

Pengaruh Diameter dan Jarak *Stone Column* Terhadap Perkuatan Tanah Dasar Timbunan Di Proyek Jalan Tol Yogyakarta Bawen Seksi I PAKET I STA 71+875 – 72+100

Bayu Wintoro¹, Dea Yudistia^{*2}, Nadia Yuliandri Putri³, Andri Krisnandi Somantri⁴

^{1,2,3,4}Jurusan Teknik Sipil, Politeknik Negeri Bandung, Bandung

E-mail: *dea.yudistia.tksi22@polban.ac.id

Abstrak

Pulau Jawa menjadi pusat perekonomian di Indonesia dan memiliki kepadatan penduduk yang tinggi sehingga Pulau Jawa membutuhkan sarana dan prasana yang memadai, sehingga dibutuhkanlah jalan tol sebagai infrastruktur transportasi untuk menunjang perekonomian masyarakat Pulau Jawa. Namun ada beberapa permasalahan seperti permasalahan pada tanah dapat mengganggu jalan tol itu sendiri. Penelitian ini dilakukan di Proyek Jalan Tol Yogyakarta – Bawen STA 71+875 - 72+100 yang dimana lokasi tersebut didominasi dengan pasir lepas, muka air yang tinggi, dan memiliki riwayat kegempaan 6,3 Mw sehingga dilakukan analisis potensi terjadinya likuifaksi dan terindikasi berpotensi terjadinya likuifaksi sampai kedalaman 16 meter dengan menggunakan analisis metode Seed, Martin, Lysmer (1975). Berdasarkan kasus tersebut dilakukan perkuatan tanah dengan menggunakan metode stone column yang dapat meningkatkan daya dukung serta nilai faktor keamanan stabilitas lereng timbunan. Analisis stabilitas lereng timbunan dilakukan dengan menggunakan software elemen hingga 2D. Nilai daya dukung tanah dasar sebelum adanya perkuatan adalah 140,95 kN/m² dengan nilai SF adalah 0,62. Daya dukung pada stone column tunggal adalah 753 kN/m² dengan SF adalah 3,36. Perkuatan tanah menggunakan stone column dilakukan dengan memvariasikan diameter serta jarak antar stone column yaitu D0,5 S2; D0,5 S1,5; D0,4 S2; D0,4 S1,5 dengan kedalaman 16 meter. Tujuan adanya perkuatan tanah tersebut untuk mendapatkan hasil penurunan tanah yang kecil dan nilai faktor keamanan meningkat dari sebelum adanya perkuatan tanah.

Kata kunci: Daya Dukung, Likuifaksi, Perkuatan Tanah, Stabilitas Lereng, Stone Column.

Abstract

Java Island is the center of the economy in Indonesia and has a high population density so that Java Island needs adequate facilities and infrastructure, so a toll road is needed as a transportation infrastructure to support the economy of the people of Java Island. However, there are several problems such as problems with the soil that can interfere with the toll road itself. This research was conducted at the Yogyakarta - Bawen Toll Road Project STA 71+875 - 72+100 where the location is dominated by loose sand, high water table, and has a history of 6.3 Mw seismicity so that an analysis of the potential for liquefaction and indicated the potential for liquefaction to a depth of 16 meters using the Seed, Martin, Lysmer (1975) method analysis. Based on this case, soil reinforcement is carried out using the stone column method which can increase the bearing capacity and the safety factor value of the embankment slope stability. The embankment slope stability analysis was performed using 2D finite element software. The bearing capacity of the subgrade before reinforcement was 140.95 kN/m² with SF value of 0.62. The bearing capacity of a single stone column was 753 kN/m² with SF of 3.36. Soil reinforcement using stone columns was carried out by varying the diameter and distance between stone columns,

namely D0.5 S2; D0.5 S1.5; D0.4 S2; D0.4 S1.5 with a depth of 16 meters. The purpose of soil reinforcement is to get the results of small soil settlement and the value of the safety factor increases from before soil reinforcement.

Keywords: Supportability, Liquefaction, Soil Reinforcement, Slope Stability, Stone Column.

1. PENDAHULUAN

Proyek Pembangunan Jalan Tol Yogyakarta – Bawen ini berada dekat dengan beberapa patahan, termasuk Sesar Merapi dan Sesar Opak yang memiliki panjang sekitar 35-40 km. Sesar Opak menjadi perhatian setelah gempa Yogyakarta pada bulan Mei 2006 dengan magnitudo 6,3 Mw yang memicu likuifaksi.

Pembangunan Proyek Jalan Tol Yogyakarta - Bawen rentan terhadap terjadinya likuifaksi karena letaknya dekat dengan zona subduksi antara Lempeng Indo-Australia dan Lempeng Eurasia serta patahan kecil lainnya. Pergerakan tektonik lempeng tersebut dapat saling bertabrakan yang memungkinkan terjadinya likuifaksi (Prayitno & Artati Hanindya, 2021). Likuifaksi adalah suatu proses berubahnya sifat tanah dari keadaan padat menjadi cair yang disebabkan oleh beban siklik pada waktu terjadinya gempa bumi (Somantri et al., 2021). Lokasi ini didominasi dengan lapisan tanah berpasir (*loose*) dan muka air tanah yang tinggi, kondisi tersebut rentan terhadap terjadinya potensi likuifaksi (Kevin & Muhrozi, 2023).

Dengan kondisi geografis tersebut, dibutuhkan suatu pekerjaan perkuatan tanah. Salah satu pekerjaan untuk perkuatan tanah yang akan digunakan adalah *stone column*. Selain untuk mencegah terjadinya likuifaksi, *stone column* juga dapat meningkatkan daya dukung dan stabilitas lereng pada timbunan (Soesilo & Warman, 2024). Metode pelaksanaannya yakni dengan metode *vibro replacement*, yaitu dengan cara memasukkan alat *compaction probe* kedalam tanah lalu diisi dengan batu pecah dan digetarkan sampai memadat. Sehingga terbentuklah kolom didalam lapisan tanah. Panjang *stone column* yang digunakan biasanya kurang lebih 15-25 meter (Kamila et al., 2022). Analisis yang dilakukan pada penelitian ini yaitu memvariasikan diameter dan jarak antar *stone column* sehingga dapat diketahui pengaruh diameter dan jarak *stone column* terhadap penurunan tanah, peningkatan daya dukung tanah, dan peningkatan faktor keamanan pada perkuatan tanah dasar timbunan.

2. METODE PENELITIAN

Metodologi yang digunakan dalam penelitian ini dimulai dengan identifikasi permasalahan mengenai kondisi tanah yang akan diperkuat. Setelah permasalahan diidentifikasi, penelitian ini dilakukan di Proyek Jalan Tol Yogyakarta – Bawen Seksi 1 Paket 1 STA 71 + 875 – 72 + 100 dengan menggunakan data sekunder yang mencakup data gambar (*cross section* dan *plan*), data tanah hasil pengeboran sebanyak 3 titik data pengeboran dan uji laboratorium, serta informasi mengenai data timbunan. Referensi standar yang digunakan meliputi SNI 1726:2019 dan SNI 8460:2017.

Data yang telah diperoleh akan diolah untuk membuat stratigrafi tanah dan menentukan parameter tanah yang akan digunakan. Setelah itu, dilakukan analisis terhadap potensi likuifaksi di

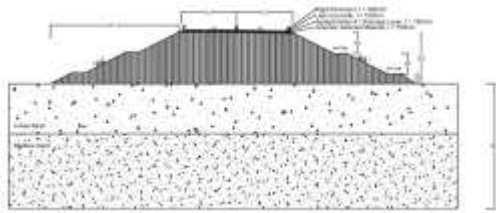
area penelitian. Apabila hasil analisis menunjukkan nilai *safety factor* (SF) lebih dari 1,1 maka dilakukan analisis terhadap daya dukung tanah. Jika hasil nilai analisis daya dukung tanah melebihi 3 maka proses dilanjutkan dengan analisis stabilitas lereng dan penurunan menggunakan *software* elemen hingga 2D. Selanjutnya, bila nilai SF hasil analisis stabilitas dan penurunan lebih dari 1,5, maka dilakukan pembahasan yang kemudian dilanjutkan dengan penyusunan kesimpulan dan saran sebagai akhir dari proses penelitian.

Apabila hasil analisis pada salah satu tahap menunjukkan nilai SF di bawah kriteria yang ditentukan, maka perlu dilakukan pemodelan perkuatan tanah dengan metode *stone column* menggunakan *software* elemen hingga 2D. Dalam tahap ini, dilakukan variasi terhadap diameter dan jarak antar *stone column*, baik tanpa maupun dengan penggunaan geotekstil, untuk mendapatkan konfigurasi yang paling efektif dalam meningkatkan stabilitas dan daya dukung tanah.

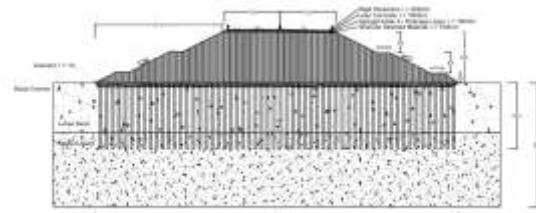
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Pemodelan

Sketsa pemodelan yang dilakukan menggunakan *software* elemen hingga 2D dapat dilihat pada **Gambar 1** dan **Gambar 2** yaitu dilakukan pemodelan pada kondisi sebelum adanya perkuatan tanah dan setelah adanya perkuatan tanah menggunakan *stone column*. *Stone column* merupakan merupakan kolom-kolom vertikal dari material batu pecah (*crushed stone*) yang dipadatkan, kriteria batu pecah yang digunakan harus keras, bersih, dan tidak terganggu dari material organik, sampah, kotoran atau material lain yang bersifat merusak (Suroso et al., n.d.). Data tanah yang didapatkan dari N-SPT dikorelasikan dengan parameter tanah lainnya.



Gambar 1. Pemodelan Tanpa Perkuatan Tanah



Gambar 2. Pemodelan Perkuatan Tanah dengan *Stone Column*

Pada penelitian ini akan memvariasikan diameter serta jarak antar *stone column*. Spasi dan diameter *stone column* ditentukan terhadap luas area *stone column*, diameter ekuivalen dan luas area cell, yang di tentukan persamaan sebagai berikut:

$$A_c = \frac{\pi D^2}{4} \quad A = \frac{\pi D_e^2}{4}$$

De = 1,13. S ; untuk pola persegi

Dimana:

D = Diameter kolom

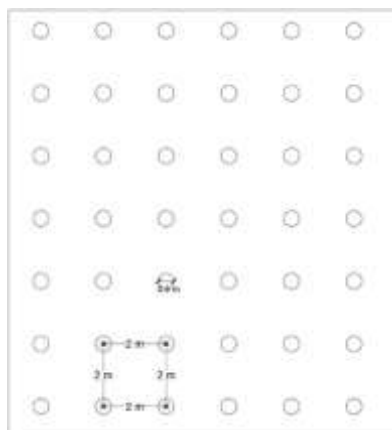
De = Diamater efektif berdasarkan pola (persegi)

S = Jarak antar *Stone column*

Pola pemasangan *stone column* ada pola segitiga dan persegi. Pola pemasangan yang digunakan pada penelitian ini yaitu pola persegi karena dalam konstruksi pelaksanaannya pola segi empat lebih mudah pemasangan di lapangan sedangkan pola segitiga lebih stabil dan seragam

penurunan tanahnya. Berikut gambar pola pemasangan *stone column* pada penelitian ini ditunjukkan pada **Gambar 3**.

Pemodelan *stone column* pada penelitian ini menggunakan metode *plane strain* sebagai pendekatan alternatif dari metode *axisymmetric* (3D) ke dalam bentuk dua dimensi (2D). Model regangan bidang atau *plane strain* digunakan untuk model geometri dengan penampang melintang yang kurang lebih seragam dengan kondisi tegangan dan kondisi pembebanan yang cukup panjang dalam arah tegak lurus terhadap penampang tersebut (arah z) (Iskandar et al., 2016)



Gambar 3. Pola Pemasangan Segi Empat *Stone Column*

3.2 Parameter

Disajikan pada **Tabel 1** parameter tanah dan **Tabel 2** parameter *stone column* yang akan diinputkan dalam pemodelan menggunakan *software* elemen hingga 2D. Parameter tersebut digunakan dalam pemodelan *stone column* dengan metode *plane strain* sebagai alternatif dari metode *axisymmetric*.

Tabel 1. Parameter Tanah

Kedalaman (m)	Lapisan	N-SPT	c' (kN/m ²)	ϕ'	E	μ	γ_{sat}	γ_{unsat}
0,00-12,00	Loose Sand	5,833	5	34,292	7291,667	0,3	18,375	17,375
12,00-30,00	Medium Sand	18,981	6	36,830	13981,481	0,3	19,796	18,796

Tabel 2. Parameter *Stone column*

Pemodelan	Kedalaman (m)	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{unsat} (kN/m ³)	c (kN/m ²)	ϕ °	E (kN/m ²)	μ
<i>Stone column</i>	0,00-16,00	21	20	5	42	45000	0,2

3.3 Pembebanan

Pada penelitian, pembebanan perlu diperhitungkan meliputi beban lalu lintas, beban perkerasan, dan beban gempa.

a. Beban Lalu Lintas dan Perkerasan

Beban rencana untuk beban lalu lintas pada analisis stabilitas timbunan adalah 15 kPa karena Proyek Jalan Tol Yogyakarta – Bawen ini termasuk ke dalam status kelas jalan I.

Untuk beban perkerasan di desain dengan jumlah 5 kPa.

b. Beban Gempa

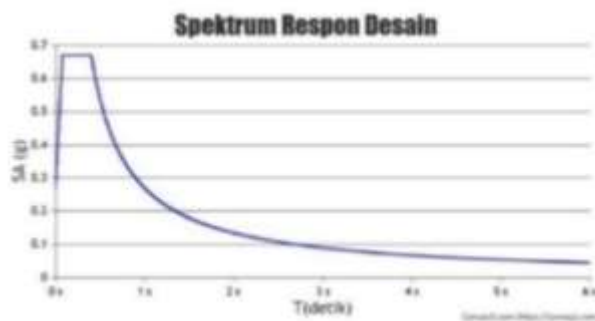
Beban gempa ditambahkan dengan metode pseudostatik karena metode tersebut digambarkan dengan pengaruh gempa percepatan horizontal dan percepatan gempa vertikal sesuai dengan kondisi kelas situs dan pada lokasi ini didapatkan kelas situs tanah sedang (SD). Nilai PGA didapatkan dari desain spektra Indonesia seperti pada **Gambar 4** dengan hasil PGA adalah 0,4905 lalu dikalikan dengan koefisien kelas situs pada tanah sedang (SD), nilai FPGa adalah 1,2.

$$\begin{aligned}PGA_M &= FPGa \times PGA \\ &= 0,58 \text{ g}\end{aligned}$$

Parameter yang digunakan untuk *software* elemen hingga 2D adalah Kh dan Kv dengan perhitungan sebagai berikut.

$$\begin{aligned}K_h &= 0,5 \times PGA_M \\ &= 0,28\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}K_v &= 0,1 \times PGA_M \\ &= 0,058\end{aligned}$$



Gambar 4. Nilai PGA dari Desain Spektra Indonesia

3.4 Analisis Potensi Likuifaksi

Dalam konteks mitigasi terjadinya likuifaksi, desain *stone column* dievaluasi terhadap efeknya meningkatkan konsentrasi tegangan pada tanah (Prasojo & Hendriyawan, n.d.). Metode yang digunakan pada analisis potensi likuifaksi yaitu melalui pendekatan semi-empiris yang mengacu pada metode Seed and Idriss (1971-1982). Pada metode tersebut mempertimbangkan nilai CSR (Cyclic Stress Ratio) dan CRR (Cyclic Resistance Ratio). Cyclic Stress Ratio yang merupakan tegangan siklik yang terjadi akibat gempa dibagi dengan tegangan efektif dan Cyclic Resistance Ratio yang merupakan ketahanan tanah untuk menahan likuifaksi (Tijow et al., 2018). Hasil analisis menunjukkan bahwa potensi likuifaksi yang paling kritis terjadi di kedalaman 0 – 6 meter.

Sebelum menyimpulkan potensi likuifaksi menggunakan metode Seed and Idriss (1971-1982), perlu adanya pertimbangan lainnya dan dilakukan analisis menggunakan metode lainnya yaitu menggunakan metode Seed, Martin, and Lysmer (1975) dengan membandingkan nilai getaran untuk mencapai likuifaksi (N_L) dengan getaran akibat gempa (N_{eq}) apabila N_{eq} lebih besar dari N_L maka akan terjadi likuifaksi dan potensi likuifaksi (Srikit & Artati, n.d.). Hasil analisis berdasarkan menunjukkan bahwa lokasi tersebut berpotensi mengalami likuifaksi hingga kedalaman 16 meter.

Dari kedua metode yang dipertimbangkan menunjukkan bahwa perhitungan-perhitungan juga mempertimbangkan beberapa aspek dan tidak hanya karakteristik tanah saja sehingga menyebabkan perbedaan hasil analisis. Hasil dari analisis maka diambil dari kondisi yang paling kritis yaitu metode Seed, Martin, and Lysmer (1975) maka kedalaman desain *stone column* adalah sedalam 16 meter yang diharapkan dapat memberikan perkuatan pada tanah dasar sehingga tidak terjadi likuifaksi.

3.5 Analisis Daya Dukung

Analisis daya dukung digunakan untuk memastikan bahwa tanah dasar sudah mampu menahan beban struktur yang direncanakan, tetapi jika daya dukung tanah dasar tidak mampu menahan beban maka dibutuhkan perkuatan tanah.

a. Daya Dukung Tanah Dasar

Analisis daya dukung tanah dasar digunakan untuk mengevaluasi tinggi timbunan rencana dapat menahan beban di atasnya atau tidak. Analisis daya dukung tanah dasar menggunakan metode Mayerhof (1956) karena dilakukan pendekatan perhitungan menggunakan pondasi dangkal terhadap timbunan di jalan tol. Hasil perhitungan daya dukung untuk tanah dasar disajikan melalui **Tabel 3**.

Tabel 3. Daya Dukung Tanah Dasar

Lapisan	Z (m)	N	B (m)	Beban (kN/m ²)	Qall (kN/m ²)	Qult (kN/m ²)	SF
1	12	5,8333	88,5	224	46,9843	140,9529	0,6293
2	18	18,9815	88,5	224	152,8854	458,6563	2,0476

Berdasarkan SNI 8460:2017 angka aman minimum untuk daya dukung adalah 3,0. Oleh sebab itu, daya dukung tanah dasar tidak memenuhi kriteria sehingga beresiko mengalami kerusakan pada struktur jalan tol di atasnya seperti penurunan maka diperlukan perkuatan tanah.

b. Daya Dukung *Stone Column* Tunggal

Perhitungan mengenai daya dukung ultimate *stone column* menggunakan metode (Hughes & Withers, 1956) dengan mengalikan tegangan tanah horizontal sekitar *stone column* (σ_3) dan koefisien tekanan pasif (K_p) sebagai berikut.

$$\sigma_3 = \sigma v_o + C_u \left(1 + \ln \frac{E_c}{2C_u(1+v)} \right)$$

$$= 149,2134 \text{ kN/m}^2$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \theta_s}{1 - \sin \theta_s}$$

$$= 5,0447 \text{ kN/m}^2$$

$$q_u = \sigma_3 \times K_p$$

$$= 753 \text{ kN/m}^2$$

$$SF = \frac{q_u}{\text{beban}}$$

$$= 3,3604$$

Daya dukung *stone column* tunggal menggunakan metode (Hughes & Withers, 1956) yang menunjukkan bahwa daya dukung ultimit *stone column* tunggal sebesar 753 kN/m² dengan nilai SF 3,3604 hingga kedalaman 16 meter.

c. Daya Dukung *Stone Column* dan Tanah

Analisis daya dukung *stone column* dan tanah dilakukan dengan tujuan untuk mengetahui kenaikan daya dukung tanah setelah adanya perkuatan tanah dengan *stone column*. Metode yang digunakan adalah metode Vesic (1972) seperti pada **Tabel 4**.

Tabel 4. Daya Dukung *Stone column* dan Tanah

Lokasi	σ_1/σ_3	I_r	F'_c	qult (kN/m ²)	SF
BH – 153	5,0447	156495,7759	12,9608	326,9151	4,6821
BH – 154	5,0447	563649,7266	14,2422	359,2365	
BH - 155	5,0447	645368,7417	14,3776	362,6151	
qult total				1048,8031	

Berdasarkan **Tabel 4** nilai faktor keamanan pada *stone column* dan tanah adalah 4,6821 yang menunjukkan nilai tersebut sudah memenuhi persyaratan untuk daya dukung tanah. Nilai daya dukung diperoleh dari hasil kumulatif dari ke 3 bore hole karena pemasangan *stone column* dipasang pada lokasi tersebut sehingga dibuatlah hasil perhitungan daya dukung *stone column* dan tanah dengan menjumlahkannya.

3.6 Analisis Penurunan

Analisis penurunan dengan cara manual yaitu menghitung penurunan tanpa menggunakan perkuatan tanah menggunakan *stone column* dan setelah adanya perkuatan dengan *stone column*.

a. Penurunan Sebelum Adanya Perkuatan Tanah Menggunakan *Stone Column*

Analisis kuantitatif terhadap penurunan segera tanah sebelum perkuatan dilakukan untuk memahami besarnya deformasi yang terjadi. Hasil perhitungan yang diperoleh adalah sebagai berikut:

$$S_{i1} = qB \frac{(1-\mu^2)}{E} \times I_s$$

$$= 1,1355 \text{ m}$$

$$S_{i2} = qB \frac{(1-\mu^2)}{E} \times I_s$$

$$= 0,5922 \text{ m}$$

$$S_i \text{ rata – rata} = 0,8638 \text{ m}$$

Berdasarkan hasil perhitungan, rata – rata dari penurunan pada tanah dasar akibat adanya beban adalah 0,8638 meter.

b. Penurunan Setelah Adanya Perkuatan Tanah Menggunakan *Stone Column*

Analisis penurunan tanah setelah adanya perkuatan tanah dengan *stone column* diambil contoh perhitungan pada diameter 0,5 meter dengan jarak 1,5 meter.

$$n = \frac{\sigma_s}{\sigma_c}$$

$$= 2,4071$$

$$m = \frac{E_{tanah}}{E_{stone column}}$$

$$= 0,3324$$

$$S_s = \frac{1+(n+1)m}{n}$$

$$= 0,6097 \text{ m}$$

Hasil analisis penurunan menunjukkan bahwa setelah adanya perkuatan tanah menggunakan *stone column* dapat mengurangi besarnya penurunan tanah yang diakibatkan oleh beban dan *stone column* dianggap efektif untuk mengurangi penurunan tanah yang terjadi.

3.7 Hasil Pemodelan Software Elemen Hingga 2D

Pemodelan pada analisis ini menggunakan *plane strain* dengan kriteria keruntuhan Mohr-Coulomb. Penggunaan *plane strain* ini dapat menyederhanakan analisis dari tiga dimensi menjadi dua dimensi karena pergerakan regangan sangat kecil atau dapat diabaikan (Théodore et al., 2024). Kriteria Mohr-Coulomb ini dapat menggambarkan perilaku tanah atau batuan. Model ini sering digunakan untuk analisis awal karena proses perhitungannya yang relatif cepat. Parameter input model Mohr-Coulomb meliputi modulus kekakuan (E), kohesi terdrain (c), sudut gesekan internal (ϕ), rasio Poisson (ν) dan berat satuan (γ) (Sompie et al., 2018). Kriteria ini didasarkan dari dua parameter utama tanah, yaitu kohesi (c') dan sudut geser dalam (ϕ'). Kondisi *plane strain* diasumsikan sebagai model geometri untuk mengetahui deformasi yang terjadi dan Mohr-Coulomb diasumsikan sebagai material yang menggambarkan perilaku tanah ketika mengalami keruntuhan.

a. Hasil Pemodelan Kondisi Tanpa Perkuatan

Pemodelan ini digunakan untuk menganalisis kondisi tanah terhadap beban timbunan tanpa adanya perkuatan tanah yang nantinya akan dibandingkan dengan kondisi tanah terhadap timbunan setelah adanya perkuatan tanah menggunakan *stone column*.

Tabel 5. Rekapitulasi Hasil Penurunan dan Faktor Kemanan Kondisi Sebelum Adanya Perkuatan Tanah

Lokasi	Penurunan (m)	SF
BH-153	0,7374	1,020
BH-154	0,7521	1,023
BH-155	0,4171	1,060

Keakuratan hasil analisis dilakukan perbandingan nilai penurunan sebelum adanya *stone column* secara manual dengan menggunakan *software* elemen hingga 2D. Hasil perbandingan nilai penurunan dengan dua metode terlihat pada **Tabel 6**.

Tabel 6. Perbandingan Penurunan Perhitungan Manual dan *software* Elemen Hingga 2D

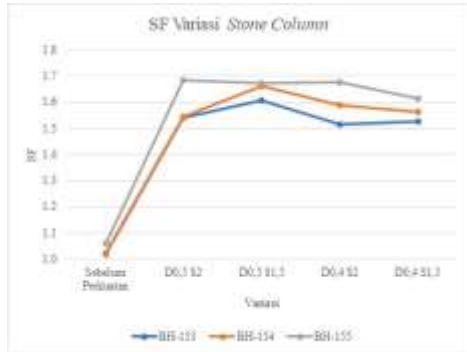
Lokasi	Perhitungan Manual (m)	Perhitungan Elemen Hingga 2D (m)
BH – 153	0,7636	0,7374
BH – 154	0,8638	0,7521
BH - 155	0,6243	0,4178

Berdasarkan data pada **Tabel 6**, terlihat terdapat perbedaan nilai penurunan antara hasil perhitungan manual dan hasil dari simulasi perangkat lunak. Nilai penurunan dari perhitungan manual cenderung lebih tinggi dibandingkan dengan hasil dari *software* elemen hingga 2D. Hal ini dapat disebabkan pendekatan asumsi atau simplifikasi pada metode manual yang tidak mempertimbangkan faktor-faktor kompleks seperti deformasi lateral dan interaksi tanah-struktur secara lebih rinci seperti yang dilakukan oleh perangkat lunak

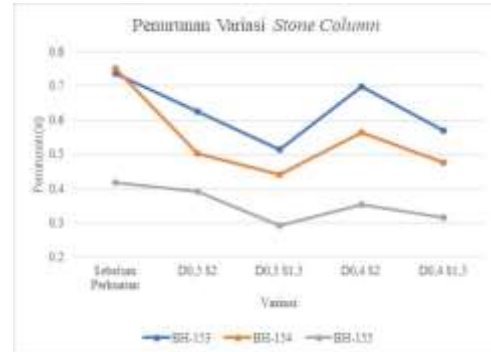
elemen hingga. Meskipun demikian, perbedaan nilai penurunan masih berada dalam batas wajar, sehingga hasil simulasi dapat digunakan untuk analisis lebih lanjut.

b. Hasil Pemodelan Kondisi Perkuatan dengan *Stone Column*

Analisis numerik kondisi tanah setelah perkuatan dilakukan menggunakan *software* elemen hingga 2D. Hasil pemodelan tersebut direpresentasikan dalam bentuk grafik sebagai berikut:



Gambar 5. Grafik Hasil SF Variasi *Stone Column*



Gambar 6. Grafik Hasil Penurunan Variasi *Stone Column*

Gambar 5 menunjukkan peningkatan nilai *safety factor* (SF) pada setiap titik bore log setelah menggunakan perkuatan tanah menggunakan *stone column* dengan berbagai variasi. Secara umum, terjadi tren peningkatan nilai SF dibandingkan kondisi sebelum perkuatan. Variasi D0,5 S1,5 memberikan peningkatan paling signifikan di seluruh titik, hal tersebut menunjukkan bahwa variasi tersebut optimal dalam meningkatkan stabilitas tanah. Semakin besar diameter dan semakin rapat jaraknya maka nilai faktor keamanannya meningkat dan penurunannya lebih kecil (Grizi et al., 2022).

Gambar 6 menunjukkan penurunan nilai deformasi tanah pada masing-masing titik bore log setelah dilakukan perkuatan. Terlihat bahwa seluruh variasi *stone column* mampu mengurangi penurunan dibandingkan kondisi awal. Variasi D0,5 S1,5 menghasilkan nilai penurunan terkecil, hal tersebut menunjukkan bahwa variasi ini paling optimal dalam mengontrol deformasi vertikal tanah akibat beban timbunan. Nilai faktor keamanan dan penurunan sangat dipengaruhi oleh diameter dan jarak antar *stone column* (Prakash & Krishnamoorthy, 2023).

4. KESIMPULAN

Semua kombinasi yang diuji, yaitu D0,5 S2; D0,5 S1,5; D0,4 S2; dan D0,4 S1,5 memenuhi nilai faktor keamanan (SF) yang ditetapkan, menurut variasi diameter (D) dan jarak (S) antar *stone column*. Selain itu, semua konfigurasi berhasil mengurangi nilai penurunan tanah. Tetapi efisiensi teknis dan volume material yang digunakan berbeda. Diameter besar dan jarak rapat, menghasilkan nilai faktor keamanan paling tinggi, tetapi memerlukan volume material yang lebih besar. Sebaliknya, diameter yang lebih kecil dan jarak yang lebih renggang lebih hemat material, tetapi nilai faktor keamanan cukup rendah. Oleh karena itu, konfigurasi yang tepat harus mengimbangi kinerja yang lebih baik seperti nilai SF yang lebih tinggi dan penurunan yang kecil dan efisiensi penggunaan material. Variasi diameter 0,5 dengan jarak 1,5 meter dapat dipilih karena memiliki nilai faktor keamanan yang relatif lebih besar dibandingkan dengan variasi lainnya, karena semakin besar diameter dan semakin rapat jaraknya akan menghasilkan nilai faktor keamanan besar dan penurunan kecil. Pada penelitian selanjutnya disarankan untuk

menggunakan *software* 3D agar dapat menginterpretasikan kondisi aktual di lapangan. Selain itu, analisis potensi likuifaksi setelah adanya perkuatan tanah menggunakan *stone column* diperlukan agar dapat mengevaluasi sejauh mana metode tersebut efektif dalam meningkatkan stabilitas tanah.

DAFTAR PUSTAKA

- Grizi, A., Al-Ani, W., & Wanatowski, D. (2022). Numerical Analysis of the Settlement Behavior of Soft Soil Improved with Stone Columns. *Applied Sciences (Switzerland)*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/app12115293>
- Hughes, J. M. O., & Withers, N. J. (1956). *Reinforcing of soft cohesive soils with stone columns*.
- Iskandar, Fitriani, F., Hamdhan, & Noer, I. (2016). *Pemodelan Numerik Pada Perbaikan Tanah Menggunakan Stone Column Di Tanah*.
- Kamila, B., Isnaniati, & Farichah, H. (2022). *Studi Parametrik Stone Column Terhadap Daya Dukung Tanah Lunak*. 7(1).
- Kevin, P., & Muhrozi. (2023). The Preliminary Study of Liquefaction Susceptibility Map in the Yogyakarta-Bawen Toll Road Sections I and II, Indonesia. *Civil Engineering Dimension*, 25(1), 29–36. <https://doi.org/10.9744/ced.25.1.29-36>
- Prakash, K. G., & Krishnamoorthy, A. (2023). Effectiveness of Stone and Deep Mixing Lime Columns on Stability of Embankments Constructed on Soft Consolidating Soil. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41(1), 533–552. <https://doi.org/10.1007/s10706-022-02269-5>
- Prasojo, D., & Hendriyawan. (2022). *Stone Column Design for Mitigation of Liquefaction at Tidore Island, North Maluku*.
- Prayitno, D., & Artati Hanindya. (2021). Analisis Potensi Likuifaksi Berdasarkan Distribusi Ukuran Butir Tanah dan Data Cone Penetration Test (CPT). In *Media Komunikasi Teknik Sipil* (Vol. 27, Issue 2).
- SNI 8460:2017. (n.d.). *Persyaratan Perancangan Geoteknik*. www.bsn.go.id
- Soesilo, F., & Warman, H. (2024). Perkuatan Daya Dukung Tanah Lunak Dengan Metode Vibro Stone Column Studi Kasus: Jalan Tol Yogyakarta-Bawen (STA 72+975-73+100).
- Somantri, A. K., Febriansya, A., Putri, D., & Nurul Fitriani, R. (2021). Perbaikan Tanah Dasar Yang Berpotensi Terjadi Likuefaksi Dengan Metode Stone Column Pada Junction Tebing Tinggi.
- Sompie, G., Sompie, O., & Rondonuwu, S. (2018). Analisis Stabilitas Tanah Dengan Model Material Mohr Coulomb Dan Soft Soil. *Jurnal Sipil Statik*, 6(10), 783–792.
- Srikit, & Artati, H. (n.d.). Analisis Potensi Likuifaksi Berdasarkan Distribusi Ukuran Butir Dan Data N-Spt.
- Suroso, P., Nugroho, B., Rajiv Yasmuna, M., Teknik Sipil, J., Jalan dan jembatan, R., Negeri Samarinda Jl Cipto Mangunkusumo Kampus Gunung Lipan, P., Samarinda, K., & Timur, K. (n.d.). *Pengaruh Perkuatan Tanah Dengan Menggunakan Stone Column Terhadap Potensi Likuifaksi (Studi Kasus Jalan Tol Manado-Bitung sta 39+250)*.
- Théodore, A., Demir, A., & Yildiz, A. (2024). 2D Numerical Analysis of Prefabricated Vertical Drains Using Different Matching Methods. *Applied Sciences (Switzerland)*, 14(12). <https://doi.org/10.3390/app14124970>
- Tijow, K., Sompie, O., & Ticoh, J. (2018). Analisis Potensi Likuifaksi Tanah Berdasarkan Data Standart Penetration Test (Spt) Studi Kasus : Dermaga Bitung, Sulawesi Utara. *Jurnal Sipil Statik*, 6(7), 491–500.