

ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI DI PT. PLN (PERSERO) UIP KIT SULMAPA PLTU 2 SULAWESI UTARA 2 X 25 MW POWER PLAN

Christian Vicky Delfis Lonteng

S. Balamba, S. Monintja, A. N. Sarajar

Fakultas Teknik, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Sam Ratulangi Manado

email: chris_viq@rocketmail.com

ABSTRAK

Salah satu dampak yang disebabkan oleh gempa bumi adalah hilangnya kekuatan lapisan tanah akibat getaran yang disebut dengan likuifaksi. Peristiwa likuifaksi akibat gempa bumi dapat menyebabkan kerusakan berat dan kegagalan infrastruktur. Dalam hal ini, PT. PLN (PERSERO) UIP KIT SULMAPA PLTU 2 SULAWESI UTARA 2 X 25 MW POWER PLAN menjadi lokasi evaluasi potensi likuifaksi, dengan menggunakan data Standard Penetration Test (SPT) dan Cone Penetration Test (CPT).

Analisis potensi likuifaksi ini bertujuan untuk mengetahui nilai faktor keamanan (FS) dengan membandingkan nilai Cyclic Resistance Ratio (CRR) yang merupakan tahanan tanah terhadap terjadinya likuifaksi dan Cyclic Stress Ratio (CSR) yang merupakan tegangan geser yang ditimbulkan oleh gempa. Peristiwa likuifaksi akan terjadi untuk angka keamanan (FS) lebih kecil dari satu.

Hasil perhitungan nilai CSR adalah sama untuk kedua metode tersebut, dikarenakan lokasi titik pengujian yang ditinjau jaraknya berdekatan. Sedangkan nilai CRR untuk metode CPT umumnya memiliki nilai yang lebih besar dari metode SPT. Nilai CRR yang berbeda menghasilkan nilai FS yang berbeda untuk data SPT dan CPT. Nilai FS yang didapat dari empat titik uji data SPT dan CPT lebih besar dari satu. Artinya tanah tidak berpotensi untuk terjadi likuifaksi. Nilai CRR dan FS dari setiap pengujian menurun, dengan meningkatnya magnitude gempa. Menurunnya Fines Content menyebabkan nilai CRR dan FS dari setiap pengujian akan menurun.

Kata Kunci: gempa bumi, likuifaksi, cyclic stress ratio (CSR), cyclic resistance ratio (CRR), factor of safety (FS)

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Bencana alam merupakan salah satu musibah yang tidak kita harapkan kedatangannya, karena kerugian dan kerusakan yang ditimbulkan sangat besar. Salah satu bencana alam yang mungkin terjadi adalah gempa bumi. Biasanya gempa bumi diperhitungkan hanya pada struktur bagian atas saja. Namun pada kenyataannya gempa juga dapat menyebabkan suatu kegagalan akibat hilangnya kestabilan tanah (kegagalan struktur bagian bawah).

Kegagalan struktur akibat hilangnya kestabilan tanah pada saat gempa biasanya terjadi pada tanah pasir yang bersifat jenuh dan memiliki gradasi yang seragam. Peristiwa ini biasanya dikenal dengan kegagalan akibat tanah pasir yang mencair saat terjadi gempa atau disebut likuifaksi.

Data-data yang dibutuhkan dalam perhitungan potensi likuifaksi ini adalah data pengujian SPT berupa N-SPT dan pengujian CPT berupa tahanan ujung (q_c) dan Friction ratio (f_s).

Rumusan Masalah

Berdasarkan uraian di atas, perlu dilakukan analisis potensi Likuifaksi pada tanah di PT.PLN (PERSERO) UIP KIT SULMAPA PLTU 2 SULAWESI UTARA 2 X 25 MW POWER PLAN sehingga mencegah kerusakan struktur diatasnya, kematian, dan kerugian ekonomi yang besar.

Batasan Masalah

Untuk penelitian ini dibatasi masalah sebagai berikut :

- Pengambilan data tanah pada penelitian ini dilakukan di PT.PLN (PERSERO) UIP KIT SULMAPA PLTU 2 SULAWESI UTARA 2 X 25 MW POWER PLAN.

- Metode yang dipakai untuk mengetahui potensi likuifaksi menggunakan *Standard Penetration Test* (SPT) dan *Cone Penetration Test* (CPT).
- Data-data tanah yang dipakai dikhususkan pada tanah yang mengandung tanah pasir.
- Tidak memperhitungkan penurunan (*settlement*)
- Penyebab likuifaksi difokuskan akibat gempa.

Tujuan Penelitian

Adapun hal-hal yang akan diteliti yaitu mengenai:

1. Analisis perhitungan *Cyclic Stress Ratio* (CSR) dan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) dengan menggunakan data *Standard Penetration Test* (SPT) dan *Cone Penetration Test* (CPT).
2. Faktor Keamanan pada tanah berpasir akibat peristiwa likuifaksi dari interpretasi data *Standard Penetration Test* (SPT) dan *Cone Penetration Test* (CPT).
3. Membandingkan hasil analisis data yang diperoleh dari pengolahan data *Standard Penetration Test* (SPT) dan *Cone Penetration Test* (CPT) terhadap potensi likuifaksi.

Manfaat Penulisan

Dengan adanya penelitian ini dapat diperoleh manfaat antara lain :

- a. Manfaat teoritis, diharapkan penelitian ini dapat digunakan untuk perkembangan ilmu pengetahuan teknik sipil, khususnya dalam mengetahui potensi likuifaksi berdasarkan data lapangan menggunakan *Standard Penetration Test* (SPT) dan *Cone Penetration Test* (CPT).
- b. Manfaat praktis, sebagai tambahan informasi untuk praktisi maupun akademisi dalam mempelajari potensi likuifaksi.
- c. Mengetahui perbedaan metode analisis likuifaksi dari data *Standard Penetration Test* (SPT) dan *Cone Penetration Test* (CPT).

LANDASAN TEORI

Pengertian Likuifaksi

Seed et al (1975), menyatakan bahwa likuifaksi adalah proses perubahan kondisi tanah pasir yang jenuh air menjadi cair akibat meningkatnya tekanan air pori yang harganya

menjadi sama dengan tekanan total oleh sebab terjadinya beban dinamik, sehingga tegangan efektif tanah menjadi nol. Likuifaksi adalah fenomena dimana tanah kehilangan banyak kekuatan (*strength*) dan kekakuannya (*stiffness*) untuk waktu yang singkat namun meskipun demikian likuifaksi menjadi penyebab dari banyaknya kerusakan, kematian, dan kerugian ekonomi yang besar.

Faktor-faktor yang Mempengaruhi Terjadinya Likuifaksi (Widodo, 2012)

- Karakteristik Getaran
- Jenis Tanah
- Muka air tanah
- Distribusi diameter butir
- Kepadatan awal (*Initial Relative Density*)
- Drainase dan Dimensi Deposit
- Kemampuan Drainase

Dampak dari terjadinya Likuifaksi

Gempa yang terjadi di Alaska, tahun 1964 berkekuatan 8,3 skala *ritchter*. Kerusakan yang terjadi adalah jembatan yang berada sekitar 80 km sampai dengan 120 km dari pusat gempa berupa bergesernya pilar dan pangkal jembatan.

Gempa yang terjadi di Niigata, Jepang pada tahun 1964 berkekuatan 7,3 skala *ritchter* dengan pusat gempa sekitar 56 kilo meter dari kota Niigata, percepatan gempa maksimum 0,16 percepatan gravitasi. Gempa tersebut menyebabkan terjadinya pencairan tanah pasir pada area yang cukup luas serta menggulingkan gedung-gedung yang berdiri dikota tersebut. (Oshaki,1966; Seed dan Idriss,1982).

Analisis Likuifaksi

Metode yang digunakan lewat analisis ini adalah metode yang disepakati oleh workshop mengenai CRR oleh NCEER pada tahun 1996 dan tahun 1998, yang dimuat dalam *Journal Of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, volume 127, Nomor 10, Oktober 2001 halaman 817-833. Workshop tersebut diketuai oleh Youd, T. L. dan Idriss, I. M. Workshop tersebut pada dasarnya mengembangkan *simplified procedure* yang diusulkan oleh Seed dan Idriss, 1971, difokuskan pada analisis ketahanan tanah terhadap bahaya likuifaksi (CRR). (Idriss dan Boulanger, 2008).

Dalam suatu analisis potensi likuifaksi dibutuhkan suatu nilai pegangan untuk mengetahui apakah likuifaksi terjadi atau tidak. Nilai pegangan ini disebut faktor keamanan.

Dalam analisis faktor keamanan dibutuhkan nilai-nilai yang harus dievaluasi terlebih dahulu. Adapun nilai tersebut ialah nilai Cyclic Stress Ratio (CSR) dan Cyclic Resistance Ratio (CRR) yang diekspresikan dalam bentuk persamaan sebagai berikut (Youd dan Idriss, 2001):

$$FS = \frac{CRR_{7,5}}{CSR} \cdot MSF \quad (1)$$

Jika $FS = \frac{CRR_{7,5}}{CSR} \cdot MSF < 1$ (terjadi Likuifaksi)

Jika $FS = \frac{CRR_{7,5}}{CSR} \cdot MSF = 1$ (kondisi kristis)

Jika $FS = \frac{CRR_{7,5}}{CSR} \cdot MSF > 1$ (tidak terjadi likuifaksi)

Perhitungan Nilai Cyclic Stress Ratio (CSR)

Perhitungan nilai CSR menggunakan teori beberapa ahli dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Seed dan Idriss, 1971):

$$CSR = 0,65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) \cdot r_d \quad (2)$$

Dimana :

a_{max} = Percepatan tanah maximum akibat gempa

g = Percepatan gravitasi

σ_{vo} = tegangan total vertical overburden

σ'_{vo} = tegangan efektif vertical overburden

r_d = koefisien tegangan reduksi

Rasio tegangan total dengan tegangan efektif dihitung dengan persamaan-persamaan yang ada di teori mekanika tanah (Das, 1993).

Dimana tegangan total:

$$\sigma = H\gamma_w + (H_A - H) \gamma_{sat} \quad (3)$$

dengan:

σ = tegangan total

γ_w = berat volume air (9,81 kN/m³)

γ_{sat} = berat volume tanah jenuh air

H = tinggi muka air diukur dari permukaan tanah

H_A = jarak antara titik A dan muka air

Tegangan efektif tanah dihitung dengan:

$$\sigma' = \sigma - u \quad (4)$$

dengan u adalah tekanan pori air tanah,yang dihitung dengan persamaan:

$$u = H_A \cdot \gamma_w \quad (5)$$

dengan H_A adalah jarak titik yang ditinjau dengan muka air.

Koefisien tegangan reduksi (r_d) dapat ditentukan berdasarkan persamaan (Liao dan Whitemann, 1986) sebagai berikut:

$$r_d = 1,00 - 0,00765z \dots z \leq 9,15m \quad (6a)$$

$$r_d = 1,174 - 0,0267z \dots 9,15 \leq z \leq 23m \quad (6b)$$

$$r_d = 0,744 - 0,008z \dots 23 \leq z \leq 30m \quad (6c)$$

$$r_d = 0,5z \quad z \geq 23m \quad (6d)$$

dimana :

z = kedalaman tanah (m) yang ditinjau.

Harga a_{max} didapat dari tabel berikut.

Tabel 1 Percepatan Puncak Batuan Dasar dan Percepatan Puncak Muka Tanah untuk masing-masing Wilayah Gempa Indonesia

| Wilayah Gempa | Percepatan Maksimum Batuan Dasar (g) | Percepatan Puncak Muka Tanah (g) | | | |
|---------------|--------------------------------------|----------------------------------|--------------|-------------|--|
| | | Tanah Keras | Tanah Sedang | Tanah Lunak | Tanah Khusus |
| 1 | 0.03 | 0.04 | 0.05 | 0.08 | Diperlukan Evaluasi khusus disetiap lokasi |
| 2 | 0.10 | 0.12 | 0.15 | 0.20 | |
| 3 | 0.15 | 0.18 | 0.23 | 0.30 | |
| 4 | 0.20 | 0.24 | 0.28 | 0.34 | |
| 5 | 0.25 | 0.28 | 0.32 | 0.36 | |
| 6 | 0.30 | 0.33 | 0.36 | 0.38 | |

(Sumber: SNI 03-1726-2002)

Perhitungan Nilai Cyclic Resistance Ratio (CRR)

Adapun cara menganalisis nilai Cyclic Resistance Ratio (CRR) dari Standard Penetration Test (SPT) dan Cone Penetration Test (CPT) sebagai berikut (Youd dan Idriss, 2001):

SPT (Standard Penetration Test)

Menentukan nilai (N₁)₆₀.

Youd dan Idriss (2001) dan Cetin dll (2004) memberikan koreksi-koreksi untuk memperoleh nilai (N₁)₆₀:

$$(N_1)_{60} = N_m C_N C_E C_B C_R C_S \quad (7)$$

Dimana:

N_m = N-SPT yang diperoleh dari test lapangan.

C_N = faktor normalisasi N_m terhadap tegangan overburden pada umumnya.

C_E = koreksi rasio energy hammer (ER)

C_B = koreksi untuk diameter lubang bor

C_R = faktor koreksi dari panjang batang

C_S = koreksi untuk sampel

Karena adanya peningkatan nilai N-SPT dengan meningkatnya tegangan overburden efektif, faktor koreksi tegangan overburden harus digunakan (Seed dan Idriss, 1982). Faktor ini umumnya dihitung dari persamaan berikut (Seed dan Idriss, 1982) :

$$C_N = 2,2 / \left(1,2 + \frac{\sigma'_{vo}}{p_a} \right) \quad (8)$$

Dimana nilai C_N tidak boleh melebihi dari 1,7.

Yang lainnya ialah faktor koreksi (normalisasi) nilai *Standard Penetration Test* (SPT) yang dapat ditentukan melalui tabel berikut:

Tabel 2 Nilai faktor koreksi untuk nilai $(N_1)_{60}$

| Tabel 1 Koreksi-koreksi yang digunakan dalam uji SPT (Youd, T.L. & Idriss, I.M., 2001) | | | |
|--|---|-----------|-----------------------------------|
| Faktor | Jenis Alat | Parameter | Koreksi |
| Tegangan vertikal efektif | | C_N | $2,2 / (1,2 + (\sigma'_{vo}/Pa))$ |
| Tegangan vertikal efektif | | C_N | $C_N \leq 1,7$ |
| Rasio tenaga | Palu donat (<i>Donut hammer</i>) | C_E | 0,5 s.d 1,0 |
| Rasio tenaga | Palu pengaman (<i>Safety hammer</i>) | C_E | 0,7 s.d 1,2 |
| Rasio tenaga | Palu otomatis (<i>Automatic-trip Donut-type hammer</i>) | C_E | 0,8 s.d 1,3 |
| Diameter bor | 65 s.d 115 mm | C_B | 1,0 |
| Diameter bor | 150 mm | C_B | 1,05 |
| Diameter bor | 200 mm | C_B | 1,15 |
| Panjang batang | < 3 m | C_R | 0,75 |
| Panjang batang | 3 s.d 4 m | C_R | 0,8 |
| Panjang batang | 4 s.d 6 m | C_R | 0,85 |
| Panjang batang | 6 s.d 10 m | C_R | 0,95 |
| Panjang batang | 10 s.d 30 m | C_R | 1,0 |
| Pengambilan contoh | tabung standar | C_S | 1,0 |
| Pengambilan contoh | tabung dengan pelapis (<i>liner</i>) | C_S | 1,1 s.d 1,3 |

Menentukan Nilai $(N_1)_{60cs}$

Menentukan Fines Content (FC) lalu hitung nilai $(N_1)_{60cs}$ yang dipengaruhi oleh nilai Fines Content itu sendiri (Youd dan Idriss, 2001):

$$(N_1)_{60cs} = \alpha + \beta \cdot (N_1)_{60} \tag{9}$$

Dimana nilai-nilai α dan β dipengaruhi oleh persentase *fines content* (FC):

$$\begin{aligned} \alpha = 0, \beta = 1, & \quad FC \leq 5\% \\ \alpha = \exp [1,76 - (190/FC^2)] & \quad 5\% < FC < 35\% \\ \beta = [0,99 - (FC^{1,5}/1000)] & \quad 5\% < FC < 35\% \\ \alpha = 5, \beta = 1,2 & \quad FC \geq 35\% \end{aligned}$$

Menentukan nilai CRR

Menentukan nilai CRR pada besaran skala gempa (M_w) 7.5 dan pasir murni dengan $(N_1)_{60cs} < 37,5$ (Youd, T. L. dan Idriss, 2001):

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

Jika $(N_1)_{60cs} > 37,5$ maka tanah tersebut tidak perlu dievaluasi karena nilai yang rentan akan likuifaksi ialah ketika $(N_1)_{60cs} < 37,5$. Jika $(N_1)_{60cs} > 37,5$ maka tanah tersebut kuat menahan beban seismic yang dapat diwakilkan dengan nilai $CRR_{7,5} = 2$.

Menghitung faktor keamanan (FS)

Menghitung faktor keamanan likuifaksi dengan menggunakan persamaan berikut:

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \tag{11}$$

CPT (*Cone Penetration Test*)

Untuk CPT (*Cone Penetration Test*), data yang dijadikan acuan yaitu tahanan ujung konus (q_c). Adapun berikut langkah-langkah untuk mendapatkan nilai CRR (*Cyclic Resistance Ratio*) dari data CPT (*Cone Penetration Test*):

Hitung nilai q_{cIN}

Hitung nilai q_{cIN} , yaitu nilai tahanan ujung terkoreksi yang akan diformulasikan sebagai persamaan berikut (Youd dan Idriss, 2001):

$$q_{cIN} = C_q (q_c / P_a) \tag{12}$$

dimana C_q ialah faktor normalisasi tahanan ujung konus. Dan P_a adalah tekanan pada 1 atm.

Menghitung Nilai I_c

Untuk menghitung nilai I_c menggunakan persamaan (Youd dan Idriss, 2001):

$$I_c = [3,47 - \log Q]^2 + (1,22 + \log F)^2]^{0,5} \tag{13}$$

Hitung nilai Q

Hitung nilai Q untuk tanah pasir murni (*clean-sand*) eksponen yang sesuai yaitu 0,5 (Youd dan Idriss, 2001):

$$Q = [(q_c - \sigma_{vo}) / P_a] [P_a / \sigma'_{vo}]^n, n=0,5 \tag{14}$$

Untuk *clean sand*, nilai eksponen $n=0,5$ lebih tepat dan nilai antara 0,5 dan 1 akan lebih tepat untuk *silt* dan *silty sand* dan untuk eksponen $n = 1$ merupakan nilai yang sesuai untuk tipe jenis lempung.

Hitung nilai F

Untuk menghitung nilai F menggunakan persamaan (Youd dan Idriss, 2001):

$$F = [f_s / (q_c - \sigma_{vo})] \times 100 \% \tag{15}$$

Menghitung nilai CRR

Menghitung nilai CRR (*Cyclic Resistance Ratio*) dengan persamaan sebagai berikut (Youd dan Idriss, 2001):

$$\begin{aligned} & \text{Jika nilai } (q_{cIN})_{cs} < 211 \\ CRR_{7,5} & = \exp [((q_{cIN})_{cs}/540) + ((q_{cIN})_{cs}/67)^2 - ((q_{cIN})_{cs}/80)^3 + ((q_{cIN})_{cs}/114)^4 - 3] \tag{16} \end{aligned}$$

Dan jika nilai $(q_{cIN})_{cs} > 211$, maka $CRR_{7,5} = 2$

Menghitung faktor keamanan (FS)

Menghitung faktor keamanan likuifaksi dengan menggunakan persamaan berikut:

$$FS = (CRR / CSR) \tag{17}$$

Seed dan Idriss mendapatkan nilai MSF untuk magnitudo lebih kecil dari 7.5 dan magnitudo lebih besar dari 7.5 yaitu sebagai berikut :

$$M_w < 7.5, MSF = 10^{2.24} / M_w^{2.56} \quad (18)$$

$$M_w > 7.5, MSF = (M_w / 7.5)^{-2.56} \quad (19)$$

Untuk menghitung CRR dengan besar magnitudo gempa selain 7.5 diperlukan faktor koreksi yang disebut magnitudo scale factor (MSF). Dalam hal ini persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut (Seed, 1983):

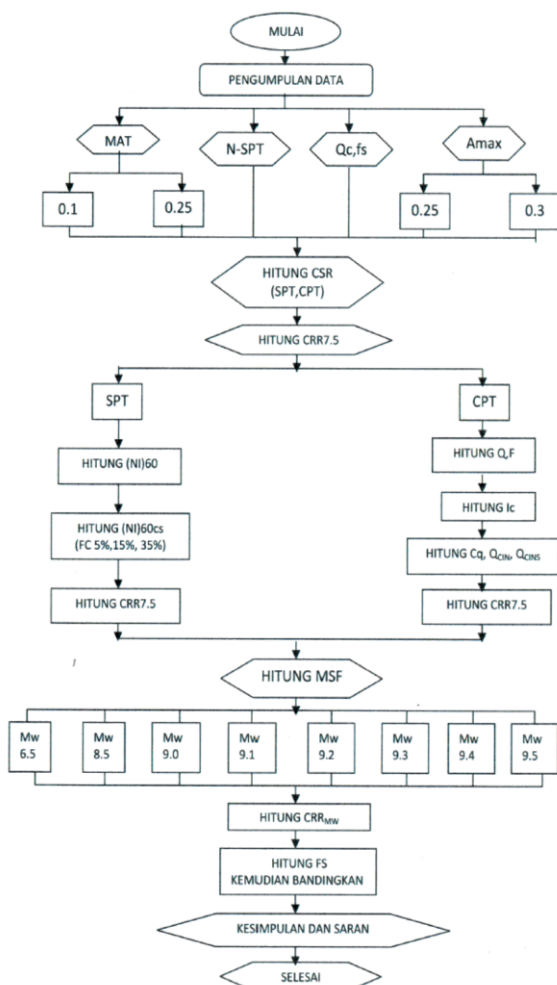
$$CRR_{M_w} = CRR_{7.5} * MSF * K_\sigma * K_\alpha \quad (20)$$

Untuk variabel K_σ dan K_α dalam perhitungan biasanya hanya dalam kasus khusus sehingga dalam kasus ini K_σ dan K_α bernilai 1.

METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi Penelitian

Langkah-langkah penelitian yang dilakukan diperlihatkan pada gambar dibawah ini:



Gambar 1. Bagan Alir Metode Penelitian

Pengumpulan Data

Data Teknis

Terbatas pada uji lapangan yang dilakukan yaitu melalui penyelidikan tanah dengan Standard Penetration Test (SPT) dan Cone Penetration Test (CPT) pada lokasi proyek di PT. PLN (PERSERO) UIP KIT SULMAPA PLTU 2 SULAWESI UTARA 2 X 25 MW POWER PLAN.

ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan Potensi Likuifaksi berdasarkan data SPT

Data:

- Kedalaman lapisan I (z) (BH-02): 1.15 m
- M. A. T : 0.55 m
- Berat Volume tanah Jenuh (γ_{sat}): 19.79836 kN/m²
- Berat Volume kering (γ_d) : 15.933 kN/m³
- Magnitude (M_w) : 7.5 SR
- a_{max} : 0.25 g
- Percepatan gravitasi (g) : 9.81 m/s²
- Berat volume air (γ_w) : 9.81 kN/m³

Perhitungan Tegangan Total

$$\sigma = h * \gamma = 20.6426 \text{ kN/m}^2$$

Perhitungan tekanan air pori

$$u = h_w * \gamma_w = 5.886 \text{ kN/m}^2$$

Perhitungan tegangan efektif

$$\sigma' = \sigma - u = 14.7566 \text{ kN/m}^2$$

Perhitungan reduksi tegangan (r_d)

$$r_d = 1 - (0.00765 * z) = 0.9912 \text{ m.}$$

Perhitungan Cyclic Stress ratio (CSR)

$$CSR = 0,65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) \cdot r_d = 0.02299$$

Data di titik BH-02 lapisan I:

N_{SPT} dilapangan = 8

Faktor Koreksi:

$$C_N = \left(\frac{2.2}{1.2 + \left(\frac{\sigma}{P_a} \right)} \right) = \left(\frac{2.2}{1.2 + \left(\frac{14.7566}{98.066} \right)} \right) = 1.629$$

$$C_E = 1$$

$$C_B = 1$$

$$C_R = 0.75$$

$$C_S = 1$$

Perhitungan $(N1)_{60}$:

$$(N1)_{60} = N_m C_N C_E C_B C_R C_S$$

$$= 9.7743$$

Perhitungan $(N1)_{60cs}$:

Diambil $F_c = 5\%$, $\alpha = 0$, $\beta = 1$

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

$$= 9.7743$$

$$CRR = \frac{1}{34 - (N1)_{60}} + \frac{(N1)_{60}}{135} + \frac{50}{[10 \cdot (N1)_{60} + 45]^2}$$

$$- \frac{1}{200} = 0.1111$$

$$FS = \frac{CRR}{CSR} = 4.8337$$

Untuk $M_w = 6.5$ SR

$$MSF < 7.5 = 10^{2.24} / M_w^{2.56}$$

$$= 1.441922$$

Perhitungan CRR_{MW}

$$CRR_{MW} = CRR_{7.5} * MSF_{6.5}$$

$$= 0.1602$$

Perhitungan FS

$$FS = \frac{CRR_{mw}}{CSR} = 6.9699$$

Untuk $M_w = 8.5$ SR

$$MSF > 7.5 = (M_w / 7.5)^{2.56}$$

$$= 0.725846$$

Perhitungan CRR_{MW}

$$CRR_{MW} = CRR_{7.5} * MSF_{8.5}$$

$$= 0.0807$$

Perhitungan FS

$$FS = \frac{CRR_{mw}}{CSR} = 3.5085$$

Perhitungan Potensi Likuifaksi berdasarkan data CPT (S-13)

Data:

- Kedalaman lapisan I (z) : 1.15 m
- M. A. T : 0.55 m
- Q_c : $38 \text{ kg/cm}^2 = 3726,508 \text{ kN/m}^2$
- f_s : $0.456 \text{ kg/cm}^2 = 44,718096 \text{ kN/m}^2$
- Berat Volume tanah Jenuh (γ_{sat}) : 19.79836 kN/m^2
- Magnitude (M_w) : 7.5 SR
- a_{max} : 0.25 g
- Percepatan gravitasi (g) : 9.81 m/s^2
- Berat volume kering (γ_d) : 15.93 kN/m^3
- Berat volume air (γ_w) : 9.81 kN/m^3

Perhitungan Tegangan Total

$$\sigma = h * \gamma$$

$$= 20.642618 \text{ kN/m}^2$$

Perhitungan tekanan air pori

$$u = h_w * \gamma_w$$

$$= 5.886 \text{ kN/m}^2$$

Perhitungan tegangan efektif

$$\sigma' = \sigma - u$$

$$= 14.756618 \text{ kN/m}^2$$

Perhitungan reduksi tegangan (r_d)

$$r_d = 1 - (0.00765 * z)$$

$$= 0.9912 \text{ m.}$$

Perhitungan Cyclic Stress ratio (CSR)

$$CSR = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) \cdot r_d$$

$$= 0.022992$$

Data titik S-13 lapisan I

$$q_c = 38 \text{ kg/cm}^2 = 3726,508 \text{ kN/m}^2$$

$$f_s = 0,456 \text{ kg/cm}^2 = 44,718096 \text{ kN/m}^2$$

$$P_a = 1 \text{ kg/cm}^2 = 98,066 \text{ kN/m}^2$$

Perhitungan nilai Q

$$Q = [(q_c - \sigma_{vo}) / P_a] [P_a / \sigma'_{vo}]^n, n = 0.5$$

$$= 97.418$$

Perhitungan nilai F

$$F = [f_s / (q_c - \sigma_{vo})] * 100\%$$

$$= 1,2067$$

Perhitungan nilai Ic

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

$$= 1,97195 < 2,6$$

Perhitungan nilai Cq

$$C_q = \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^n$$

$$= 2.577898$$

Perhitungan nilai q_{cIN}

$$q_{cIN} = C_q (q_c / P_a)$$

$$= 97.96014$$

Untuk $Ic > 1,64$ maka:

Perhitungan nilai Kc

$$Kc = -0.403 Ic^4 + 5.581 Ic^3 - 21.63 Ic^2$$

$$+ 33.75 Ic - 17.88$$

$$= 1,265031$$

Perhitungan nilai $(q_{cIN})_{cs}$

$$(q_{cIN})_{cs} = Kc * q_{cIN}$$

$$= 123.922665$$

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

Perhitungan nilai $CRR_{7.5}$:

$$CRR_{7.5} = 93 [(q_{cIN})_{cs} / 1000]^3 + 0.08$$

$$= 0,256984$$

Perhitungan nilai FS

$$FS = \frac{CRR_{7.5}}{CSR} = 11.17736$$

Untuk $M_w = 6.5$

$$MSF < 7.5 = 10^{2.24} / M_w^{2.56}$$

$$= 1.441922$$

Perhitungan CRR_{MW}
 $CRR_{MW} = CRR_{7.5} * MSF_{6.5}$
 $= 0.370552$

Perhitungan FS
 $FS = \frac{CRR_{mw}}{CSR} = 16.11688$

Untuk $M_w = 8.5$
 $MSF > 7.5 = (M_w / 7.5)^{2.56}$
 $= 0.725846$

Perhitungan CRR_{MW}
 $CRR_{MW} = CRR_{7.5} * MSF_{8.5}$
 $= 0.186531$

Perhitungan FS
 $FS = \frac{CRR_{mw}}{CSR} = 8.113041$

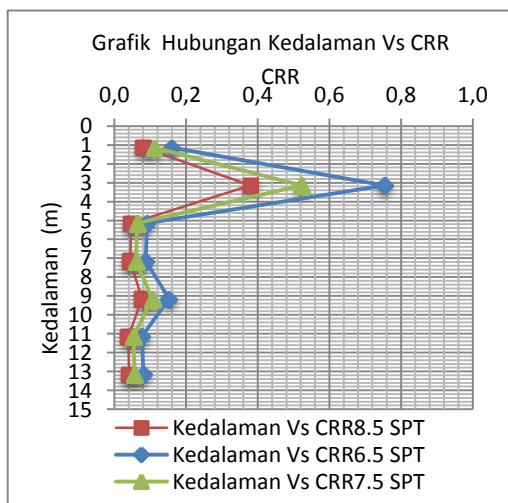
Analisis Perbandingan Hasil Pengolahan Data SPT dan CPT dalam bentuk grafik.

Berikut adalah tabel koordinat titik bor SPT dan CPT yang dianalisis.

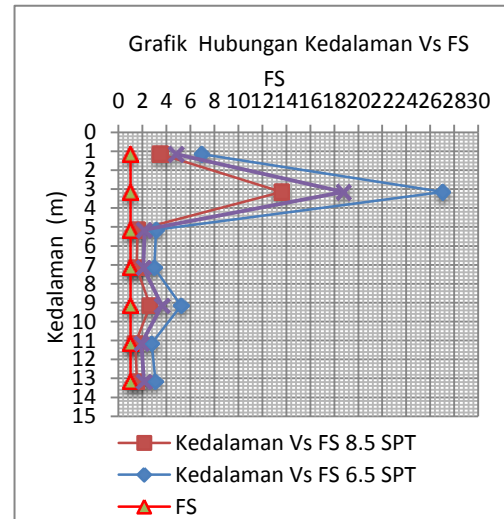
Tabel 3. Koordinat Titik Bor di PLTU 2 Sulawesi Utara

| Lokasi Titik Pengujian Yang Ditinjau | | |
|--------------------------------------|-------|------|
| No. | SPT | CPT |
| 1 | BH-02 | S-13 |
| 2 | BH-08 | S-08 |
| 3 | BH-09 | S-16 |
| 4 | BH-16 | S-11 |

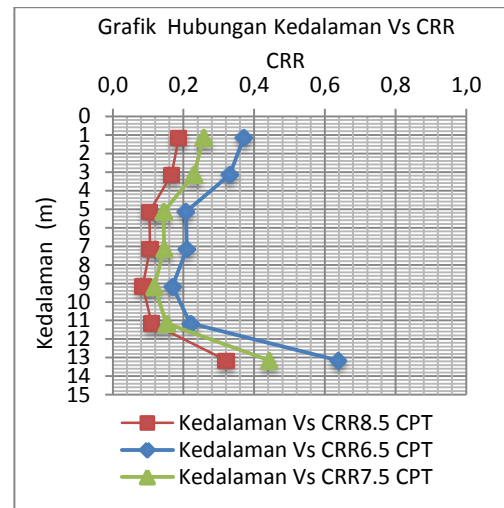
Titik BH-02 dan S-13, FC 5%, MAT 0.55, MW 6.5, 7.5, 8.5



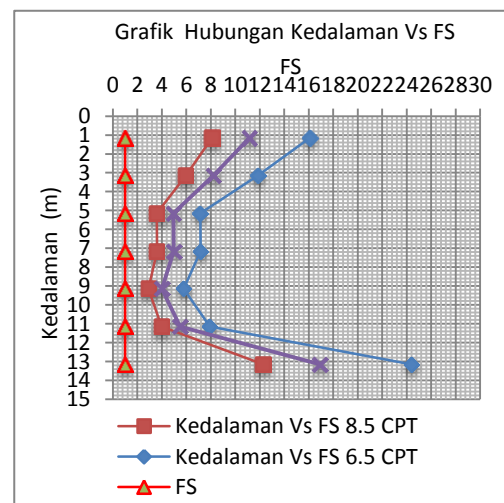
Gambar 2. Grafik Hubungan Kedalaman dan CRR Titik BH-02



Gambar 3. Grafik Hubungan Kedalaman dan FS di Titik BH-02

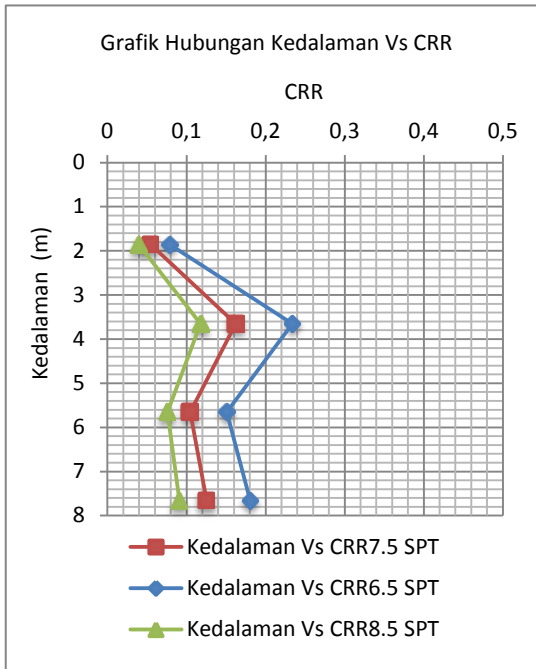


Gambar 4. Grafik Hubungan Kedalaman dan CRR di Titik S-13

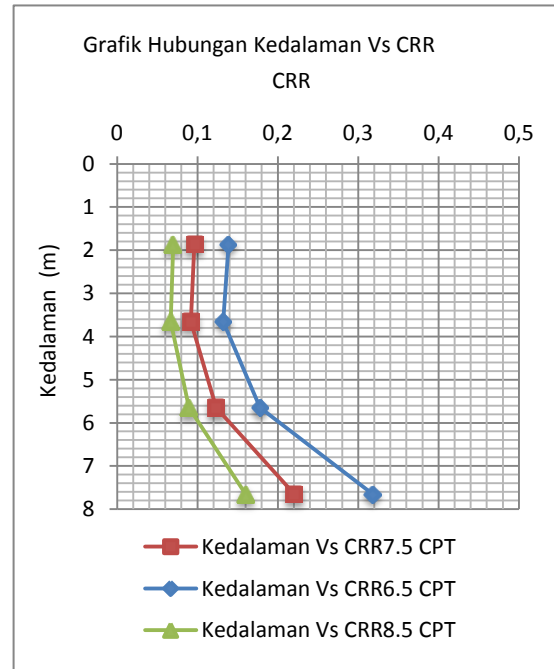


Gambar 5. Grafik Hubungan Kedalaman dan FS di Titik S-13

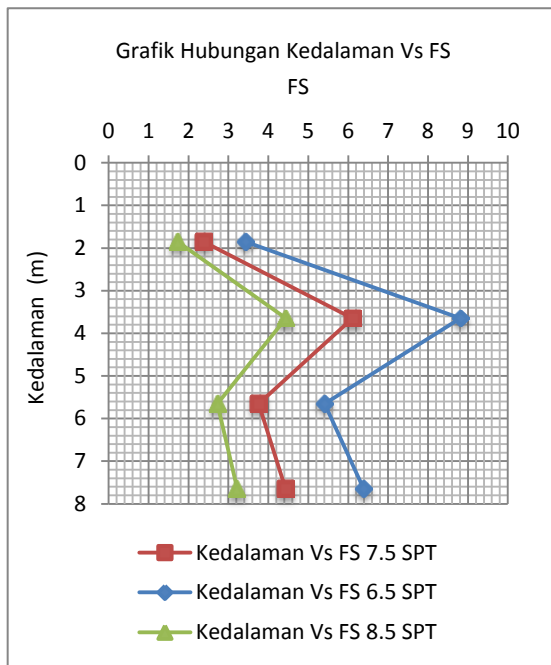
**Titik BH-08 dan S-08 ,FC 5%, MAT 0.55, MW 6.5,
7.5, 8.5**



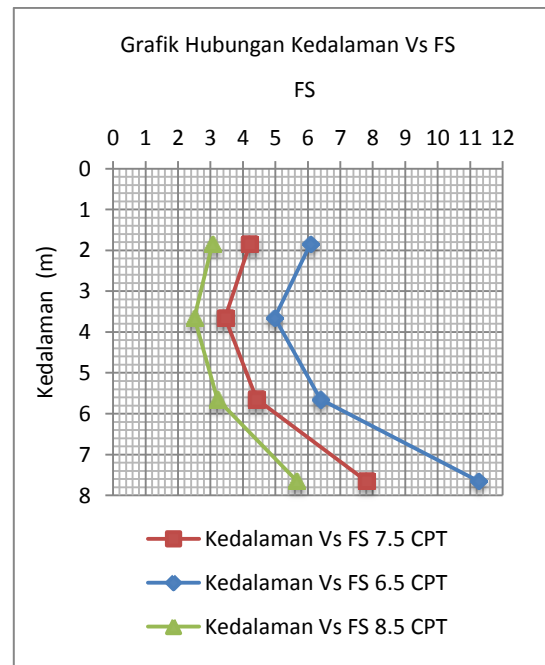
Gambar 6. Grafik Hubungan Kedalaman dan CRR di Titik BH-8



Gambar 8. Grafik Hubungan Kedalaman dan CRR di Titik S-08

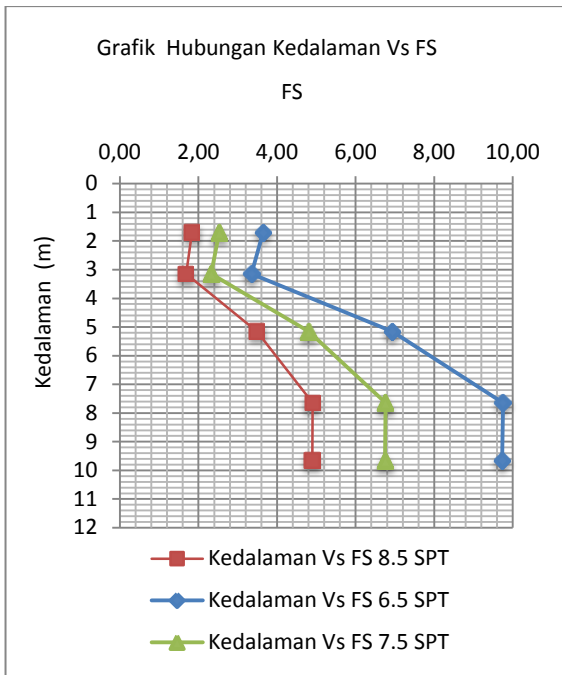


Gambar 7. Grafik Hubungan Kedalaman dan FS di Titik BH-8

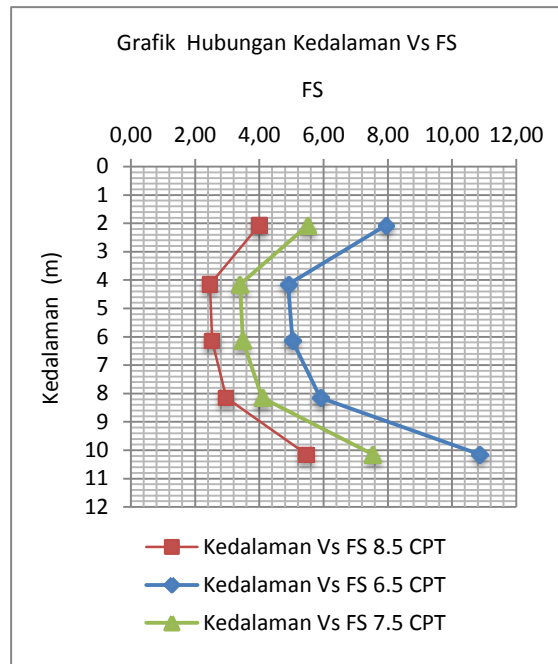


Gambar 9. Grafik Hubungan Kedalaman dan FS di Titik S-08

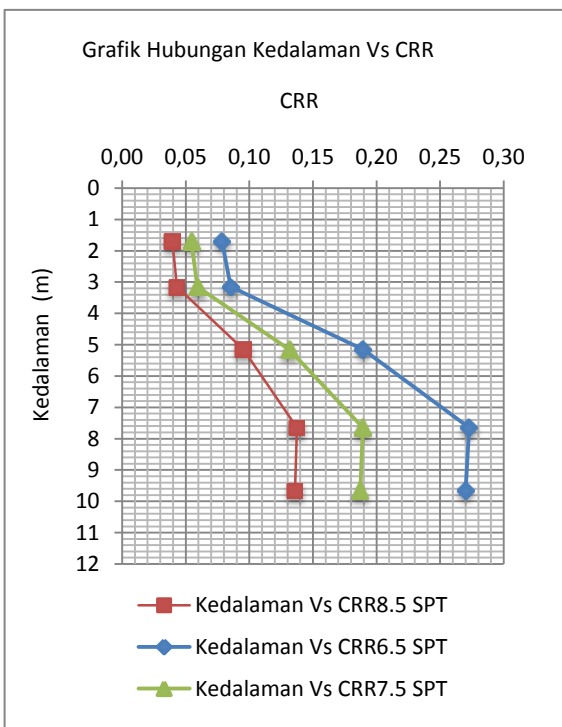
Titik BH-09 dan S-16, FC 5%, MAT 0.55, MW 6.5, 7.5, 8.5



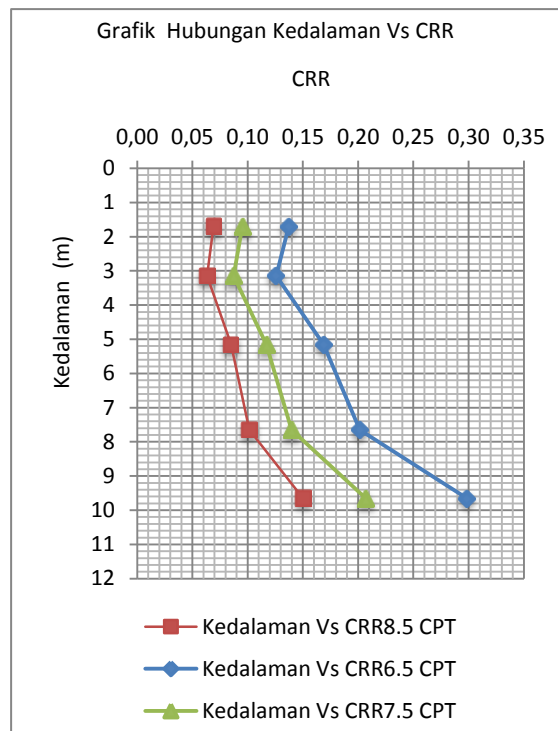
Gambar 10. Grafik Hubungan Kedalaman dan FS di Titik BH-09



Gambar 12. Grafik Hubungan Kedalaman dan FS di Titik S-16

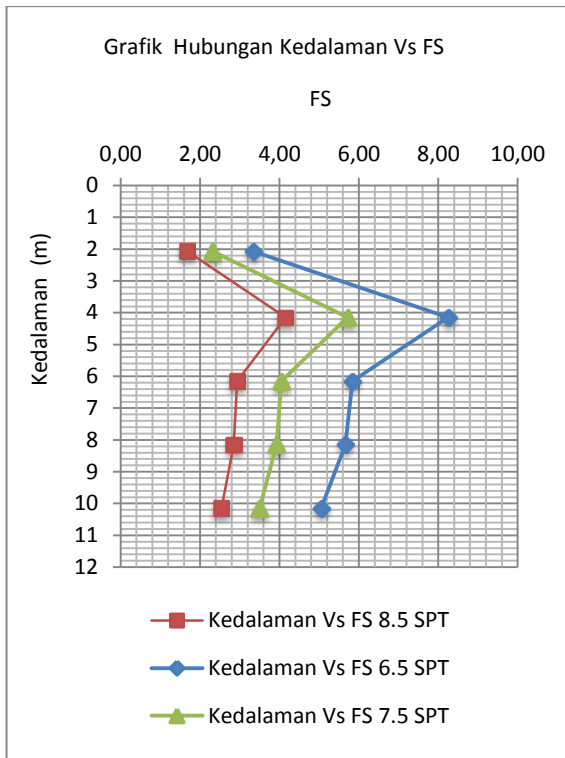


Gambar 11. Grafik Hubungan Kedalaman dan CRR di Titik BH-09

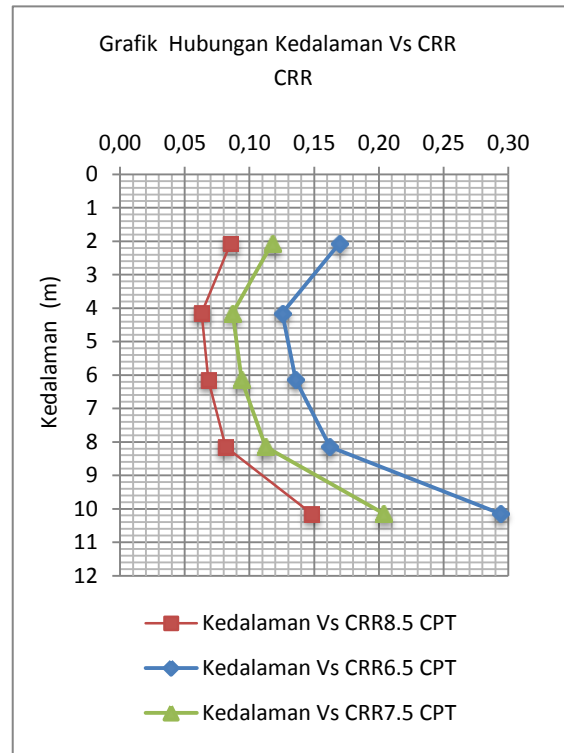


Gambar 13. Grafik Hubungan Kedalaman dan CRR di Titik S-16

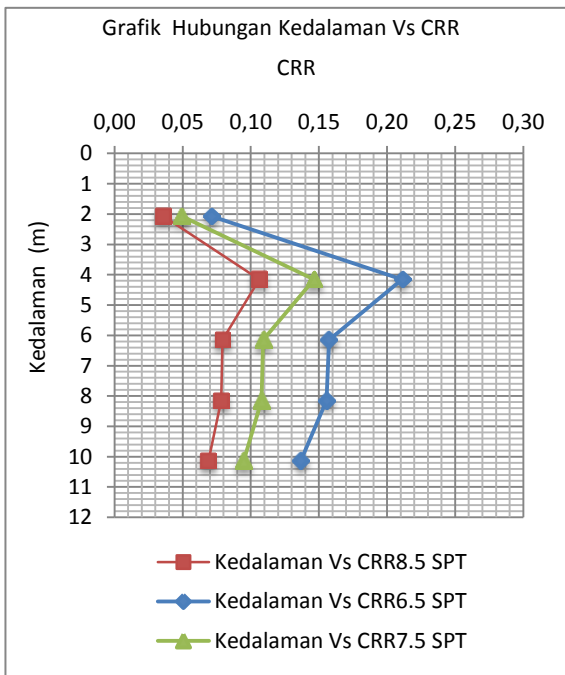
Titik BH-16 dan S-11, FC 5%, MAT 0.55, MW 6.5, 7.5, 8.5



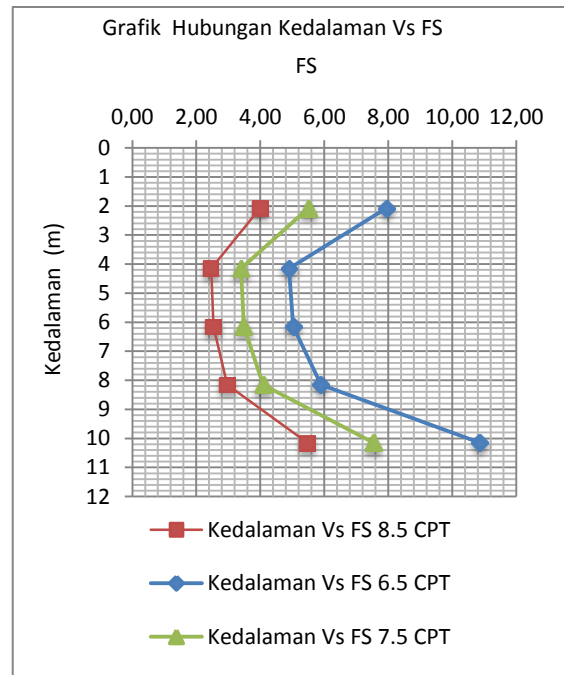
Gambar 14. Grafik Hubungan Kedalaman dan FS di Titik BH-16



Gambar 16. Grafik Hubungan Kedalaman dan FS di Titik S-11



Gambar 15. Grafik Hubungan Kedalaman dan CRR di Titik BH-16



Gambar 17. Grafik Hubungan Kedalaman dan CRR di Titik S-11

Dari keempat titik SPT dan CPT yang telah ditinjau dan telah ditampilkan grafiknya maka jika dilihat dari keempat titik SPT BH-02, BH-08, BH-09, BH-16 dan CPT S-13, S-08, S-16, S-11, diketahui bahwa untuk *Fines Content* 5%, 15%, dan 35% dengan besaran magnitudo gempa M_w 6.5, M_w 7.5, M_w 8.5 dengan percepatan gempa 0.25 g, tidak memiliki potensi likuifaksi. Ini dikarenakan nilai FS lebih besar dari satu.

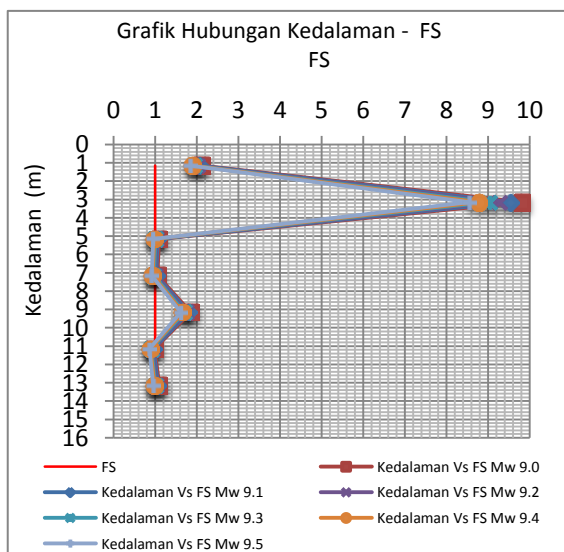
Dapat dilihat bahwa pengaruh magnitudo gempa (M_w) terhadap nilai FS adalah: semakin besar nilai magnitudo gempa, nilai FS akan semakin kecil atau mendekati satu bahkan kurang dari satu. Sebaliknya semakin kecil nilai magnitudo gempa, nilai FS akan semakin besar atau lebih dari satu.

Perbandingan Nilai Faktor Keamanan dengan variasi Muka air tanah, A_{max} , dan Magnitudo Gempa (M_w)

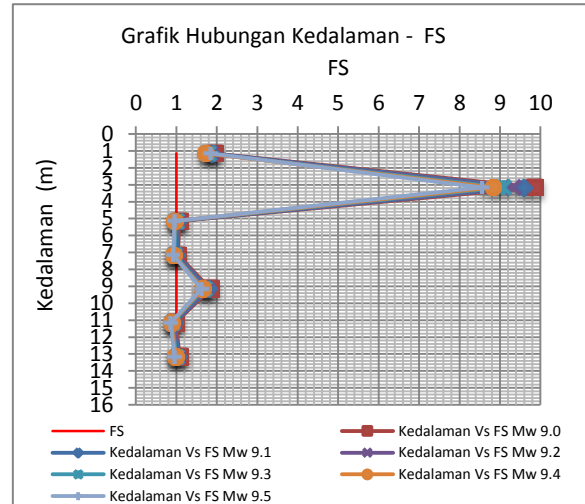
Dari hasil perhitungan sebelumnya variabel yang diubah-ubah untuk dapat melihat potensi likuifaksi adalah Magnitudo Gempa (M_w) 6.5, 7.5, dan 8.5. Sebagai perbandingan digunakan beberapa variabel yang diubah, antara lain faktor muka air tanah (MAT) 0.1, 0.25, A_{max} 0.30, dan magnitudo gempa (M_w) 9.0, 9.1, 9.2, 9.3, 9.4, 9.5. Step perhitungan yang digunakan adalah sama untuk perhitungan sebelumnya.

Berdasarkan perhitungan yang dilakukan dapat digambarkan suatu hubungan antara kedalaman dengan faktor keamanan, seperti pada grafik berikut :

1) SPT



Gambar 18. Grafik Hubungan kedalaman dan Nilai FS dengan nilai MAT = 0.25 m, A_{max} = 0.3, M_w = 9.0, 9.1, 9.2, 9.3, 9.4, 9.5 BH-02 (SPT)

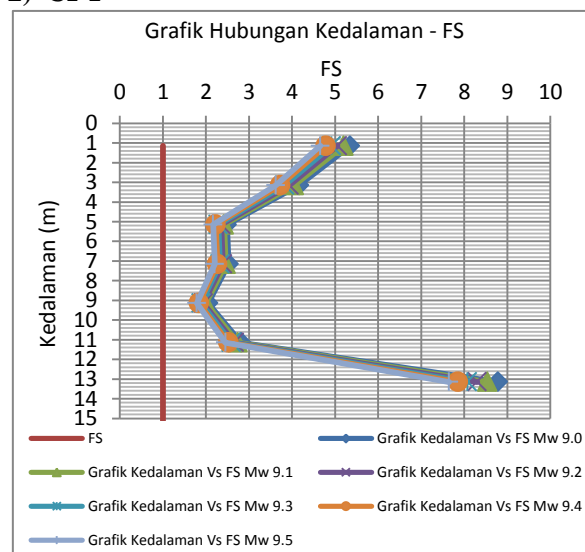


Gambar 19. Grafik Hubungan kedalaman dan Nilai FS dengan nilai MAT = 0.1 m, A_{max} = 0.3, M_w = 9.0, 9.1, 9.2, 9.3, 9.4, 9.5 BH-02 (SPT)

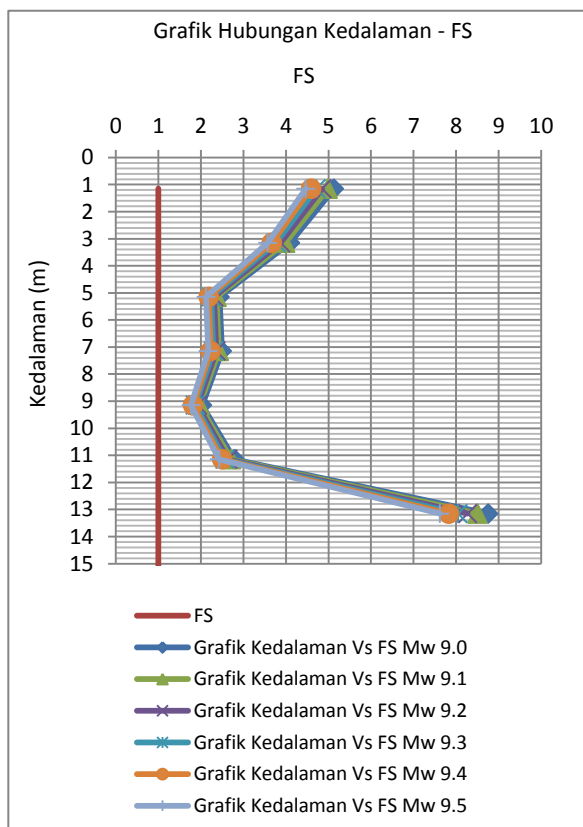
Berdasarkan grafik diatas dapat diuraikan perbandingan antara nilai muka air tanah (MAT), A_{max} , dan magnitudo gempa (M_w), yaitu sebagai berikut :

- Semakin kecil nilai faktor muka air tanah (MAT) atau semakin dangkal, maka nilai faktor keamanan akan semakin kecil.
- Semakin besar nilai A_{max} , maka nilai faktor keamanan akan semakin kecil.
- Semakin besar nilai magnitudo gempa (M_w), maka faktor keamanan akan semakin kecil.
- Untuk faktor keamanan ($fs < 1$) yang berpotensi likuifaksi berkisar pada kedalaman 5.15 m - 13.15 m.

2) CPT



Gambar 20. Grafik Hubungan kedalaman dan Nilai FS dengan nilai MAT = 0.25 m, A_{max} = 0.3, M_w = 9.0, 9.1, 9.2, 9.3, 9.4, 9.5 S-13 (CPT)



Gambar 21. Grafik Hubungan kedalaman dan Nilai FS dengan nilai MAT = 0.25 m, $A_{max} = 0.3$, $M_w = 9.0, 9.1, 9.2, 9.3, 9.4, 9.5$ S-13 (CPT)

Berdasarkan grafik diatas dapat diuraikan perbandingan antara nilai muka air tanah (MAT), A_{max} , dan magnitudo gempa (M_w), yaitu sebagai berikut :

- Semakin kecil nilai faktor muka air tanah (MAT) atau semakin dangkal, maka nilai faktor keamanan akan semakin kecil.
- Semakin besar nilai A_{max} , maka nilai faktor keamanan akan semakin kecil.
- Semakin besar nilai magnitudo gempa (M_w), maka faktor keamanan akan semakin kecil.
- Untuk faktor keamanan yang didapatkan tidak ada yang berpotensi likuifaksi.

PENUTUP

Kesimpulan

Dari empat titik uji SPT dan empat titik uji CPT yang telah dianalisis didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

- 1) Nilai CRR yang dihasilkan dari metode SPT dan CPT memiliki perbedaan dimana nilai CRR untuk metode CPT umumnya lebih besar dari nilai CRR untuk metode SPT.

- 2) Nilai CSR yang didapatkan dari kedua metode tersebut sama, dikarenakan titik pengujian yang dianalisis lokasinya berdekatan. Jadi untuk parameter perhitungan CSR adalah sama untuk kedua titik pengujian (SPT dan CPT).
- 3) Nilai CRR yang berbeda, secara langsung mempengaruhi nilai faktor keamanan (FS) yang berbeda untuk masing-masing data yaitu SPT dan CPT.
- 4) Faktor keamanan (FS) yang dihasilkan dari empat titik pengujian data SPT dan CPT lebih besar dari satu artinya tidak terjadi likuifaksi.
- 5) Nilai CRR dan Faktor keamanan (FS) dari setiap pengujian akan menurun, dengan meningkatnya magnitudo gempa. Begitu juga sebaliknya.
- 6) Nilai CRR dan faktor keamanan (FS) dari setiap pengujian akan menurun, dengan menurunnya *Fines Content* (FC) 35%, 15%, 5%. Begitu juga sebaliknya.
- 7) Semakin kecil nilai faktor muka air tanah (MAT) atau semakin dangkal, maka nilai faktor keamanan akan semakin kecil.
- 8) Semakin besar nilai A_{max} , maka nilai faktor keamanan akan semakin kecil.

Saran

- 1) Penentuan nilai CRR dan faktor keamanan dari kedua data yang berbeda dengan uji berbeda, perlu menjadi perhatian khusus ketika output yang dihasilkan memiliki perbedaan yang cukup signifikan. Dengan perbandingan ini diharapkan didapatkan sebuah keputusan yang tepat dalam melakukan asumsi desain pada konstruksi yang akan dibangun diatasnya dengan mengambil nilai faktor keamanan (FS) yang paling kritis.
- 2) Terjadinya likuifaksi tidak semata-mata dilihat dari nilai SPT atau nilai tahanan ujung (CPT), namun juga bergantung pada gradasi butiran pada tanah tersebut. Untuk itu perlu adanya pengujian lebih lanjut dengan uji gradasi butiran kemudian dikorelasikan dengan hasil perhitungan potensi likuifaksi dibeberapa titik pengujian.
- 3) Beberapa usaha perbaikan tanah yang dapat dilakukan untuk mencegah terjadinya likuifaksi adalah pemadatan lahan, pembuatan saluran drainase, dan perbaikan tanah dengan menggunakan kolom-batu (stone column).

DAFTAR PUSTAKA

- Das, Braja M., 1993. *Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis)*, Jilid I, Penerbit Erlangga, Jakarta.
- Idriss, I. M., Boulanger, R. W., 2008. *Soil Liquefaction During Earthquakes*. EERI
- Widodo, Pawirodikromo., 2012. *Seismologi Teknik dan Rekayasa Kegempaan.*, Penerbit Pustaka Pelajar, Yogyakarta.
- Youd, T. L., Idriss, I. M., dkk., 2001. *Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1.Geotechnical and Geoenvironmental Eng.*, ASCE 127(10), 817-33.