1.49      | 1.23      | 1.02      | 0.84      | 0.70      |
| 8.8           | 1.45      | 1.49      | 1.24      | 1.02      | 0.85      | 0.70      |
| 9.0           | 1.46      | 1.49      | 1.24      | 1.03      | 0.85      | 0.70      |
| 9.2           | 1.46      | 1.50      | 1.24      | 1.03      | 0.85      | 0.71      |
| 9.4           | 1.47      | 1.50      | 1.25      | 1.04      | 0.86      | 0.71      |
| 9.6           | 1.48      | 1.51      | 1.25      | 1.04      | 0.87      | 0.72      |
| 9.8           | 1.49      | 1.52      | 1.26      | 1.05      | 0.87      | 0.73      |
| 10.0          | 1.50      | 1.53      | 1.27      | 1.06      | 0.88      | 0.73      |



Untuk mempermudah melihat factor keamanan liquefaksi, dibuat grafik yang dapat dilihat dibawah:



Gambar 2. Faktor Kedalaman Vs Kedalaman

Dapat dilihat pada kedalaman 0.0 m – 8.0 m gempa dengan semua magnitudo tinjauan dapat memicu liquefaksi, dan hanya pada magnitudo M=5.0; M=5.5; M=6.0; dan M=6.5 pada kedalaman 8.2 m – 10 m yang memiliki factor keamanan diatas 1, sehingga dapat dikatakan aman terhadap liquefaksi.

**Jarak Maksimum Pusat Gempa (R<sub>max</sub>)**

Untuk melihat jarak maksimum (R<sub>max</sub>) titik gempa berskala tertentu terhadap titik lokasi penelitian untuk dapat terjadi liquefaksi, digunakan persamaan oleh Kuribayashi dan Tatsuoka (1975):

$$\log R_e = 0.77M - 3.60 \quad (16)$$

Tabel 9. *Maximum Epicentral Distance*

| Magnitudo | Maximum Epicentral Distance (km) |
|-----------|----------------------------------|
| 5         | 2                                |
| 5.5       | 4                                |
| 6         | 10                               |
| 6.5       | 25                               |
| 7         | 62                               |

Dari hasil perhitungan R<sub>max</sub> dapat dilihat jarak maksimum titik penelitian terhadap pusat gempa untuk dapat terjadi liquefaksi. Pada titik penelitian, pusat gempa tidak ada yang pernah masuk didalam radius maksimum yang telah dihitung, hanya ada 1 gempa yang masuk pada radius itu pada tahun 1939 dimana terjadi gempa sebesar 7.7SR didalam range maksimum gempa yaitu 150 km untuk skala M=7.5.

**KESIMPULAN**

Klasifikasi tanah di daerah riset berdasarkan sistem klasifikasi USCS adalah tanah berpasir dan memiliki kedalaman air tanah 0,5 m. Potensi liquefaksi daerah endapan Danau Tondano tepatnya di Desa Paslaten, Kecamatan Kakas, Kabupaten Minahasa adalah tinggi, dihitung berdasarkan hasil dari nilai FS dari tiap magnitudo dan kedalaman yang nilainya berada dibawah 1. Hasil faktor keamanan dapat dilihat pada gambar 2. Dimana kondisi tanah yang dinyatakan aman hanya pada kedalaman 8.2 – 10 m terhadap gempa magnitudo M=5.0; M=5,5; M=6.0; dan M=6.5. hal ini dikarenakan kecilnya nilai tahanan tanah (N-SPT) pada kedalaman 0-8 m. Juga, potensi liquefaksi diperkirakan hanya akan terjadi jika terjadi gempa pada jarak sejauh R<sub>max</sub> dari titik lokasi (Tabel 9).

Potensi liquefaksi di daerah endapan Danau Tondano adalah besar, hal ini memberi nilai yang kontradiktif dengan Atlas Zona Liquefaksi (Kementrian Energi dan Sumber Daya Mineral, 2019) yang mengkategorikan Desa Paslaten, Kecamatan Kakas sebagai zona rendah potensi liquefaksi jika dilihat dari sisi geologisnya.

**DAFTAR PUSTAKA**

Andrus, R. D. (1991). Liquefaction of gravelly soil at Pence Ranch during the 1983 Borah Peak, Idaho earthquake. Soil Dynamics and Earthquake Engineering V. Comp. Mech. Publication, 251-262.

Boulanger, R. W. (2003). High overburden stress effects in liquefaction analyses. Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 129(12), 1071-1082.



- Boulanger, R. W., & Idriss, I. M. (2004). Evaluating the potential for liquefaction or cyclic failure of silts and clays (p. 131). Davis, CA: Center for Geotechnical Modeling.
- Boulanger, R. W., Arulnathan, R., Harder Jr, L. F., Torres, R. A., & Driller, M. W. (1998). Dynamic properties of Sherman Island peat. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124(1), 12-20.
- Cetin, K. O., Seed, R. B., Der Kiureghian, A., Tokimatsu, K., Harder Jr, L. F., Kayen, R. E., & Moss, R. E. (2004). Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, 130(12), 1314-1340.
- Dam, R. A., Fluin, J., Suparan, P., & van der Kaars, S. (2001). Palaeoenvironmental developments in the Lake Tondano area (N. Sulawesi, Indonesia) since 33,000 yr BP. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 171(3-4), 147-183.
- Das, B. M., & Sivakugan, N. (2016). *Fundamentals of geotechnical engineering*. Cengage Learning.
- Das, B. M., & Sobhan, K. (2001) *Principles of geotechnical engineering*. Cengage learning.
- Green, R. A., & Bommer, J. J. (2019). What is the smallest earthquake magnitude that needs to be considered in assessing liquefaction hazard?. *Earthquake spectra*, 35(3), 1441-1464.
- Hynes, M. E., Olsen, R. S., & Yule, D. E. (1998). The influence of confining stress on liquefaction resistance. *NIST SPECIAL PUBLICATION SP*, 167-184.
- Idriss, I. M. (1999). An update to the Seed-Idriss simplified procedure for evaluating liquefaction potential. *Proc., TRB Workshop on New Approaches to Liquefaction*, Publ. n. FHWA-RD-99-165, Federal Highway Administration.
- Ishihara, K. (1985). Stability of natural deposits during earthquakes. In *International conference on soil mechanics and foundation engineering*. 11 (pp. 321-376).
- Kishida, H. (1969). Characteristics of liquefied sands during Mino-Owari, Tohankai and Fukui earthquakes. *Soils and Foundations*, 9(1), 75-92.
- Kuribayashi, E., & Tatsuoka, F. (1975). Brief review of liquefaction during earthquakes in Japan. *Soils and Foundations*, 15(4), 81-92.
- Mogi, K. (1963). Some discussions on aftershocks, foreshocks and earthquake swarms: the fracture of a semi-infinite body caused by an inner stress origin and its relation to the earthquake phenomena (third paper). *東京大學地震研究所彙報= Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 41(3), 615-658.
- Robertson, P. K., & Wride, C. E. (1998). Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test. *Canadian geotechnical journal*, 35(3), 442-459.
- Seed, B. (1979). Soil liquefaction and cyclic mobility evaluation for level ground during earthquakes. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 105(ASCE 14380).
- Seed, H. B. (1968). Landslides during earthquakes due to soil liquefaction. *J. Geotech. Engrg. Div.*, 94(5), 1055-1122.
- Seed, H. B. (1975). Representation of irregular stress time histories by equivalent uniform stress series in liquefaction analyses. *National Technical Information Service*.
- Seed, H. B., Idriss, I. M., & Arango, I. (1983). Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *Journal of Geotechnical Engineering*, 109(3), 458-482.
- Seed, R. B., Cetin, K. O., Moss, R. E., Kammerer, A. M., Wu, J., Pestana, J. M., ... & Faris, A. (2003). Recent advances in soil liquefaction engineering: a unified and consistent framework. In *Proceedings of the 26th Annual ASCE Los Angeles Geotechnical Spring Seminar: Long Beach, CA*.
- Sherif, M. A., Tsuchiya, C., & Ishibashi, I. (1977). Saturation effects on initial soil liquefaction. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 103(8), 914-917.
- Tsuchida, H. (1970). Prediction and countermeasure against the liquefaction in sand deposits. In *Abstract of the seminar in the Port and Harbor Research Institute* (pp. 31-333).

- Verma, M., Singh, R. J., & Bansal, B. K. (2014). Soft sediments and damage pattern: a few case studies from large Indian earthquakes vis-a-vis seismic risk evaluation. *Natural hazards*, 74(3), 1829-1851.
- Youd, T. L., & Hoose, S. N. (1977, January). Liquefaction susceptibility and geologic setting. In *Proc., 6th World Conf. on Earthquake Engineering* (Vol. 6, pp. 37-42). Roorkee, India: Indian Society of Earthquake Technology.