

ANALISIS POTENSI LIKUIFAKSI DAN ALTERNATIF PERBAIKANNYA DENGAN METODE *STONE COLOUMN*

Woelandari Fathonah¹, Enden Mina², Rama Indera Kusuma², Rosyida Hutami³
^{1,2,3}Jurusan Teknik Sipil Universitas Sultan Ageng Tirtayasa
e-mail : ¹woelandarifathonah@gmail.com

ABSTRACT

Liquefaction is a phenomenon that occurs in water-saturated sandy soils is the loss of soil strength and pore water pressure increases due to an earthquake. Soil improvement that can be done for liquefaction potential are using stone columns. Analysis of the potential for liquefaction and alternative improvements is needed to minimize the the impact of the earthquake. Location Serang-Panimbang toll road STA.17 + 543 selected as case studies. In this study, liquefaction analysis using the Seed and Idris method based on SPT, alternative soil improvement with the stone column method. The results of liquefaction analysis showed that the case studies have liquefaction potential at depth 14.07 m, 14.45 m, 17.00 m, 18.45 m and 32.45 m. Installation of stone coloumn equilateral triangle pattern with a diameter of 1.5 m and 2.4 m spacing between columns can reduce liquefaction potential, nilai faktor keamanan mengalami peningkatan dari rentang nilai 0,217 – 0,739 menjadi 1,004 – 9,427.

Keywords: *liquefaction, stone column, SPT, safety factor*

INTISARI

Likuifaksi merupakan fenomena yang terjadi pada tanah berpasir jenuh air yang mengalami kehilangan kekuatan dan peningkatan tekanan air pori akibat getaran gempa bumi, upaya perbaikan tanah yang dapat dilakukan untuk tanah berpotensi likuifaksi yaitu menggunakan *stone coloumn*. Analisis potensi likuifaksi dan alternatif perbaikannya sangat diperlukan untuk meminimalisasi resiko yang akan timbul akibat gempa bumi. Lokasi Tol Serang-Panimbang STA.17+543 dipilih sebagai lokasi studi kasus. Pada penelitian ini analisis likuifaksi dilakukan menggunakan metode Seed dan Idris berdasarkan data SPT, alternatif perbaikannya dengan metode *stone coloumn*. Hasil analisis likuifaksi menunjukkan bahwa lokasi studi kasus memiliki potensi likuifaksi pada kedalaman 14.07 m, 14.45 m, 17.00 m, 18.45 m dan 32.45 m. Pemasangan *stone coloumn* pola segitiga sama sisi dengan diameter 1.5 m dan spasi antar kolom 2.4 m dapat mengurangi potensi likuifaksi, nilai faktor keamanan mengalami peningkatan dari rentang nilai 0,217 – 0,739 menjadi 1,004 – 9,427.

Kata Kunci : likuifaksi, *stone column*, SPT, faktor keamanan

1. PENDAHULUAN

Likuifaksi merupakan fenomena geoteknik yang terjadi akibat transformasi material granular dari bentuk solid menjadi cair sebagai akibat dari naiknya tekanan air pori dan kehilangan tegangan efektif (Marcuson, 1978). Pada saat terjadi gempa akan menyebabkan tanah mengalami perubahan sifat dari padat ke cair (*liquid*) akibat beban siklik. Deposit tanah yang berpotensi likuifaksi ketika diberikan beban siklik yaitu pasir halus (*sand*), pasir berlanau (*silty sand*) dan pasir lepas (*loose sand*). Likuifaksi hanya terjadi pada tanah yang jenuh (Kramer, 1996). Usaha perbaikan tanah yang dapat dilakukan untuk meminimalisasi potensi likuifaksi yaitu menggunakan *stone column* (tiang batu).

Tol Serang – Panimbang pada STA.17+543 yaitu di Simpang Susun Petir digunakan sebagai lokasi studi kasus dalam penelitian ini seperti yang dapat dilihat pada Gambar 1.

Tipikal tanah pada lokasi penelitian didominasi oleh jenis tanah pasir (*sand*) dan tanah pasir berlanau (*silty sand*) sehingga perlu dilakukan analisa potensi likuifaksi.

Analisis *response spectra* merupakan suatu proses untuk menganalisis rambatan gelombang gempa dengan *output* yang dihasilkan adalah nilai percepatan gempa maksimum suatu lokasi tertentu. Analisis *response spectra* permukaan untuk wilayah lokal telah dilakukan di Tangerang dengan menghasilkan nilai percepatan gempa maksimum sebesar 0,412g (Mina *et al*, 2018).

Pada penelitian ini analisa likuifaksi dilakukan berdasarkan data SPT dan solusi perbaikan tanah untuk mitigasi likuifaksi dengan menggunakan *stone coloumn*.



Gambar 1. Tol Serang – Panimbang pada STA.17+543

1.1. Parameter Tanah

Tanah adalah himpunan mineral, bahan organik dan endapan-endapan relatif lepas (*loose*) yang terletak di atas batuan dasar (*bedrock*). Ikatan antar butiran yang relatif lemah dapat disebabkan oleh karbonat, zat organik atau oksida-oksida yang mengendap di antara partikel-partikel yang berisi air, udara ataupun keduanya. Proses pelapukan batuan atau proses geologi lainnya yang terjadi di dekat permukaan bumi membentuk tanah yang terjadi secara fisik maupun kimia (Hardiyatmo, 2002).

Ukuran dari partikel tanah sangat beragam dengan variasi yang cukup besar. Tanah pada umumnya dapat disebut sebagai kerikil (*gravel*), pasir (*sand*), lanau (*silt*), atau lempung (*clay*) tergantung pada ukuran partikel yang paling dominan pada tanah tersebut (Das, 1995).

1.2. Gempa Bumi

Gempa bumi merupakan peristiwa terjadinya getaran bumi secara tiba-tiba karena adanya pergeseran lapisan batuan pada kulit bumi akibat pergerakan lempeng tektonik (Sunarjo *et al*, 2010). Indonesia berada di pertemuan tiga lempeng utama dunia, yaitu lempeng Australia, Eurasia, dan Pasifik. Berdasarkan data dari Badan Nasional Penanggulangan Bencana (BNPB) Tahun 2019, di Indonesia telah terjadi sedikitnya 134 kali gempa bumi dengan magnitudo $M > 5.0$ sepanjang tahun 2010–2019. Pada saat gempa bumi terjadi, gelombang seismic akan bergerak dengan cepat melalui kerak bumi. Gelombang seismic yang telah sampai ke permukaan tanah akan menghasilkan getaran. Kekuatan dan durasi getaran di suatu lokasi akan bergantung pada lokasi terjadinya, karakteristik lokasi dan ukuran gempa. Akibat dari getaran gempa dapat mengakibatkan bahaya lainnya atau *secondary fault* (Kramer, 1996).

1.3. Likuifaksi

Untuk dapat memahami likuifaksi, diperlukan pengenalan kondisi yang terdapat pada tanah sebelum terjadinya gempa. Tanah terdiri dari partikel-partikel yang menyusunnya. Jika dilihat lebih dekat maka akan terlihat bahwa setiap partikel berhubungan dengan partikel lainnya, karena adanya gaya berat dari partikel tanah, maka terjadi gaya antar partikel. Gaya inilah yang membuat setiap partikel tanah dapat berada tetap pada posisinya (Hatmoko, 2016).

Likuifaksi terjadi apabila suatu pasir tersaturasi strukturnya terpecah akibat adanya pembebanan yang berlebihan dan terus menerus, karena strukturnya hancur maka partikel-partikel penyusun pasir tersebut akan bergerak dan cenderung membentuk suatu konfigurasi yang lebih keras dan pada saat terjadinya gempa air yang berada pada pori-pori tanah berpasir tidak sempat mengalir keluar dan terperangkap sehingga partikel-partikel tanah tidak dapat bergerak dan merapat untuk membentuk konfigurasi yang lebih padat. Dengan adanya pembebanan akibat gempa, tekanan air di dalam tanah akan meningkat sehingga memperkecil gaya antar partikel tanah sehingga kekuatan tanahnya menjadi menurun (Ikhsan, 2011).

Menurut Day (2002), beberapa faktor yang mempengaruhi likuifaksi ketika terjadi gempa adalah:

a. Kepadatan tanah

Semakin besar nilai *relative density* (D_r) maka akan semakin besar tahanannya terhadap bahaya likuifaksi. Likuifaksi pada umumnya terjadi pada tanah yang bergradasi seragam (*uniformly graded soil*). Sementara tanah bergradasi baik (*well graded soil*) umumnya mempunyai tahanan terhadap likuifaksi lebih besar dibandingkan dengan tanah yang bergradasi buruk (*poor graded soil*). Hal ini disebabkan oleh partikel-partikel kecil yang terdapat pada tanah bergradasi baik akan mengisi rongga yang ada di antara partikel yang besar, sehingga potensi untuk mengalami perubahan volume pada kondisi teraliri akan menjadi lebih kecil akibat *undrained loading*.

b. Umur dari deposit

Semakin tua umur dari deposit tersebut akan semakin besar tahanannya terhadap bahaya likuifaksi. Hal ini disebabkan antara lain karena adanya proses sementasi antara partikel. Gradasi partikel

c. Nilai *over consolidation ratio* (OCR)

Semakin besar nilai OCR maka semakin besar nilai K_0 yang mana akan menaikkan tegangan efektif rata-rata tanah (σ'_{av}). Tahanan terhadap likuifaksi akan meningkat dengan meningkatnya tegangan efektif, sebagai akibatnya suatu daerah dimana air mukanya tinggi atau dekat ke permukaan akan lebih mudah mengalami proses likuifaksi dibandingkan dengan daerah dimana muka air terdapat pada posisi yang cukup dalam dari permukaan.

d. Bentuk dari partikel

Tanah dengan partikel yang berbentuk bundar akan lebih mudah mengalami likuifaksi dibandingkan dengan partikel bersudut. Hal ini disebabkan tanah dengan partikel berbentuk bundar lebih mudah untuk dipadatkan.

1.4. Metode Analisa Potensi Likuifaksi

Dalam menganalisis potensi likuifaksi dapat dilakukan dengan dua cara yaitu dengan metode perhitungan data dari SPT dan CPT, dengan mencari nilai faktor keamanan dari hasil perbandingan nilai CRR (*Cyclic Resistance Ratio*) yaitu nilai yang mencerminkan kekuatan tanah terhadap beban siklis yang biasanya diakibatkan oleh beban gempa bumi dengan CSR (*Cyclic Stress Ratio*) yaitu nilai tegangan yang disebabkan oleh gempa bumi. Nilai faktor keamanan dapat dicari dengan persamaan dari Youd-Idriss (2001) seperti pada Persamaan (1).

$$SF = \frac{CRR}{CSR} \quad (1)$$

dimana :

Jika $SF < 1$ (terjadi likuifaksi)

Jika $SF = 1$ (kondisi kritis)

Jika $SF > 1$ (tidak terjadi likuifaksi)

a. Metode Evaluasi CSR

Nilai CSR dapat dicari dengan persamaan dari Seed-Idriss (1971) seperti pada Persamaan (2).

$$CSR = 0,65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma'_{v}}{\sigma'_{v0}} \right) \cdot rd \quad (2)$$

dimana :

a_{max} = percepatan tanah maksimum akibat gempa (g)

g = gravitasi bumi (m/s^2)

σ'_{v} = tegangan vertical total (kN/m^2)

σ'_{v0} = tegangan efektif (kN/m^2)

rd = koefisien tegangan reduksi.

Koefisien reduksi tegangan menunjukkan fleksibilitas profil tanah. Berikut adalah modifikasi minor analisis CSR. Untuk keperluan praktis, persamaan (3) dan (4) dapat digunakan untuk mengestimasi harga rerata rd (Whitmann, 1986).

$$rd = 1,0 - 0,00765z \quad (\text{untuk } z < 9,15 \text{ m}) \quad (3)$$

$$rd = 1,174 - 0,0267z \quad (\text{untuk } z > 9,15 \text{ m}) \quad (4)$$

b. Metode Evaluasi CRR

Untuk menghitung CRR dengan besar magnitude gempa selain 7.5 diperlukan faktor koreksi yang disebut *magnitude scaling factor* (MSF). Nilai CRR dapat dicari dari persamaan Seed (1983) seperti pada Persamaan (5).

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

di mana:

CRR = nilai ketahanan terhadap gempa dengan magnitude lebih besar atau lebih kecil dari 7,5

$CRR_{7,5}$ = ketahanan terhadap gempa pada magnitude 7,5

MSF = faktor pengali magnitude gempa (*magnitude scaling factor*)

K_{σ} = nilai faktor koreksi lapisan tanah akibat tekanan geser statis

K_{α} = nilai faktor koreksi lapisan tanah akibat tekanan normal statis

c. Faktor Skala Magnitudo

Nilai MSF (*Magnitudo Scaling Factor*) adalah besaran yang menyatakan besarnya energi seismik yang dipancarkan oleh sumber gempa. Seed dan Idriss (1981) mendapatkan nilai MSF untuk magnitude lebih kecil dari 7.5 dengan Persamaan (6).

$$MSF = \frac{10^{2,24}}{2,56} \quad (6)$$

di mana:

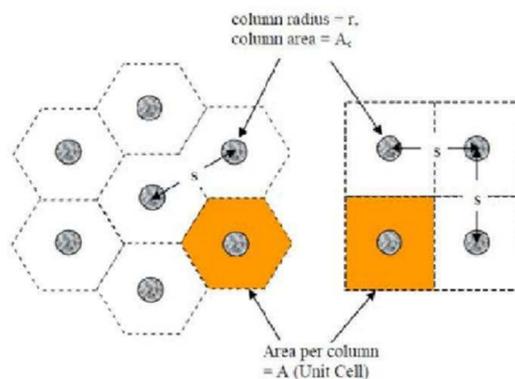
M_w = nilai magnitude gempa

MSF = faktor pengali magnitude gempa

1.5. Analisa dengan metode Stone Column

Stone column sangat efektif untuk meningkatkan daya dukung dan stabilitas lereng, menurunkan total dan *differential settlement*, meningkatkan laju waktu penurunan konsolidasi dengan sistem drainase pada tanah kohesif dan mengurangi potensi likuifaksi pada tanah non kohesif (Barksdale and Bachus, 1983).

Unit cell adalah silinder dengan diameter ekuivalen yang meliputi satu *stone column* dan daerah pengaruh dari *stone column* tersebut, dapat dilihat pada Gambar 2. Saat sebuah grup *stone column* dengan panjang tak terbatas memikul beban merata, setiap interior kolom dapat dianggap *unit cell* (Barksdale and Bachus, 1983).



Gambar 2. Unit Cell Grup Stone Column
(Cabe, 2007)

Barksdale and Bachus (1983), untuk bentuk penampang *unit cell* (pola persegi dan pola segitiga sama sisi) dapat dicari dengan bentuk lingkaran dengan D_c (diameter ekuivalen) menggunakan Persamaan (7) dan (8).

$$D_c = 1,05 \times s \text{ (pola segitiga)} \quad (7)$$

$$D_c = 1,13 \times s \text{ (pola persegi)} \quad (8)$$

dimana s adalah jarak antar *stone column*.

Menurut Priebe (1995), kemampuan material *stone column* ini memiliki pengaruh reduksi terhadap *basic improvement factor* (n_0) sehingga menghasilkan nilai reduksi (n_1) seperti pada Persamaan (9)..

$$n_1 = 1 + \frac{\sigma_c}{\sigma} \left[\frac{5 - \frac{\sigma_c}{\sigma}}{4 \frac{\sigma_c}{\sigma} (1 - \frac{\sigma_c}{\sigma})} - I \right] \quad (9)$$

Saat mengalami pembebanan, total penurunan yang terjadi baik pada *stone column* maupun tanah di sekitarnya adalah sama. Oleh sebab itu diketahui bahwa tegangan yang terjadi terkonsentrasi lebih pada *stone column* yang akan mereduksi tegangan *overburden* total dan juga di sisi lain meningkatkan tahanan tanah (*cyclic resistance ratio*) sebagai efek densifikasi tanah.

$$FS' = \frac{\sigma_c}{\sigma} \times n \quad (10)$$

dimana FS' merupakan besarnya faktor keselamatan setelah pemasangan *stone column*.

2. METODE PENELITIAN

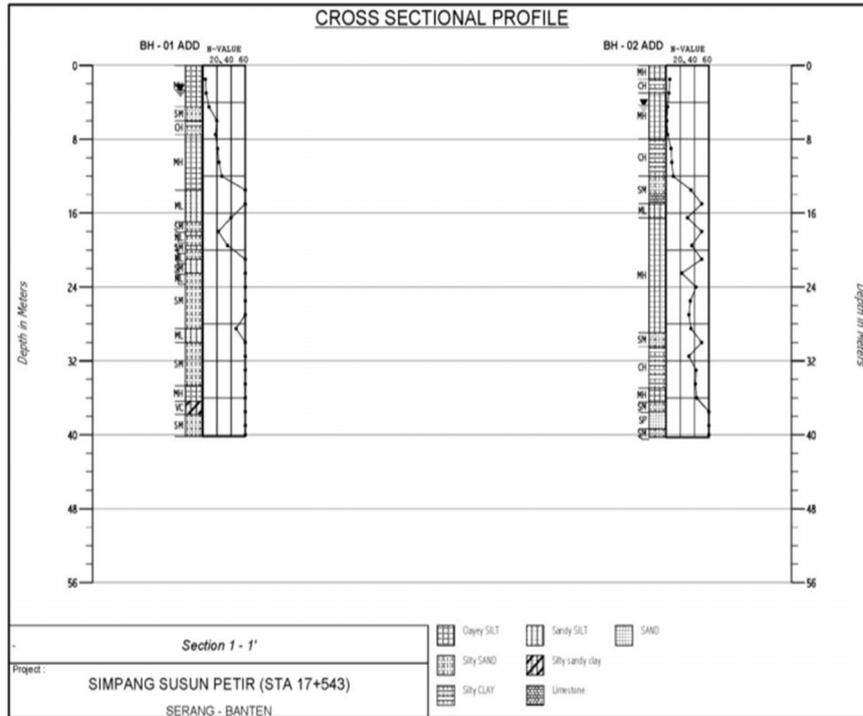
Penelitian ini dilakukan untuk menganalisis besarnya *safety factor* mengestimasi potensi likuifaksi daerah studi kasus dan mengetahui berapa besar perubahan yang terjadi pada lapisan yang dipasang *stone column* sebagai metode perbaikan tanah di Proyek Tol Serang–Panimbang STA.17+543 dengan menggunakan 5 titik sampel yaitu (BH-01, BH-02, BH-03, BH-01 ADD & BH-02 ADD).

Metode yang digunakan dalam penelitian ini terbagi dalam beberapa tahap yaitu itu melakukan pengumpulan data parameter tanah yakni berat jenis tanah dan SPT sebagai *input* data pada NERA untuk mengetahui nilai percepatan tanah dasar dengan menggunakan data *response spectra* wilayah Banten yang telah dianalisa (Farhan, 2018) dengan metode PSHA yang kemudian data tersebut diinput ke *PEER Strong Motion Database* sehingga didapatkan nilai *time histories* pada daerah studi kasus dan nilai akselerasi maksimum, selanjutnya data tersebut akan digunakan sebagai data acuan untuk potensi likuifaksi yang terjadi pada daerah studi kasus untuk mengetahui apakah perlu dilakukan perbaikan tanah atau tidak perlu dilakukan, apabila perlu perbaikan tanah maka kita bisa mendesain dan menganalisis penggunaan *stone column*.

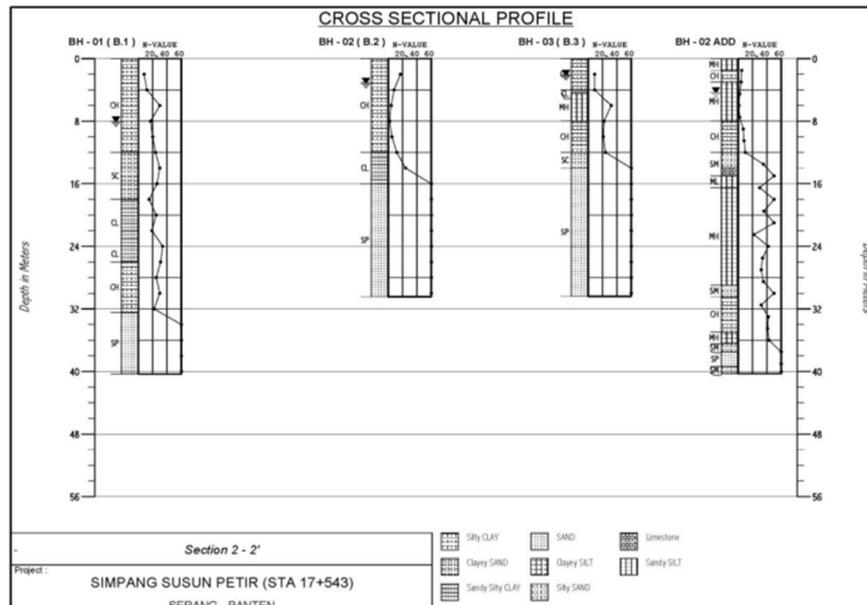
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1. Penentuan Karakteristik Tanah

Suatu deposit tanah pada suatu lokasi memiliki karakteristik yang berbeda di setiap lapisannya. Parameter perbedaan karakteristik tanah dapat dilihat dari berat jenis, kondisi tanah (jenuh atau tidak jenuh), penggolongan jenis tanah maupun *shear wave velocity*. Berdasarkan hasil uji SPT pada gambar 3 dan gambar 4, Tipikal tanah pada lokasi penelitian didominasi oleh jenis tanah pasir (*sand*) dan tanah pasir berlanau (*silty sand*).



Gambar 3. Hasil Uji SPT (Cross Sectional Profile pada Section 1-1')



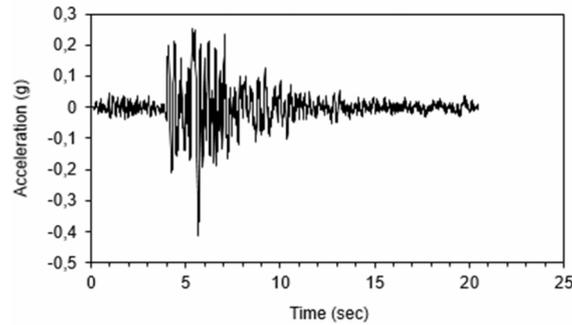
Gambar 4. Hasil Uji SPT (Cross Sectional Profile pada Section 2-2')

3.2. Data Response Spectra Gempa

Untuk mencari data gempa pencarian data menggunakan *PEER Strong Motion Database* dengan parameter mengacu ke penelitian yang telah dilakukan (Farhah, 2018) yang menggunakan metode PSHA didapatkan data kejadian gempa yang mendekati kejadian gempa di Banten yaitu pada kejadian gempa dengan *range interval* magnitudo 6,885 – 7,755 berada di nilai percepatan gempa berada di nilai $T = 0,01$ detik yaitu sebesar 0,142 g.

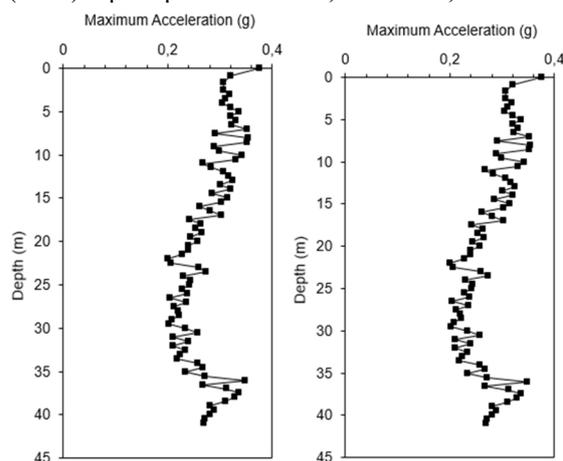
3.3. Percepatan Gempa di Permukaan

Dalam penelitian ini untuk mencari nilai percepatan gempa penulis menggunakan *software* NERA, nilai akselerasi maksimum pada sub-layer 1 merupakan nilai percepatan gempa di permukaan (*peak ground acceleration*). Berdasarkan hasil analisa didapatkan nilai PGA sebesar 0,3763 g. Grafik *ground motion* sintetik yang dijadikan input dalam NERA dapat dilihat pada Gambar 5.

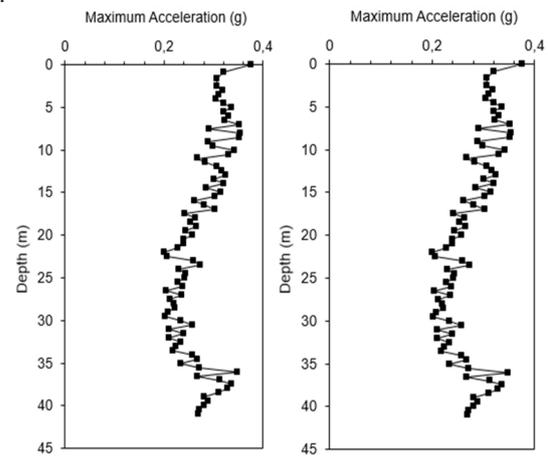


Gambar 5. *Ground Motion*

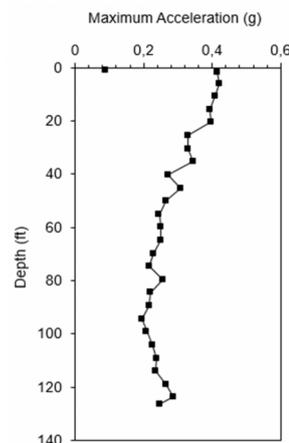
Setelah melakukan analisa dengan program NERA maka didapatkan *output* profil percepatan batuan dasar (PGA) seperti pada Gambar 6, Gambar 7, dan Gambar 8.



Gambar 6. Profil Percepatan BH-01 dan BH-02



Gambar 7. Profil Percepatan BH-03 dan BH-01 ADD



Gambar 8. Profil Percepatan BH-02 ADD

3.4. Safety Factor

Faktor keselamatan (SF) adalah perbandingan antara nilai *cyclic resistance ratio* (CRR) dengan *cyclic stress ratio* (CSR). Nilai SF lebih besar dari satu menunjukkan bahwa tahanan yang dimiliki tanah cukup untuk menahan beban siklik sehingga likuifaksi tidak terjadi. Sehingga nilai SF kurang dari dan sama dengan satu menunjukkan bahwa tahanan yang dimiliki tanah tidak cukup untuk menahan pembebanan siklik

yang terjadi sehingga likuifaksi terjadi. Berdasarkan hasil analisa didapatkan nilai SF yang dapat dilihat pada Tabel 1. Dan grafiknya dapat dilihat pada Gambar 10 hingga Gambar 14.

Tabel 1. Potensi Likuifaksi di setiap titik

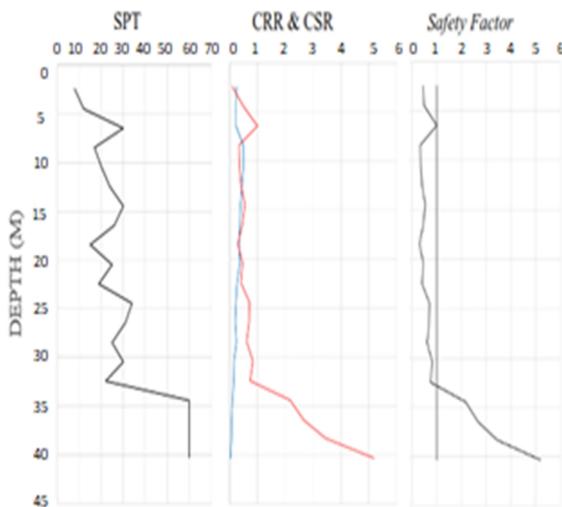
Titik	h (m)	SF	Potensi
BH-01	32,45	0,739	L
BH-02	14,45	0,432	L
BH-03	14,07	0,271	L
BH-01 ADD	18,45	0,417	L
BH-02 ADD	17,00	0,544	L

Keterangan :

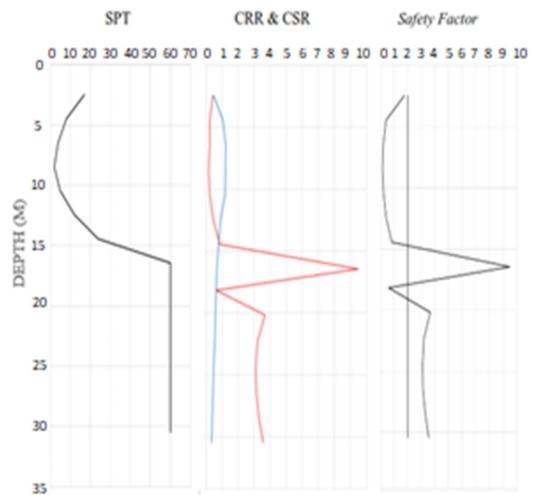
L = Berpotensi likuifaksi



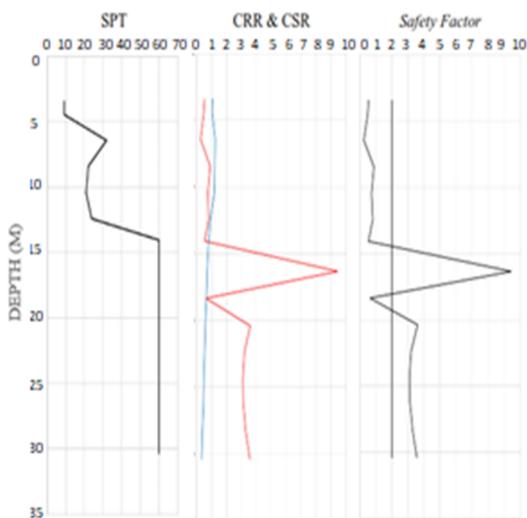
Gambar 9. Daerah Potensi Likuifaksi



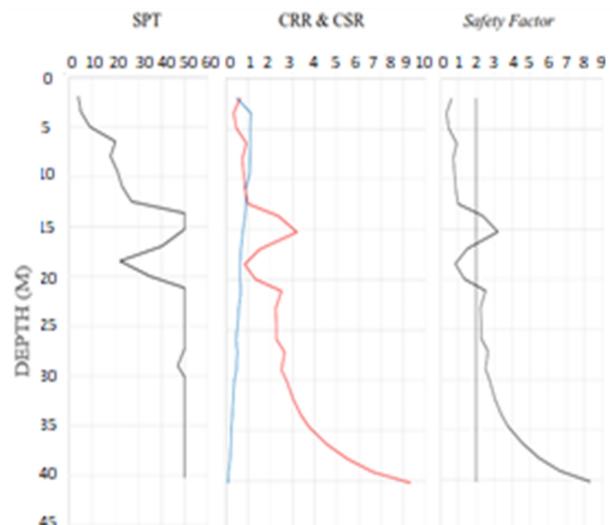
Gambar 10. Analisa Likuifaksi BH-01



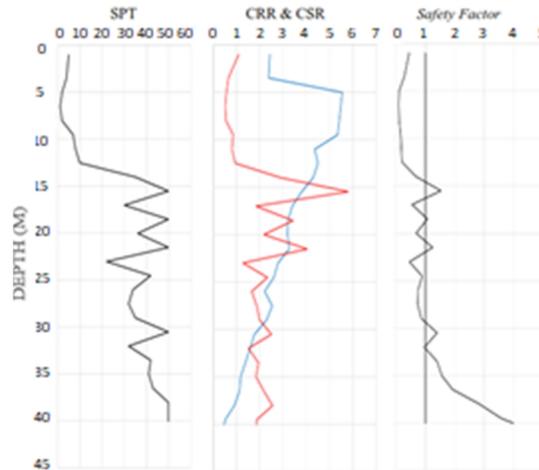
Gambar 11. Analisa Likuifaksi BH-02



Gambar 12. Analisa Likuifaksi BH-03



Gambar 13. Analisa Likuifaksi BH-01 ADD



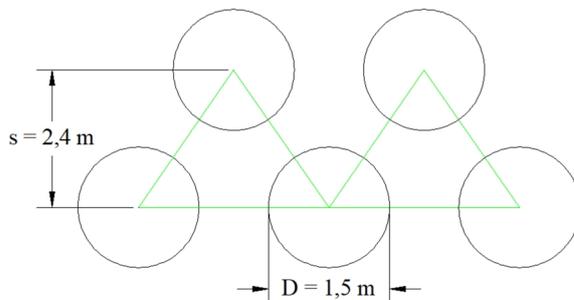
Gambar 14. Analisa Likuifaksi BH-02 ADD

3.5. Desain Stone Column

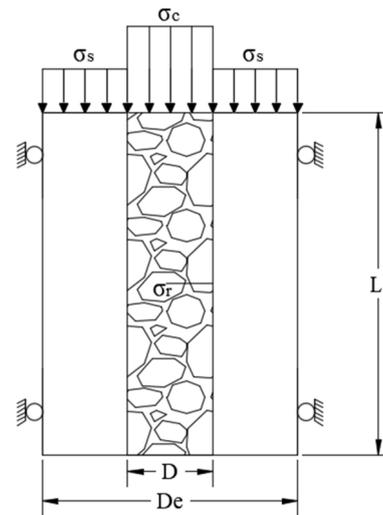
Dalam perencanaan desain *stone column* agar nilai *safety factor* meningkat maka perlu dilakukan *trial and error* dalam penentuan perencanaan diameter serta spasi yang digunakan.

3.6. Preliminary Design

- Diameter (D) = 1,5 m
- Spasi (S) = 2,4 m
- Pola pemasangan = Segitiga sama sisi

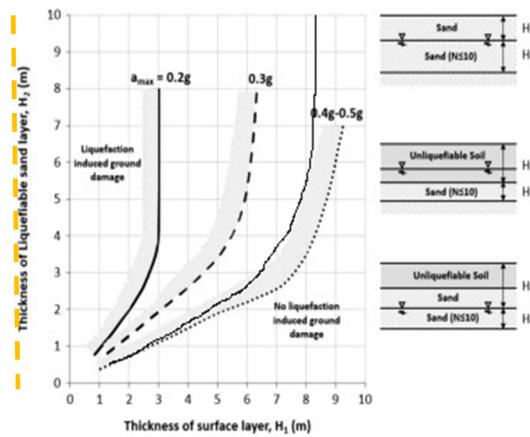


Gambar 15. Konfigurasi Stone Column



Gambar 16. Unit Cell Stone Column

σ_0 merupakan beban dari struktur yang diterima tanah, σ_c merupakan tegangan yang akan diterima oleh *stone column* akibat beban dari struktur, σ_r merupakan tegangan *radial stress* yang akan diberikan oleh tanah di sekitar *stone column* sebagai tahanan horizontal akibat kontribusi dari tegangan tanah vertikal yang diterima tanah di sekitar *stone column*, D merupakan diameter dari *stone column*, D_e merupakan diameter ekuivalen (pengaruh) dari satu *stone column* terhadap daerah sekitar dan L merupakan kedalaman dari *stone column*. Untuk mendesain kedalaman *stone column* pada tanah berpotensi likuifaksi dapat dilakukan dengan pendekatan grafik Ishihara (1985). Pada grafik ini evaluasi potensi likuifaksi pada suatu lapisan bergantung pada ketebalan lapisan yang tidak terlikuifaksi diatas lapisan tanah yang terlikuifaksi. Dari grafik pada Gambar 17. kemiringan kurva untuk $a_{max} = 0.3767$ g, tebal lapisan tanah yang perlu diperbaiki adalah 8.5 meter.



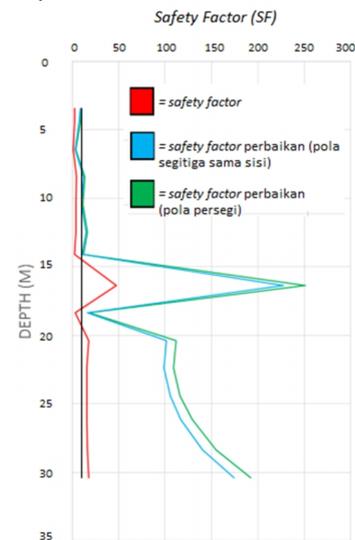
Gambar 17. Mitigasi Potensi Likuifaksi berdasarkan Lapisan terlikuifaksi (Ishihara, 1985)

3.7. Safety Factor Perbaikan

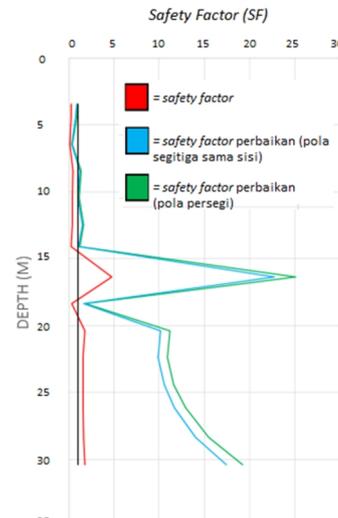
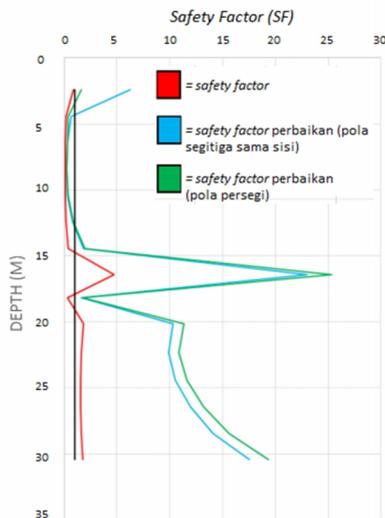
Berdasarkan hasil perhitungan perbaikan tanah menggunakan *stone column* nilai *safety factor* meningkat pada layer 11 yang semula nilai SF 0,544 menjadi 1,004. Hasil perhitungan dapat dilihat pada Tabel 2. Dan grafik SF perbaikan ditunjukkan pada Gambar 18 sampai Gambar 22.

Tabel 2. Nilai *Safety Factor* Setelah Pemasangan *Stone Column*

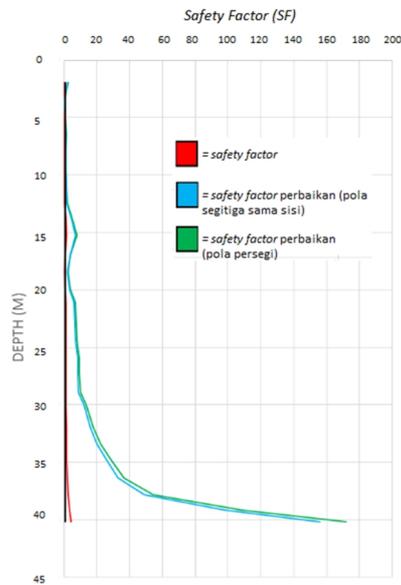
Titik	h (m)	SF	SF (setelah perbaikan)
BH-01	32,45	0,739	9,427
BH-02	14,45	0,432	2,005
BH-03	14,07	0,271	1,241
BH-01 ADD	18,45	0,417	2,400
BH-02 ADD	17,00	0,544	1,004



Gambar 18. SF Pebaikan di BH-01

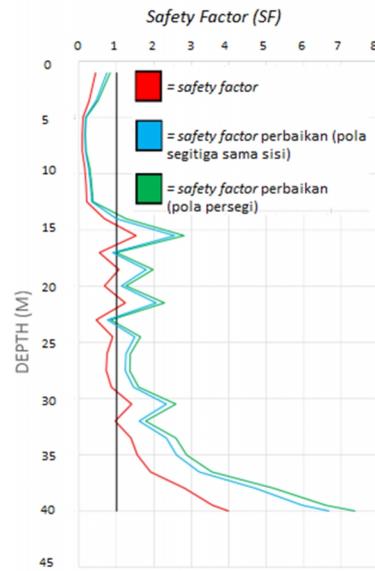


Gambar 19. SF Pebaikan di BH-02



Gambar 21. SF Pebaikan di BH-01 ADD

Gambar 20. SF Pebaikan di BH-03



Gambar 22. SF Pebaikan di BH-02 ADD

Hasil analisis likuifaksi menunjukkan bahwa lokasi studi kasus memiliki potensi likuifaksi pada kedalaman 14.07 m, 14.45 m, 17.00 m, 18.45 m dan 32.45 m. Pemasangan *stone coloumn* pola segitiga sama sisi dengan diameter 1.5 m dan spasi antar kolom 2.4 m dapat mengurangi potensi likuifaksi dan mampu meningkatkan nilai faktor keamanan di lokasi studi kasus. Pada BH-01 SF meningkat dari 0.739 menjadi 9.472, pada BH-02 SF meningkat dari 0.432 menjadi 2.005, pada BH-03 SF meningkat dari 0.271 menjadi 1.241, Pada BH-01 ADD SF meningkat dari 0.417 menjadi 2.400 dan pada BH-02 ADD SF meningkat dari 0.544 menjadi 1.004.

4. KESIMPULAN

Karakteristik tanah pada lokasi studi kasus memiliki nilai potensi likuifaksi pada kedalaman 14.07 m, 14.45 m, 17.00 m, 18.45 m dan 32.45 m. Berdasarkan hasil analisa NERA didapatkan nilai percepatan gempa di permukaan sebesar 0,3767g. Kondisi kedalaman tanah yang perlu diperbaiki dengan metode Ishihara (1985) adalah 8,5 m dengan konfigurasi *stone coloumn* pola segitiga sama sisi, diameter 1.5 m dan spasi antar kolom 2.4 m dapat mengurangi potensi likuifaksi, nilai faktor keamanan mengalami peningkatan dari rentang nilai 0,217 – 0,739 menjadi 1,004 – 9,427.

5. DAFTAR PUSTAKA

- Barksdale, R.D., and Bachus, R.C. (1983). *Design and Construction of Stone Columns Volume I*, Publication No. FHWA-RD-83-026.
- BNPB. (2019). *Data Informasi Bencana Indonesia (DIBI) (Internet)*. Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- Cabe, B. A. (2007). *Ground Improvement Using The Vibro-Stone Column Techniqe*. Department of Civil Engineering, National University of Ireland, Galway.
- Das, B. M. (1995). *Mekanika Tanah (Prinsip - Prinsip Rekayasa Geoteknis)*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Day, R. W. (2012). *Geotechnical Earthquake Engineering Handbook –With The 2012 International Building Code, 2nd Edition*. The McGraw-Hill Companies, Inc. United States.
- Farhah, A. (2018). *Analisis Site Spesific Response Spectra Gempa Wilayah Tangerang*. Cilegon : Universitas Sultan Ageng Tirtayasa.
- Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.
- Hatmoko, J. T. (2016). *Dinamika Tanah dan Liquefaction*. Yogyakarta: Cahaya Atma Pustaka.
- Ikhsan, R. (2011). *Analisis Potensi Likuifaksi dari Data CPT dan SPT dengan Studi Kasus PLTU Ende Nusa Tenggara Timur*. Depok : Universitas Indonesia.
- Ishihara, K. (1985). *Stability of Natural Deposits During Earthquakes. Proc. of the 11 th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, San Francisco, 1:321-376
- Kramer, S.L. (1996) . *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 653.
- Marcuson, W. F., & Wahls, H. E. (1978). Effects of time on damping ratio of clays. In *Dynamic geotechnical testing*. ASTM International.

- Mina, E., Kusuma, R.I., & Sudirman, S. (2018). Analisa Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data SPT (Studi Kasus Proyek Pembangunan Gedung Baru UNTIRTA Sindang Sari. *Jurnal Fondasi*, 7 (1), 1-11.
- Priebe, H. J. (1995). The design of vibro replacement. *Ground engineering*, 28(10), 31.
- Seed, H. B. (1981). Earthquake-resistant design of earth dams.
- 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.
- Sunarjo, Gunawan, M. T., Pribadi, S. (2010). *Gempa Bumi Edisi Populer*, BMKG, Jakarta.