

STABILITAS TIANG PANCANG AKIBAT LIKUIFAKSI PADA PROYEK GEDUNG SANGGALA JAKARTA

Sinta Delia¹, Putera Agung Maha Agung²

^{1,2}Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Jakarta

¹sinta.delia.ts16@mhs.wpnj.ac.id, ²putera.agungmagung@sipil.pnj.ac.id

Abstrak

Likuifaksi adalah suatu kejadian dimana tanah kehilangan kekuatan geser karena meningkatnya tegangan air pori akibat terjadinya beban siklik (beban gempa) yang sangat cepat dalam waktu yang singkat. Peristiwa likuifaksi akibat gempa bumi dapat menyebabkan kegagalan struktur bangunan. Dalam kasus ini, Proyek Gedung Sanggala di Jakarta berada di lokasi yang rentan potensi likuifaksi, dan analisis desain hanya menggunakan data *Cone Penetration Test* (CPT).

Analisis stabilitas tiang pancang akibat potensi likuifaksi ini bertujuan untuk mengetahui nilai faktor keamanan (FS) di daerah tersebut, dimana dianalisis dengan membandingkan nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) akibat gempa dan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) sebagai tahanan tanah untuk menahan potensi likuifaksi.

Berdasarkan analisis dan perhitungan yang dilakukan, diperoleh nilai $FS > 1$, yang berarti sebenarnya tanah tidak memiliki potensi likuifaksi. Akan tetapi, studi ini tetap meninjau potensi likuifaksi sebagai salah satu persyaratan di dalam peraturan daerah saat menganalisis daya dukung pondasi tiang pancang dengan metode Schmertmann (1978) pada kedalaman 25 m didapatkan hasil sebesar 1660,27 kN untuk tiang tunggal dan 12081,63 kN untuk kelompok tiang. Lebih lanjut, seluruh hasil dari beberapa perhitungan, struktur tiang pancang stabil terhadap potensi likuifaksi.

Kata kunci: *Cyclic Stress Ratio* (CSR), *Cyclic Resistance Ratio* (CRR), Faktor keamanan (FS), Gempa bumi, Likuifaksi

Abstract

Liquefaction is an incident where the soil loses its shear strength due to increased pore-water stress due to the incident of very fast cyclic loading in a short time. Liquefaction event due to earthquakes can cause structural failure of the building. In this case, the Sanggala Building Project in Jakarta exists at location of liquefaction potential susceptible area, and design analysis only uses the data of Cone Penetration Test (CPT).

Stability analysis of pile due to liquefaction potential is aimed to determine the value of the factor of safety (FS) in the area, which is analyzed by comparing the value of Cyclic Stress Ratio (CSR) due to the earthquake and Cyclic Resistance Ratio (CRR) as the soil resistance to resist liquefaction potential.

Based on the analysis and calculations performed, was obtained the value of $FS > 1$, which means actually the soil does not have the liquefaction potential. However, this study still takes into consideration the liquefaction potential as one of requirements of local regulation when the analysis of bearing capacity of pile foundation analyzed by the method of Schmertmann (1978) in a depth of 25 m and the results was indicated by 1660,27 kN for single pile and 12081,63 kN for the group piles. Furthermore, all these results from several stability calculations, the pile foundation system stable from liquefaction potential.

Keywords: *Cyclic Stress Ratio* (CSR), *Cyclic Resistance Ratio* (CRR), *Safety Factor* (FS), *Earthquake*, *Liquefaction*

Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara yang terletak di jalur rawan gempa karena Indonesia terletak pada pertemuan 3 lempeng tektonik, yaitu: lempeng Indo-Australia, lempeng Eurasia, dan lempeng Pasifik. Gempa bumi merupakan bencana alam yang sulit diprediksi kapan terjadinya. Dampak dari gempa bumi ini akan mengakibatkan suatu kegagalan bangunan akibat hilangnya kestabilan tanah. Hilangnya kestabilan tanah saat gempa bumi atau likuifaksi akan menyebabkan kerusakan berat pada bangunan dan sarana infrastruktur di wilayah Indonesia.

Likuifaksi adalah suatu kejadian dimana tanah kehilangan kekuatan geser karena meningkatnya tegangan air pori sebagai akibat terjadinya beban siklik (beban gempa) yang sangat cepat dalam waktu yang singkat (Idriss, I.M., Boulanger, 2008). Pada saat kondisi likuifaksi, daya lekat tanah atau friksi (*friction*) pada kedalaman tanah yang mengalami likuifaksi menjadi hilang atau sama dengan nol ($f_s = 0$). Saat likuifaksi kekuatan friksi lapisan tanah lempung hanya menerima 30% dari tegangan *overburden* total artinya tahanan friksi terkoreksi hingga mencapai 30% (Boulanger & Idriss, 2014). Untuk melakukan analisis terhadap likuifaksi terdapat dua cara yaitu dengan hasil tes laboratorium dan hasil tes uji lapangan yang kemudian dihitung faktor keamanannya. Pada tes uji lapangan, tes yang paling sering digunakan ialah tes SPT, CPT, BPT dan Vs (Ariandi, Sesaro & Sumampouw, 2019).

Daya dukung atau *bearing capacity* merupakan kemampuan tanah yang berada di bawah ataupun disekitar pondasi untuk menahan beban yang berada di struktur atasnya (Rajapakse, 2015) (Meyerhof, 1951). Berdasarkan pengujian pembebanan akan didapat diperkirakan besarnya daya dukung ultimit dan penurunan. *Cone Penetration Test* (CPT) atau uji sondir merupakan salah satu jenis pengujian untuk memperkirakan besarnya daya dukung tanah pada pondasi dalam dan juga dapat digunakan untuk mengklasifikasikan jenis tanah (Jusi, 2018) (Matsumoto et al., 2015). Pengujian dilakukan dengan mendorong konus (kerucut) kedalam tanah dan perlawanan tanah terhadap ujung konus maupun lekatan tanah terhadap selimut batang konus diukur, sehingga didapatkan nilai tahanan ujung (q_c) dan lekatan selimut (f_s) (Randyanto et al., 2015) (Baziar et al., 2012).

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui nilai faktor keamanan (FS) di daerah

tersebut, dimana dianalisis dengan membandingkan nilai *Cyclic Stress Ratio* (CSR) akibat gempa dan *Cyclic Resistance Ratio* (CRR) sebagai tahanan tanah untuk menahan potensi likuifaksi pada Proyek Gedung Sanggala Jakarta Selatan. Dan untuk menganalisis stabilitas daya dukung pondasi tiang pancang.

Manfaat penelitian ini yaitu sebagai pertimbangan untuk kontraktor maupun lembaga terkait dalam perencanaan struktur bangunan sehingga dapat dilakukan pencegahan dengan cara melakukan rekayasa teknik untuk mengurangi potensi terjadinya likuifaksi di lokasi tersebut yang dapat menimbulkan kerugian fisik maupun korban jiwa.

Pembebanan Struktur Atas

Analisis pembebanan digunakan untuk mengetahui seberapa besar beban yang akan diterima oleh pondasi. Analisis pembebanan dengan menggunakan *software* ETABS 2018. *Software* ini dilakukan untuk memasukan data struktur gedung yang meliputi data kolom, balok, dan pelat, serta beban yang bekerja yaitu beban mati, beban hidup, dan beban gempa. Dari data tersebut kemudian diperoleh gaya-gaya yang bekerja pada kolom meliputi gaya aksial, geser, dan momen. Setelah input pembebanan dan menganalisis pembebanan akan didapatkan beban terfaktor maksimum berupa beban vertikal lateral terbesar yang akan digunakan untuk menghitung kemampuan daya dukung dan stabilitas pondasi tiang pancang.

Tanah

Tanah adalah himpunan mineral, bahan organik, dan endapan-endapan yang relatif lepas (*loose*), yang terletak di atas batuan dasar (*bedrock*). Ikatan antara butiran yang relatif lemah dapat disebabkan oleh karbonat, zat organik, atau oksida-oksida yang mengendap diantara partikel-partikel (Hary Christiandy Hardiyatmo, 2010). Ruang di antara partikel-partikel dapat berisi air, udara ataupun keduanya. Proses pelapukan batuan atau proses geologi lainnya yang terjadi di dekat permukaan bumi membentuk tanah. Pembentukan tanah dari batuan induknya, dapat berupa proses fisik maupun kimia. Proses pembentukan tanah secara fisik yang mengubah batuan menjadi partikel-partikel yang lebih kecil, terjadi akibat pengaruh erosi, angin, air, es, manusia, atau hancurnya partikel tanah akibat perubahan suhu atau cuaca.

Umumnya, pelapukan akibat proses kimia dapat terjadi oleh pengaruh oksigen,

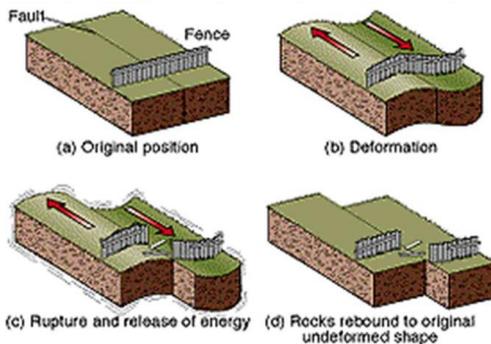
karbondioksida, air (terutama mengandung asam atau alkali) dan proses-proses kimia yang lain. Jika hasil pelapukan masih berada di tempat asalnya, maka tanah ini disebut tanah residual (*residual soil*) dan apabila tanah berpindah tempatnya, disebut tanah terangkut (*transported soil*).

Gempa Bumi

Indonesia jika dilihat dari letak astronomisnya berada di antara 6° LU – 11° LS dan 95° BT – 141° BT serta terletak pada pertemuan 3 lempeng utama dunia yaitu lempeng Indo-Australia, Eurasia, dan Pasifik, dimana paling utara adalah Pulau Weh dan paling selatan adalah Pulau Roti.

Gempa bumi adalah berguncangnya bumi yang diakibatkan oleh adanya patahan aktif, aktivitas gunung api, runtuhannya batuan, dan tumbukan akibat pergerakan lempeng bumi (Suntoko & Supratoyo, 2016).

Mekanisme gempa bumi dapat dijelaskan secara singkat sebagai berikut, jika terdapat 2 buah gaya yang bekerja dengan arah berlawanan pada batuan kulit bumi, batuan tersebut akan terdeformasi, karena batuan mempunyai sifat elastis. Bila gaya yang bekerja pada batuan dalam waktu yang lama dan terus menerus, maka lama kelamaan daya dukung pada batuan akan mencapai batas maksimum dan akan mulai terjadi pergeseran. Akibatnya batuan akan mengalami patahan secara tiba-tiba sepanjang bidang patahan seperti pada **Gambar 1**. Setelah itu batuan akan kembali stabil, namun sudah mengalami perubahan bentuk atau posisi. Pada saat batuan mengalami gerakan yang tiba-tiba akibat pergeseran batuan, energi stress yang tersimpan akan dilepaskan dalam bentuk getaran yang dikenal sebagai gempa bumi (Sunardi et al., 2019).



Gambar 1. Mekanisme terjadinya gempa bumi

Likuifaksi

Likuifaksi atau pencairan tanah adalah hilangnya kekuatan dan kekakuan tanah jenuh air akibat adanya perubahan tegangan pada tanah. Akibat dari hilangnya kekuatan tanah ini dapat berupa longsor, perubahan tekstur tanah menjadi lumpur, atau penurunan atau pergerakan tanah secara tiba-tiba. Likuifaksi hampir sebagian besar terjadi pada tanah jenis pasir, terutama jenis pasir lepas. (M.Das, 2006).

Untuk memahami proses terjadinya likuifaksi, perlu kita pahami terlebih dahulu bahwa suatu endapan tanah terdiri dari partikel-partikel. Jika kita perhatikan setiap partikel tersebut letaknya saling berdekatan, sehingga setiap partikel memiliki kontak dengan partikel yang lain seperti pada **Gambar 2**. Dengan adanya kontak antar partikel tersebut, tanah menjadi memiliki suatu kekuatan untuk memikul beban di atasnya, sebab kondisi seperti ini menjadikan beban yang berada di atas tanah akan dipikul secara bersamaan oleh seluruh partikel. Dan akhirnya beban tersebut akan di salurkan ke lapisan batuan dasar di bagian bawah lapisan tanah tersebut tanah.



Gambar 2. Kondisi partikel tanah saat normal sebelum terjadinya kenaikan tegangan air pori

Pada kondisi tanah seperti **Gambar 3**, tampak bahwa banyak rongga antar partikel tanah tersebut memiliki tekanan air pori yang relatif rendah. Pada saat menerima tekanan dari getaran secara tiba-tiba, air tersebut akan terdesak sehingga ia akan menaikkan tekanannya untuk dapat mencari jalan keluar. Namun, pada saat terjadinya gempa, air tersebut tidak memiliki cukup waktu untuk berdisipasi keluar dari tanah melalui rongga-rongga tanah, sehingga sebagai gantinya air tersebut mendorong partikel-partikel tanah sehingga beberapa partikel tanah sebelumnya berhubungan menjadi menjauh. Dan akhirnya partikel tanah tidak dapat mendistribusikan beban lagi dengan maksimal.



Gambar 3. Kondisi partikel tanah saat mengalami getaran saat terjadinya kenaikan tekanan air pori

Setidaknya ada empat hal yang menjadi syarat terjadi likuifaksi, yaitu:

1. Tanah pasir dengan kepadatan rendah (tanah pasir lepas)
2. Bentuk butiran tanah/pasir yang seragam
3. Jenuh air (muka air tinggi)
4. Gempa (umumnya dengan skala > 6)

Safety Factor (Faktor Keamanan)

Faktor keamanan atau *Safety Factor (SF)* adalah suatu hal yang sangat penting dalam analisis dan perencanaan struktur secara keseluruhan. Permasalahan ini sudah menjadi subyek penelitian dan telah banyak dibicarakan di kalangan insinyur sipil, khususnya di bidang rekayasa struktur. Faktor keamanan elemen dan sistem struktur sangat tergantung pada ketahanan struktur (*R*: bahan dan geometri), dan beban yang bekerja (*S*: beban mati, beban hidup, beban gempa, beban angin, dan sebagainya) (Analisis Stabilitas Timbunan Dengan Geotekstil Woven, 2019).

Parameter yang Mempengaruhi Potensi Likuifaksi

1. Tegangan Tanah

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

$$\sigma' = H \cdot \gamma_w + (H_A - H) \cdot \gamma_{sat} \quad (1)$$

Dengan:

σ = Tegangan total

γ_w = Berat volume air

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:

$$\sigma' = \sigma - \mu \quad (2)$$

Dengan μ adalah tekanan pori air tanah, dihitung dengan persamaan:

$$\mu = H_A \cdot \gamma_w \quad (3)$$

2. Percepatan Gempa

Pada penelitian ini penulis dalam menentukan percepatan gempa maksimum (α_{max}) menggunakan SNI 03 - 1726 - 2002 (2012). Nilai α_{max} didapat dari **Tabel 1**.

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	0.01	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

3. Koefisien tegangan reduksi (r_d)

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

$$r_d = 1,00 - 0,00765z \leq 9,15m \quad (4)$$

$$r_d = 1,174 - 0,0267z \cdot 9,15m \leq z \leq 23 m \quad (5)$$

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

$$r_d = 0,5z \geq 23m \quad (7)$$

Dimana :

z = kedalaman tanah

4. *Cyclic Stress Ratio (CSR)*

Perhitungan nilai *Cyclic Stress Ratio (CSR)* menggunakan teori beberapa ahli dengan menggunakan persamaan sebagai berikut (Seed & Idriss, 1971):

$$CSR = 0,65 \cdot \left(\frac{\alpha_{max}}{g} \right) \cdot \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) \cdot r_d \quad (8)$$

Dimana:

α_{max} = Percepatan gempa

σ_{vo} = Tegangan total *overburden*

σ'_{vo} = Tegangan efektif *overburden*

r_d = Koefisien tegangan reduksi

5. *Cyclic Resistance Ratio (CRR)*

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

- a. Menghitung Nilai q_{cIN}

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

$$q_{cIN} = C_q \cdot \left(\frac{q_c}{P_d} \right) \quad (9)$$

Stabilitas Tiang Pancang Akibat Likuifaksi pada Poyek Gedung Sanggala Jakarta

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

b. Menghitung Nilai I_c

Untuk menghitung nilai I_c menggunakan persamaan (Youd, T L & Idriss, 2001):

$$I_c = [(3,47 - \log Q)^2 + (1,22 + \log F)^2]^{0,5} \quad (10)$$

c. Menghitung Nilai Q

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

$$Q = \left[\frac{(q_c - \sigma_{vo})}{P_a} \right] \cdot \left(\left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^n \right) \quad (11)$$

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.

d. Menghitung Nilai F

Untuk menghitung nilai F menggunakan persamaan (Youd, T L & Idriss, 2001):

$$F = [f_s/q_c - \sigma_{vo}] \cdot 100 \% \quad (12)$$

e. Menghitung nilai *Cyclic Resistance Ratio* (CRR)

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

Jika nilai $(q_c IN)_{cs} < 211$

$$CRR_{7,5} = \frac{\exp(q_c IN)_{cs}}{540} + \frac{(q_c IN)_{cs}^2}{67} - \frac{(q_c IN)_{cs}^3}{80} + \left(\frac{(q_c IN)_{cs}^4}{114} - 3 \right) \quad (13)$$

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

f. Faktor Keamanan (FS)

Menghitung faktor keamanan (FS) likuifaksi dengan menggunakan persamaan berikut:

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (14)$$

Dimana :

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

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

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

Seed dan Idriss mendapatkan suatu nilai koreksi yang disebut *Magnitude Scale Factor* (MSF), untuk magnitude lebih kecil dari 7,5 dan magnitude lebih besar dari 7,5 yaitu sebagai berikut:

$$Mw < 7,5, MSF = \frac{10^{2,24}}{Mw^{2,56}} \quad (15)$$

$$Mw < 7,5, MSF = \left(\frac{Mw}{7,5} \right)^{-2,56} \quad (16)$$

Untuk menghitung CRR dengan besar magnitude gempa selain 7,5, persamaannya dapat dituliskan sebagai berikut (Seed et al., 1983):

$$CRR_{MW} = CRR_{7,5} \cdot MSF \cdot K_\sigma \cdot K_\alpha \quad (17)$$

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.

Analisis Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Tunggal

Bila dinyatakan dalam persamaan, maka (Hary Christady Hardiyatmo, 2008):

$$Q_{ult} = Q_p + Q_s \quad (18)$$

Dimana:

Q_{ult} = Daya dukung *ultimate* (kN)

Q_p = Tahanan ujung (kN)

Q_s = Tahanan kulit (kN)

q_p = Tahanan ujung tiang (kg/cm²)

A_p = Luas ujung tiang (cm²)

f_s = Tahanan gesek/friksi (kg/cm²)

A_s = Luas selimut tiang (m²)

a. Daya Dukung Ujung Tiang Pancang

$$Q_p = (q_p + A_p) \quad (19)$$

$$q_p = \frac{q_{c1} + q_{c2}}{2} \quad (20)$$

Dimana:

Q_p = Tahanan ujung (kN)

q_p = Tahanan ujung tiang (kg/cm²)

A_p = Luas ujung tiang (cm²)

b. Daya Dukung Friksi Tiang Pancang

Daya dukung friksi dalam lapisan pasir dihitung dengan persamaan sebagai berikut (Das, 2011):

$$Q_s = f_s \cdot A_s = \alpha' \left(\sum_{y=0}^{8B} \frac{y}{8B} f_s \cdot A_s + \sum_{y=8B}^L f_s \cdot A_s \right) \quad (21)$$

Dimana:

α' = Faktor koreksi untuk lapisan pasir

γ = Panjang tahanan sisi tiang

L = Panjang tiang

B = Panjang sisi penampang tiang

c. Daya Dukung Izin Tiang Pancang

Rumus daya dukung izin tiang pancang sebagai berikut:

$$Q_{(all)} = \frac{Q_u}{FS} = \frac{Q_p}{3} + \frac{Q_s}{5} \quad (22)$$

Dimana:

Q_u = Daya dukung *ultimate* (kN)

Q_p = Tahanan ujung (kN)

Q_s = Tahanan kulit (kN)
 FS = Faktor keamanan

Analisis Daya Dukung Pondasi Tiang Grup

a. Jumlah tiang pondasi (n)

$$n_p = \frac{P}{P_{all}} \quad (23)$$

Dimana:

n_p = Jumlah tiang
 P = Gaya aksial yang terjadi (Q)
 P_{all} = Daya dukung izin tiang (Q_{all})

b. Efisiensi daya dukung grup tiang

1) Formula sederhana:

$$E_g = \frac{2(m + n - 2)s + 4B}{p \cdot m \cdot n} \quad (24)$$

Dimana:

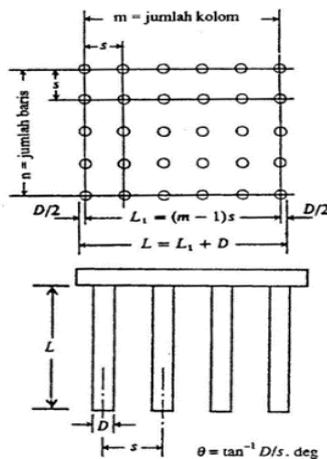
m = Jumlah tiang deretan baris
 n = Jumlah tiang deretan kolom
 s = Jarak antar tiang
 B = Diameter atau sisi tiang
 p = Keliling dari penampang tiang

2) *Converse - Labbarre* dari *Uniform Building Code AASHTO*

$$E_g = 1 - \theta \left[\frac{(n-1)m + (m-1)n}{90 \cdot m \cdot n} \right] \quad (25)$$

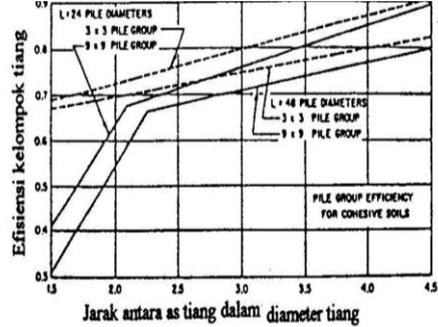
Dimana:

E_g = Efisiensi kelompok tiang
 θ = arc tan (D/s) ($^\circ$ / derajat)
 s = Jarak antar tiang (as ke as)
 D = Ukuran penampang tiang
 m = Jumlah tiang dalam 1 kolom
 n = Jumlah tiang dalam 1 baris



Gambar 4. Efisiensi kelompok tiang

3) NAVFAC DM 7.2 (1982)



Gambar 5. Efisiensi kelompok tiang pada tanah kohesif

- 4) Los Angeles *Group Action Equation*
- 5) Seiler-Keeney *Equation* (Seiler and Keeney, 1994)

Tabel 2. Perbandingan beberapa angka efisiensi (η) grup tiang

Equations for Group Efficiency of Friction Pile	
Name	Equation
Converse-Labarre equation	$\eta = 1 - \left[\frac{(\eta_1 - 1)\eta_2 + (\eta_2 - 1)\eta_1}{90\eta_1\eta_2} \right] \theta$ Where $\theta(\text{deg}) = \tan^{-1}(D/d)$
Los Angeles Group Action Equation	$\eta = 1 - \frac{D}{\pi d \eta_1 \eta_2} \left[\eta_1(\eta_2 - 1) + \eta_2(\eta_1 - 1) + \sqrt{2}(\eta_1 - 1)(\eta_2 - 1) \right]$
Seiler-Keeney Equation (Seiler and Keeney, 1994)	$\eta = \left\{ 1 - \left[\frac{11d}{7(d^2 - 1)} \cdot \frac{[\eta_1 + \eta_2 - 2]}{[\eta_1 + \eta_2 - 1]} \right] \right\} + \frac{0.3}{\eta_1 + \eta_2}$ Where d is in ft

Sumber: Das, B.M, (2011)

Analisis Stabilitas Daya Dukung Pondasi Tiang Terhadap Likuifaksi

$$P_{maks} = \frac{P_u}{n_p} \pm \frac{M_y \cdot X_{maks}}{n_y \cdot \sum x^2} \pm \frac{M_x \cdot Y_{maks}}{n_x \cdot \sum y^2} \quad (26)$$

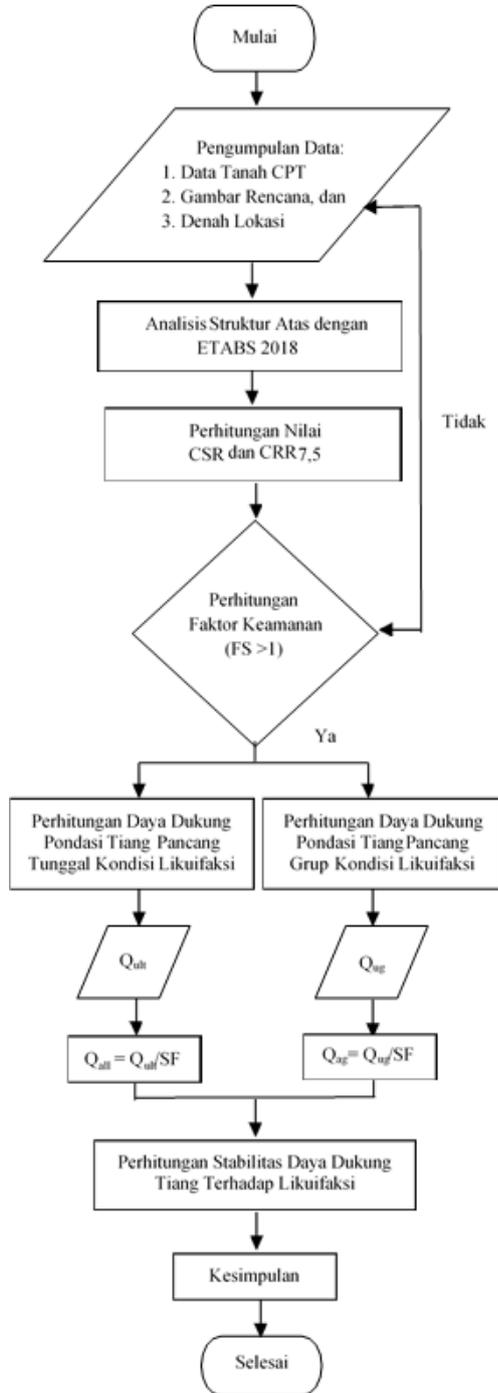
Dimana:

- P_{maks} = Beban maksimum tiang
- P_u = Beban aksial yang terjadi (terfaktor)
- M_y = Momen yang bekerja tegak lurus sumbu Y
- M_x = Momen yang bekerja tegak lurus sumbu X
- X_{maks} = Jarak tiang ke sumbu X terjauh
- Y_{maks} = Jarak tiang ke sumbu Y terjauh
- $\sum X^2$ = Jumlah kuadrat X
- $\sum Y^2$ = Jumlah kuadrat Y
- n_x = Jumlah tiang sumbu X
- n_y = Jumlah tiang sumbu Y
- n_p = Jumlah total tiang

Stabilitas Tiang Pancang Akibat Likuifaksi pada Poyek Gedung Sanggala Jakarta

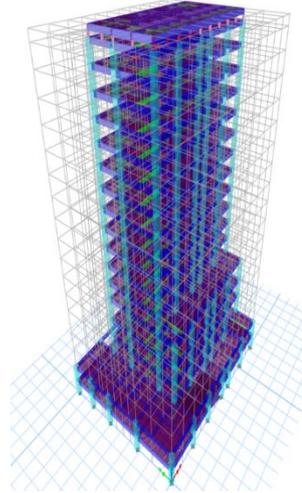
Bagan Alir

Metode analisis dalam penelitian ini dibantu dengan *software* ETABS 2018 untuk mendapatkan beban dari struktur atas. Beban ini digunakan untuk menganalisis daya dukung dan stabilitas pondasi tiang pancang. Bagan alir dapat dilihat pada **Gambar 6**.



Gambar 6. Bagan alir penelitian

Analisis Pembebanan Struktur Atas



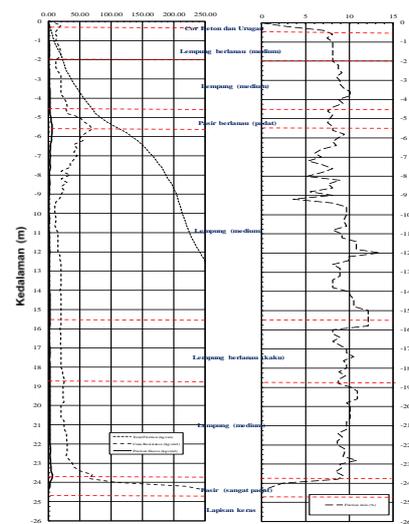
Gambar 7. Struktur Atas Proyek Gedung Sanggala

Dari hasil analisis struktur atas menggunakan ETABS 2018 dengan 14 kombinasi didapatkan nilai pembebanan maksimum sebagai berikut:

- a. $P = 16240,35 \text{ kN}$
- b. $H = 545,06 \text{ kN}$
- c. $M_x = 1489,53 \text{ kN.m}$
- d. $M_y = 1280,01 \text{ kN.m}$

Analisis Likuifaksi

Analisis likuifaksi dilakukan pada pada tanah berpasir yang dilakukan pada pengujian CPT pada titik S1 yang dapat dilihat pada **Gambar 8**.



Gambar 8. Grafik data tanah CPT

Dari hasil yang ditunjukkan dalam **Gambar 8**, terlihat bahwa jenis tanah pada kedalaman 25 m merupakan jenis tanah pasir dengan kondisi jenuh air dengan nilai perlawanan penetrasi konus berada di $q_c = 250 \text{ kg/cm}^2$.

Dengan menggunakan tabel korelasi hasil data pengujian CPT, dapat dikorelasikan untuk mendapatkan parameter-parameter sifat fisik tanah. Korelasi antara nilai CPT dengan parameter-parameter sifat fisik tanah disajikan pada **Tabel 3**.

Tabel 3. Korelasi antara nilai CPT dengan parameter-parameter sifat fisik tanah

Depth (m)	γ_m kN/m ³	γ_{sat} kN/m ³	$\sigma_{vototal}$ kN/m ²	U kN/m ²	$\sigma_{vo'}$ kN/m ²
0 - 2	15.8	0	31.6	0	31.6
2 - 4.8	15.8	20.14	75.8	27.4	48.4
4.8 - 5.6	19.9	21.03	91.7	35.3	56.5
5.6 - 15.8	15.8	20.14	297.1	135.3	161.8
15.8 - 18.8	15.8	18.32	352.1	164.8	187.4
18.8 - 23.8	15.8	20.14	452.8	213.8	239.0
23.8 - 25	20.9	21.03	478.0	225.6	252.5

Ada beberapa langkah untuk menganalisis potensi likuifaksi, penulis mengambil titik S1 pada kedalaman 25 m sebagai contoh langkah perhitungan seperti berikut:

Data:

a. $h : 1,2$

b. $q_c : 192,67 \text{ kg/cm}^2$

c. $\alpha_{max} : 0,28 \text{ g}$

d. $P_a : 1 \text{ kg/cm}^2$

1. Perhitungan tegangan total (σ)

$$\begin{aligned}\sigma &= (h \cdot \gamma_{sat}) + \sigma_{lapisan \text{ atas}} \\ &= (1,2 \cdot 21,03) + 452,81 \\ &= 478,06 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

2. Perhitungan tekanan air pori (u)

$$\begin{aligned}u &= (h \cdot \gamma_w) + u_{lapisan \text{ atas}} \\ &= (1,2 \cdot 9,81) + 213,79 \\ &= 225,56 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

3. Perhitungan tegangan efektif (σ')

$$\begin{aligned}\sigma' &= \sigma - u \\ &= 478,06 - 225,56 \\ &= 252,49 \text{ kN/m}^2\end{aligned}$$

4. Perhitungan reduksi tegangan (r_d)

$$\begin{aligned}r_d &= 0,744 - 0,008 z \\ &= 0,744 - 0,008 \cdot 25 \text{ m} \\ &= 0,54 \text{ m}\end{aligned}$$

5. Perhitungan nilai CSR

$$CSR = 0,65 \cdot \left(\frac{\alpha_{max}}{g}\right) \cdot \left(\frac{\sigma}{\sigma'}\right) \cdot r_d$$

$$\begin{aligned}&= 0,65 \cdot \left(\frac{0,28}{9,81}\right) \cdot \left(\frac{478,06}{225,56}\right) \cdot 0,5 \\ &= 0,02\end{aligned}$$

6. Perhitungan nilai Q

$$\begin{aligned}Q &= \left[\frac{q_c - \sigma_{vo}}{P_a}\right] \cdot \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}}\right)^{0,5} \\ &= \left[\frac{19267 - 478,06}{98,07}\right] \cdot \left(\frac{98,07}{252,49}\right)^{0,5} \\ &= 119,40\end{aligned}$$

7. Perhitungan nilai F

$$\begin{aligned}F &= \left[\frac{f_s}{(q_c - \sigma_{vo})}\right] \cdot 100\% \\ &= \left[\frac{446}{(19267 - 478,06)}\right] \cdot 100\% \\ &= 2,37\end{aligned}$$

8. Perhitungan nilai I_c

$$\begin{aligned}I_c &= [(3,47 - \log Q)^2 + (1,22 + \log F)^2]^{0,5} \\ &= [(3,47 - \log 119,40)^2 + (1,22 + \log 2,37)^2]^{0,5} \\ &= 2,12\end{aligned}$$

9. Perhitungan nilai C_q

$$\begin{aligned}C_q &= \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}}\right)^n \\ &= \left(\frac{98,07}{252,49}\right)^n \\ &= 0,62\end{aligned}$$

10. Perhitungan nilai q_{cIN}

$$\begin{aligned}q_{cIN} &= C_q \cdot \left(\frac{q_c}{P_a}\right) \\ &= 0,62 \cdot \left(\frac{19267}{98,07}\right) \\ &= 122,44\end{aligned}$$

11. Perhitungan nilai K_c

$$\begin{aligned}K_c &= -0,403I_c^4 + 5,581I_c^3 - 21,63I_c^2 + 3,75I_c - 17,88 \\ &= 1,49\end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned}(q_{cIN})_{cs} &= K_c \cdot q_{cIN} \\ &= 1,49 \cdot 122,44 \\ &= 182,34\end{aligned}$$

13. Perhitungan nilai $CRR_{7.5}$

Jika nilai $(q_{cIN})_{cs} < 211$, maka:

$$\begin{aligned}CRR_{7.5} &= \exp\left[\left(\frac{(q_{cIN})_{cs}}{540}\right) - \left(\frac{(q_{cIN})_{cs}}{80}\right)^3 + \left(\frac{(q_{cIN})_{cs}}{114}\right)^4 - 3\right] \\ &= 0,58\end{aligned}$$

14. Perhitungan nilai FS

$$\begin{aligned}FS &= \frac{CRR_{7.5}}{CSR} \\ &= \frac{0,58}{0,02} \\ &= 30,15 > 1 \text{ (Tidak terjadi likuifaksi)}\end{aligned}$$

Tabel 4. Perhitungan Analisis Likuifasi Pada Titik S1

Depth (m)	q_c (kg/cm ²)	CSR	CRR _{7,5}	FS
0 - 2	14.00	0.02	0.30	16.54
2 - 4.8	21.44	0.03	0.33	11.83
4.8- 5.6	60.00	0.03	0.51	17.67
5.6 - 15.8	23.24	0.03	0.33	12.82
15.8 - 18.8	20.60	0.02	0.33	13.80
18.8 - 23.8	30.84	0.02	0.78	40.08
23.8 - 25	192.67	0.02	0.58	30.15

Dari titik S1 pada data tanah Cone Penetration Test (CPT) yang telah ditinjau maka dapat diketahui bahwa dengan besaran magnitude gempa Mw 7,5 dan dengan percepatan gempa 0,28 g, titik S1 pada data tanah CPT tidak memiliki potensi likuifaksi. Hal ini dikarenakan nilai FS >1.

Analisis Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Tunggal dengan Metode Schmertmann (1978)

Pada analisis daya dukung aksial pondasi tiang pancang tunggal dengan metode Schmertmann (1978) menggunakan data sebagai berikut :

L tiang = 25 m
D tiang = 50 cm

Penentuan titik CPT yang ditinjau adalah titik yang terdekat dengan beban struktur terbesar yaitu titik S1.

Tabel 5. Rekapitulasi Perhitungan Daya Dukung Tiang Pancang Tunggal Kondisi Likuifaksi

Data	Nilai	Satuan
A _p	1964.29	cm ²
A _s	392857.14	cm ²
L	2500	cm
q _{c1}	250	kg/ cm ²
q _{c2}	250	kg/ cm ²
q _p	250	kg/ cm ²
fs	0.48	kg/ cm ²
L/B	50	-
α _c	0.48	-
Q _u	502.75	ton
Q _(all)	166.03	ton

Berdasarkan hasil rekapitulasi perhitungan daya dukung izin tiang pancang Q_(all) tunggal

yang dihitung berdasarkan data CPT memperoleh nilai sebesar 166,03 ton.

Analisis Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Grup

Berdasarkan perhitungan tiang grup, memakai konfigurasi dengan 9 buah tiang dan pile cap berbentuk segiempat. Dikarenakan konfigurasi tersebut mampu menahan beban struktur diatasnya.

D = 50 cm
L = 2500 cm
m = 3
n = 3
Syarat = (2 - 3)D diambil 2,5 D
= 2,5 . D
= 2,5 . 50
= 125 cm

Tabel 6. Rekapitulasi Perhitungan Daya Dukung Tiang Pancang Grup Kondisi Likuifaksi

Data	Nilai	Satuan
Formula Sederhana	0.85	-
Coverse-Labarre	0.68	-
NAVFAC DM 7.2	0.72	-
Los Angeles Group Action Equation	0.75	-
Seiler-Keeney	1.05	-
η rata-rata	0.81	-
Q _{u(g)} = Σ Q _u x η	1208.16	ton
Q _{u(g)} = Σ Q _u x η (blok)	9743.98	ton
Q _{u(g)} (diambil)	1208.16	ton

Berdasarkan hasil rekapitulasi perhitungan daya dukung izin tiang pancang Q_(all) grup yang dihitung berdasarkan data CPT memperoleh nilai sebesar 1208,16 ton.

Stabilitas Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang

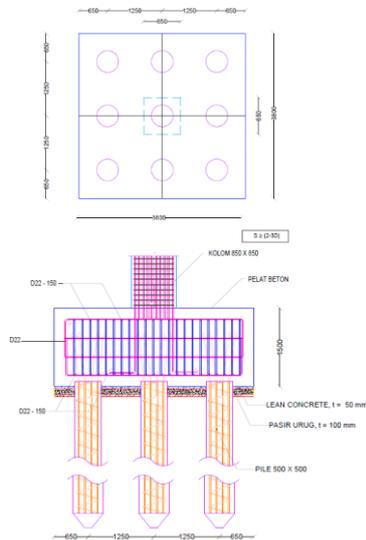
1) Data analisis struktur
P_v = 16240,35 kN
M_x = 1489,53 kN.m
M_y = 1280,01 kN.m

2) Beban pile-cap segiempat
D = 50 cm
Syarat = (2 - 3)D diambil 2,5 D
= 2,5 . D
= 2,5 . 50
= 125 cm
B_g = 380 cm
L_g = 380 cm
h = 150 cm

Berat volume beton = 2400000 t/cm³

Stabilitas Tiang Pancang Akibat Likuifaksi pada Proyek Gedung Sanggala Jakarta

$$\begin{aligned}
 W_{pilecap} &= B \cdot L \cdot h \cdot \text{Berat volume beton} \\
 &= 380 \cdot 380 \cdot 150 \cdot 2400000 \\
 &= 51,98 \text{ ton}
 \end{aligned}$$



Gambar 9. Konfigurasi 9 Tiang Pancang

- 3) Kontrol beban aksial maksimum akibat beban sementara

$$\begin{aligned}
 P_{maks} &= \frac{P_{total}}{n} + \frac{M_y \cdot X}{\sum X^2} + \frac{M_x \cdot Y}{\sum Y^2} \\
 &= 186,22 + 23,23 + 13,52 \\
 &= 222,98 \text{ ton}
 \end{aligned}$$

$$Q_{u(group)} = 1208,16 \text{ ton}$$

$$\begin{aligned}
 P_{maks} &< Q_{u(group)} \\
 222,98 \text{ ton} &< 1208,16 \text{ ton} \rightarrow \text{OK}
 \end{aligned}$$

Kesimpulan

Berdasarkan hasil perhitungan stabilitas tiang pancang akibat likuifaksi yang dilakukan pada Proyek Gedung Sanggala maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

- Berdasarkan analisis struktur atas dengan ETABS 2018, didapatkan hasil pembebanan sebagai berikut:
 - $P = 16240,35 \text{ kN}$
 - $H = 545,06 \text{ kN}$
 - $M_x = 1489,53 \text{ kN.m}$
 - $M_y = 1280,01 \text{ kN.m}$
- Berdasarkan perhitungan faktor keamanan (FS) yang didapat untuk titik S-1 dengan nilai magnitude gempa sebesar 7,5 SR, menunjukkan lapisan tanah tidak bahaya terhadap potensi likuifaksi, hal tersebut dibuktikan dengan nilai $FS > 1$.
- Berdasarkan hasil analisis daya dukung pondasi terhadap likuifaksi dengan metode

Schmertmann (1978) didapatkan hasil sebesar 1660,27 kN untuk tiang tunggal dan 12081,63 kN untuk kelompok tiang.

- Berdasarkan hasil perhitungan dengan 9 buah tiang pancang dapat menahan total beban yang dimiliki oleh Proyek Gedung Sanggala sehingga stabilitas daya dukung pondasi tiang dinyatakan stabil terhadap potensi likuifaksi.

Saran

Berdasarkan dari kesimpulan kajian penelitian ini, maka dapat diberikan saran kepada kontraktor, pemilik proyek, dan konsultan. Adapun saran yang dapat diberikan adalah sebagai berikut:

- Bagi kontraktor:
 - Pertimbangan dalam perencanaan struktur bangunan sehingga dapat dilakukan pencegahan dengan cara melakukan rekayasa teknik untuk mengurangi potensi terjadinya likuifaksi di lokasi tersebut yang dapat menimbulkan kerugian fisik maupun korban jiwa.
 - Dalam mendirikan suatu bangunan sebaiknya dilakukan evaluasi potensi likuifaksi pada lokasi yang akan didirikan bangunan sehingga dapat direncanakan pondasi yang tahan terhadap likuifaksi.
 - Sistem pondasi yang akan digunakan untuk struktur bangunan yang tanah dasarnya berindikasi akan adanya bahaya likuifaksi sebaiknya menggunakan pondasi dalam sehingga boleh mencapai suatu kedalaman yang aman terhadap perilaku likuifaksi.
- Bagi pemilik proyek dan konsultan:
 - Semakin banyak metode yang ditinjau untuk mengevaluasi potensi likuifaksi, semakin baik hasil dari perbandingan metode yang dapat diperoleh. Sehingga, pertimbangan pembangunannya di lokasi yang rawan terhadap potensi likuifaksi dapat dicegah.
 - Hasil analisis perhitungan yang diperoleh sebaiknya dibandingkan dengan metode perhitungan lainnya, seperti perhitungan dengan menggunakan data laboratorium atau juga data pengujian *Standart Penetration Test* (SPT).
 - Perlunya literatur dari berbagai tempat karena kondisi tanah dari berbagai tempat tidak sama.

Daftar Rujukan

- Ariandi, Sesaro, J. M., & Sumampouw. (2019). *Kajian Potensi Likuifaksi Pada Sekitar Pondasi Jembatan Prategang Di Sawangan*. 17(71).
- Analisis Stabilitas Timbunan Dengan Geotekstil Woven, 17 Jurnal STT Garut 8 (2019).
- Baziar, M. H., Kashkooli, A., & Saeedi-Azizkandi, A. (2012). Prediction of pile shaft resistance using cone penetration tests (CPTs). *Computers and Geotechnics*.
- Boulanger, R., & Idriss, I. M. (2014). CPT and SPT Based Liquefaction Triggering Procedures. *Ce.Memphis.Edu*.
- Das, B. . (2011). *Principle of Foundation Engineering*.
- Das, B. M., Endah, N., & Mochtar, I. B. (1993). Mekanika Tanah (Prinsip-prinsip Rekayasa Geoteknis). *Lnstitut Teknologi 10 Nopember*.
- Hardiyatmo, Hary Christady. (2008). *Teknik Fondasi* 2. 275.
- Hardiyatmo, Hary Christiandy. (2010). Analisis dan Perancangan Fondasi. In *Analisis dan Perancangan Fondasi*.
- Idriss, I.M., Boulanger, R. W. (2008). *Soil Liquefaction During Earthquakes*.
- Jusi, U. (2018). Analisa Kuat Dukung Pondasi Bored Pile Berdasarkan Data Pengujian Lapangan (Cone Dan N-Standard Penetration Test). *Siklus: Jurnal Teknik Sipil*.
- Liao, S. S. C., & Whitman, R. V. (1986). Overburden correction factors for SPT in sand. *Journal of Geotechnical Engineering*.
- M.Das, B. (2006). Principles of Geotechnical Engineering 7th Edition. *Cengage Learning*.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Matsumoto, T., Phan, L. T., Oshima, A., & Shimono, S. (2015). Measurements of driving energy in SPT and various dynamic cone penetration tests. *Soils and Foundations*.
- Meyerhof, G. G. (1951). The ultimate bearing capacity of foundations. *Geotechnique*.
- Rajapakse, R. (2015). Geotechnical Engineering Calculations and Rules of Thumb: Second Edition. In *Geotechnical Engineering Calculations and Rules of Thumb: Second Edition*.
- Randyanto, E. S., Sumampouw, J. E. R., & Balamba, S. (2015). Menggunakan Metode Statik Dan Calendring Studi Kasus : Proyek Pembangunan Manado Town Square 3. *Jurnal Sipil Statik*.
- Seed, H. B., & Idriss, I. M. (1971). Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. *ASCE J Soil Mech Found Div*.
- Seed, H. B., Idriss, I. M., & Arango, I. (1983). Evaluation of liquefaction potential using field performance data. *Journal of Geotechnical Engineering*.
- SNI 03 -1726-2002. (2012). *Tata cara perencanaan ketahanan gempa untuk struktur bangunan gedung dan non gedung*.
- Sunardi, B., Sulastri, Karnawati, D., Haryoko, U., Rohadi, S., Pramono, S., & Sungkowo, A. (2019). Acceleration Response Spectra for M 7.4 Donggala Earthquake and Comparison with Design Spectra. *Journal of Sustainable Engineering: Proceedings Series*.
<https://doi.org/10.35793/joseps.v1i1.3>
- Suntoko, H., & Supartoyo, S. (2016). Konfirmasi Patahan Permukaan Berdasarkan Data Geologi dan Data Gempa Daerah Kawasan Puspipstek Serpong. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*.
<https://doi.org/10.17146/jpen.2016.18.1.2874>
- Youd, T L & Idriss, I. M. (2001). Liquefaction Resistance Of Soils: Summary Report From The 1996 Nceer And 1998 Nceer / Nsf Workshops On Evaluation. In *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*.