

## Pengaruh Perkuatan Tanah Dengan Menggunakan *Stone Column* Terhadap Potensi Likuifaksi (Studi Kasus Jalan Tol Manado – Bitung sta 39+250)

Priyo Suroso<sup>1)</sup>, Budi Nugroho<sup>2)</sup>, Pramono<sup>3)</sup>, M. Rajiv Yasmuna<sup>4)</sup>

[priyosuroso21@gmail.com](mailto:priyosuroso21@gmail.com); [budinugrohopolnes@gmail.com](mailto:budinugrohopolnes@gmail.com); [pram\\_smile@yahoo.com](mailto:pram_smile@yahoo.com); [mrajivmodak@gmail.com](mailto:mrajivmodak@gmail.com)<sup>4)</sup>;

<sup>1) 2) 3) 4)</sup> Jurusan Teknik Sipil/Rekayasa Jalan dan jembatan, Politeknik Negeri Samarinda  
Jl. Cipto Mangunkusumo Kampus Gunung Lipan, Kota Samarinda 75131,  
Kalimantan Timur, Indonesia

Koresponden naskah : [priyosuroso21@gmail.com](mailto:priyosuroso21@gmail.com)

SUBMITTED Oct 26, 2021 | REVISED Nov 18, 2021 | ACCEPTED Nov 28, 2021 (Editor)

### ABSTRACT

Earthquakes can cause structural failure and can also cause loss of soil stability. The damage caused by the earthquake is divided into two things, first is failure to buildings that are above the ground and physical failure to the surface of the soil itself. Physical soil failure is settlement, rock slides, and liquefaction. Liquefaction is a condition where the soil loses its effective shear strength due to the increase in pore water stress because of very fast and instantaneous cyclic loads (earthquake loads) or vibrations from vehicles that work above. One method to analyze the liquefaction potential is method from National Center Of Earthquake Engineering Research (NCEER) USA, one of the mitigations for liquefaction is using a stone column, the design of the stone column using the Priebe method (1995) which is listed in the journal "The Design of Vibro Stone column". The result of the analysis of potential for liquefaction with or without embankment liquefaction happen at 0 to 29 meters depth, settlement that cause by liquefaction is 0,85 meters, improvement using stone column with 0,8 diameter and 2,1 meters space can increase the shear angle of the soil by 33,96° and significantly increased the value of the liquefaction safety factor.

**Keywords :** *Liquefaction, Earthquake, Stone column, shear angle*

### ABSTRAK

Gempa bumi dapat mengakibatkan kegagalan struktur dan juga dapat mengakibatkan hilangnya kestabilan tanah. Kerusakan – kerusakan yang di akibat oleh gempa bumi di bagi menjadi dua yaitu kerusakan bangunan yang berada diatas tanah dan kerusakan fisik permukaan tanah itu sendiri. Kerusakan – kerusakan tanah secara fisik ialah penurunan tanah (*settlement*), batu longsor (*rockslides*), dan likuifaksi (*liquefaction*). Likuifaksi adalah suatu kejadian dimana tanah mengalami kehilangan kekuatan geser efektif karena meningkatnya tegangan air pori sebagai akibat terjadinya beban siklik (beban gempa) sangat cepat dan dalam waktu sesaat atau getaran dari kendaraan yang bekerja secara berkala. Salah satu metode untuk menganalisis potensi likuifaksi adalah dengan metode *National Center Of Earthquake Engineering Research* (NCEER) USA, salah satu mitigasi untuk likuifaksi ialah menggunakan *stone column*, perencanaan *stone column* dengan menggunakan metode priebe (1995) yang tercantum dalam pada jurnal "*the desing of vibro stone column*". Hasil analisis potensi likuifaksi baik dalam kondisi ada ataupun tidak adanya timbunan, likuifaksi terjadi pada kedalaman 0 hingga 29 meter dengan penurunan akibat likufaksi sebesar 0,83 meter, Perbaikan menggunakan *stone column* dengan diameter sebesar 0,8 meter dan jarak sebesar 2,1 meter dapat meningkatkan sudut geser tanah sebesar 33,96° dan mampu meningkatkan nilai faktor keamanan terhadap potensi likufaksi secara signifikan.

**Kata kunci :** *Likuifaksi, Gempa, Stone column, Sudut Geser Tanah*

### 1. PENDAHULUAN

Gempa bumi dapat mengakibatkan kegagalan struktur dan juga dapat mengakibatkan hilangnya kestabilan tanah. Kerusakan – kerusakan yang di akibat oleh gempa bumi di bagi menjadi dua yaitu kerusakan bangunan yang berada diatas tanah dan kerusakan fisik permukaan tanah itu sendiri. Kerusakan – kerusakan tanah secara fisik adalah terjadinya penurunan tanah (*settlement*), salju longsor/tanah longsor atau permasalahan yang lain pada keseimbangan lereng (*landslides and slope stability problems*), batu longsor (*rockslides*), batu jatuh (*rockfalls*), dan likuifaksi (*liquefactions*).

Salah satu kerusakan yang di akibatkan oleh gempa bumi yaitu likuifaksi (*liquefactions*). Likuifaksi adalah suatu kejadian dimana tanah mengalami kehilangan kekuatan geser efektif karena meningkatnya tegangan air pori sebagai akibat terjadinya beban siklik (beban gempa) sangat cepat dan dalam waktu sesaat atau getaran dari kendaraan yang bekerja secara berkala. Likuifaksi lebih mungkin terjadi pada tanah tersaturasi air yang belum terkonsolidasi dengan porositas yang rendah, seperti lempung pasir atau pasir dan kerikil halus.

Likuifaksi juga kerap terjadi di Indonesia berdasarkan BMKG (Badan Metrologi, Klimatologi

dan Geofisika) likufaksi terjadi di kota palu, Sulawesi Tengah, dengan skala gempa 7,4 skala *richter* menganalisis potensi likufaksi terdapat beberapa metode yang di kemukakan oleh beberapa ahli diantaranya ialah Metode Seed (1985), Metode Tokimatsu-Yoshimi (1983), Metode JRA (*Japan Rail Association*)(1996), Metode Youd-Idriss(1997), Metode Idriss-Boulanger (2008). Yang dimana beberapa metode tersebut telah dirangkum dan di sederhanakan dalam “*Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils*”, *Journal of Geotechnical and Geo-environmental Engineering, October 2001*” .

Mengurangi resiko likuifaksi terdapat beberapa metode antara lain *micropile* bambo, pipa *piezometer* dan sumur resapan, *stone column*. Dalam hal ini penulis menggunakan metode *Stone column* sebagai mitigasi, *stone column* merupakan metode perkuatan yang cocok digunakan pada tanah pasir, pasir berlanau, pasir berlempung, lanau dan lempung. Perbaikan dapat dilakukan mencapai kedalaman 30 m. *Stone column* meningkatkan kekakuan pada tanah dan dapat juga sebagai drainase sehingga kelebihan tekanan air pori saat likuifaksi akan terdisipasi lebih cepat

## 2. TINJAUAN PUSAKA

### A. Gempa Bumi

Gempa bumi adalah getaran yang terjadi di permukaan bumi akibat pelepasan energi dari dalam secara tiba-tiba yang menciptakan gelombang seismik. Sulawesi Utara merupakan salah satu daerah rawan bencana gempa bumi dan tsunami di Indonesia. Sebelum melakukan perhitungan analisis potensi likuifaksi maka perlu dilakukan perhitungan terhadap *Peak Ground Analysis (PGA)* dan *Peak Surface Analysis (PSA)*.

Peak Ground Analysis (PGA) adalah akselerasi tanah maksimum yang terjadi pada saat terjadi gempa di suatu lokasi, nilai ini di dapat dari peta zonasi gempa Indonesia pada gambar 1(Revisi SNI 1726 – 2018). Penentuan jenis tanah dapat di lakukan dengan menggunakan NSPT yang berkaitan dengan kelas situs tanah yang di tunjukkan pada Tabel 1, Dalam menentukan kelas situs tanah, dengan nilai N-spt dapat menggunakan persamaan 1 berikut:

$$N = \frac{tt}{m} \quad (1)$$

Dimana :

$\hat{N}$  = nilai N-spt rata – rata

Ti = Tebal lapisan

Ni = jumlah pukulan

Perubahan percepatan gempa di batuan dasar akan berpengaruh langsung pada percepatan gempa di permukaan tanah atau yang bisa di sebut dengan *Peak Surface Analysis*. Percepatan gempa di permukaan tanah dapat di hitung dengan Persamaan 2 dibawah ini:

$$PSA = F_{PGA} \times PGA \quad (2)$$

Dimana:

PSA= Percepatan gempa di permukaan tanah

PGA= Percepatan gempa di batuan dasar

$F_{PGA}$ = Koefisien situs/ faktor amplifikasi

Yang dimana Koefisien situs/ faktor amplifikasi ( $F_{PGA}$ ) didapat dari tabel 2

### B. Parameter yang mempengaruhi likuifaksi

Likuifaksi adalah hilangnya kekuatan tanah akibat kenaikan tegangan air pori dan turunnya tekanan efektif dari lapisan tanah yang timbul akibat beban siklik. Struktur tanah pasir (*cohesionless*) menerima tegangan geser yang berturut-turut sehingga struktur tanah pasir memadat, tetapi karena peristiwa siklik ini terjadi dengan waktu sangat cepat maka proses pemadatan tidak terjadi dan tegangan air pori meningkat. (Idriss, I & Boulanger, 2008).

Pada suatu lapisan tanah pasir yang jenuh air, pengaruh dari getaran gempa atau beban siklik, akan mengalami perubahan sifat tanah. Dimana dari sifat solid ke sifat *liquid* (cair) yang mengakibatkan berkurangnya tegangan efektif tanah dan membuat tanah tersebut kehilangan daya dukungnya. Hal ini di pengaruhi oleh tegangan vertikal. Yang dimana tegangan vertikal tanah dapat dihitung dengan persamaan 3 dibawah ini

$$\sigma_v = \sum(\gamma \cdot z) \quad (3a)$$

$$\sigma'_v = \sigma_v - \mu \quad (3b)$$

Dimana :

$\sigma_v$  : Tegangan vertikal total (kN/m<sup>2</sup>)

$\gamma$  : Berat isi lapisan tanah (kN/m<sup>3</sup>)

$z$  : Kedalaman lapisan tanah (m)

$\mu$  : Tekanan air pori (kN/m<sup>2</sup>) =  $\gamma_w \cdot z$

$\gamma_w$  : Berat isi air (kN/m<sup>3</sup>)

$z$  : Kedalaman lapisan tanah (m)

$\sigma'_v$  : Tegangan vertikal efektif (kN/m<sup>2</sup>)

Faktor reduksi merupakan nilai yang dapat mempengaruhi tegangan di dalam tanah. Semakin jauh kedalaman tanah maka faktor reduksi akan semakin kecil. Persamaan 2.5 adalah rumus  $r_d$  yang diusulkan oleh T. F. Blake (1996) dalam (Youd & Idriss, 2001), yaitu :

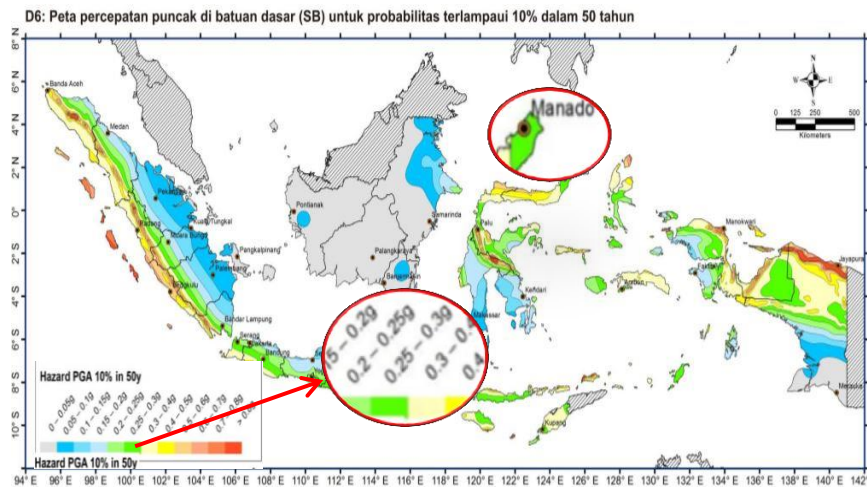
$$r_d = \frac{(1.000-0.4113z^{0.5}+0.04052z+0.001753z^{1.5})}{(1.000-0.4177z^{0.5}+0.05729z-0.006205z^{1.5}+0.001210z^2)} \quad (4)$$

Dimana  $z$  adalah kedalaman lapisan tanah yang ditinjau.

### C. Metode mengevaluasi potensi likuifaksi

analisis potensi likuifaksi dengan menggunakan metode National Research Center For Earthquake Engineering Research (NCEER) adalah mencari 2 parameter utama, yaitu : Cyclic Stress Ratio (CSR) yang merupakan tegangan siklik yang terjadi akibat gempa dibagi dengan tegangan efektif dan Cyclic Resistance Ratio (CRR) yang merupakan ketahanan tanah untuk menahan likuifaksi. Cyclic Stress Ratio adalah tegangan siklik yang terjadi akibat gempa dibagi dengan tegangan efektif. Seed dan Idriss (1971) memformulasikan Persamaan 5 untuk rasio tegangan siklik (CSR), yaitu :

$$CSR = \frac{\tau_{av}}{\sigma'_{vo}} = 0.65 \left( \frac{\sigma_{v0max}}{g} \right) \left( \frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) r_d \quad (5)$$



**Gambar 1.** Peta Zonasi Gempa Indonesia, 10% Terlampaui dalam 50 Tahun (Pusat Litbang Perumahan Dan Permukiman 2017)

**Tabel 1.** Rangkuman Hasil Pengujian Tanah di Laboratorium Politeknik Negeri Samarinda

Kelas situs	$\bar{V}_s$ (m/detik)	$\bar{N}$ atau $\bar{N}_{ch}$	$\bar{S}_u$ (kPa)
SA (batuan keras)	>1500	N/A	N/A
SB (batuan)	750 sampai 1500	N/A	N/A
SC (tanah keras, sangat padat, dan batuan lunak )	350 sampai 750	>50	$\geq 100$
SD (tanah sedang)	175 sampai 350	15 sampai 50	50 sampai 100
SE (tanah lunak)	< 175	< 15	< 50
	Atau setiap profil tanah yang mengandung lebih dari 3 m tanah dengan karakteristik sebagai berikut : 1. indeks plastisitas $PI > 20$ , 2. Kadar air, $w \geq 40 \%$ 3. Kuat geser niralir $\bar{S}_u < s5$ kPa		
SF (tanah khusus, yang membutuhkan investigasi geoteknik spesifik dan analisis respons spesifik situs yang mengikuti 6.10.1)	Setiap profil lapisan tanah yang memiliki salah satu atau lebih dari karakteristik sebagai berikut : - Rawan dan potensi gagal runtuh akibat beban gempa seperti likuifaksi, lempung sangat sensitive, tanah tersemenstasi lemah. - Lempung sangat organik dan/atau gambut (ketebalan $H > 3m$ ) - Lempung berplastisitas sangat tinggi (ketebalan $H > 7.5$ m dengan indeks plastisitas $PI > 75$ Lapisan lempung lunak/setengah teguh dengan ketebalan $H > 35$ m dengan $\bar{S}_u < 50$ kpa		

**Tabel 2** Koefisien Situs  $F_{PGA}$  (SNI 1726 – 2019)

Klasifikasi site (Sesuai Tabel 2)	$S_{pga}$				
	$PGA \leq 0,1$	$PGA = 0,2$	$PGA = 0,3$	$PGA = 0,4$	$PGA \geq 0,5$
Batuan Keras ( $S_c$ )	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8
Batuan ( $S_e$ )	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Tanah sangat padat dan batuan lunak ( $S_c$ )	1,2	1,2	1,0	1,0	1,0
Tanah sedang ( $S_p$ )	1,6	1,4	1,2	1,1	1,0
Tanah Lunak ( $S_e$ )	2,5	1,7	1,2	0,9	0,9
Tanah Khusus ( $S_f$ )	SS	SS	SS	SS	SS

Faktor 0.65 adalah asumsi bahwa tegangan geser seragam ekuivalen adalah 65% dari tegangan geser maksimum absolut yang dihasilkan oleh gempa. Nilai Cyclic Resistance Ratio dapat diperoleh melalui pengujian lapangan seperti Standart Penetration Test (SPT). Cyclic Resistance Ratio (CRR) adalah nilai besaran yang menggambarkan kekuatan atau tahanan tanah terhadap likuifaksi, dimana nilai ini diperoleh dari hasil Persamaan 6 yang di usulkan oleh (Rauch 1998)

$$CRR_L = \frac{1}{34 \cdot (N_1)_{60}} + \frac{(N_1)_{60}}{135} + \frac{50}{(10 \cdot (N_1)_{60} + 45)^2} - \frac{1}{200} \quad (6)$$

Persamaan di atas hanya berlaku jika  $(N_1)_{60} < 30$ . Tanah berbutir dengan  $(N_1)_{60} > 30$  dianggap terlalu padat untuk mengalami likuifaksi. Untuk mempertimbangkan jumlah (%) butir halus,  $(N_1)_{60}$  dapat dikonversi menjadi  $(N_1)_{60FC}$  Persamaan 7 yang di kembangkan oleh (Youd & Idriss, 2001) dengan bantuan R. B. Seed sebagai berikut:

$$(N_1)_{60CS} = \alpha + (N_1)_{60} \quad (7)$$

dimana  $\alpha$  dan  $\beta$  adalah koefisien yang bergantung kepada persen butir halus sebagai berikut

$$\alpha = 0, \beta = 1, \text{ untuk } FC \leq 5\%$$

$$\alpha = \exp[1,76 - (190/FC^2)] \text{ untuk } 5\% < FC < 35\% \quad (8a)$$

$$\beta = [0,99 - (FC^{1,5}/1000)] \text{ untuk } 5\% < FC < 35\% \quad (8b)$$

$$\alpha = 5,0 \beta = 1,2 \text{ untuk } FC \geq 35\%$$

untuk mendapatkan nilai koreksi dari  $(N_1)_{60}$  maka (Youd & Idriss, 2001) memberikan persamaan 9 sebagai berikut

$$(N_1)_{60FC} = N_{SPT} C_N C_E C_B C_R C_S \quad (9)$$

Keterangan :

$N_{spt}$  = N-SPT yang diperoleh dari tes lapangan  
 $C_N$  = Faktor koreksi untuk normalisasi *effective overburden pressure*  $\sigma'_{vo}$

$C_E$  = Koreksi untuk *efficiency energy*

$C_B$  = Koreksi untuk *diameter borehole*

$C_R$  = Faktor koreksi dari panjang tali (*rodlength*)

$C_S$  = Koreksi untuk sampel d atau tidaknya (*linier*)

#### D. Magnitude safety factor

Magnitude Scale factor adalah sebuah nilai yang digunakan untuk menyesuaikan nilai CRR (Cyclic Resistance Ratio), gempa dengan kekuatan 7,5 skala rithcer dinyatakan sebagai gempa referensi (Youd dan Idriss, 2001). Sehingga diperlukannya koreksi terhadap gempa dengan kekuatan yang lebih besar atau lebih kecil dari 7,5.

Berdasarkan hasil re-evaluasi oleh seed dan idris, didapatkan nilai persamaan untuk mencari nilai MSF, ditunjukkan pada persamaan 10, sebagai berikut :

$$M_w < 7,5 \text{ MSF} = \frac{10^{2,24}}{M_w^{2,56}} \quad (10a)$$

$$M_w > 7,5 \text{ MSF} = \left(\frac{M_w}{7,5}\right)^{-2,56} \quad (10b)$$

Dimana :

$M_w$  = Momen magnitude

#### E. Safety Factor

Faktor Keamanan (FS) yang digunakan tidak diperbolehkan kurang dari satu, karena jika kurang dari satu maka tanah akan mengalami likuifaksi. Faktor keamanan merupakan perbandingan dari nilai Cyclic Stress Ratio (CSR) dan Cyclic Resistance Ratio (CRR) seperti ditunjukkan pada persamaan 11 berikut :

$$FS = \frac{CRR}{CSR} \quad (11)$$

Dimana :

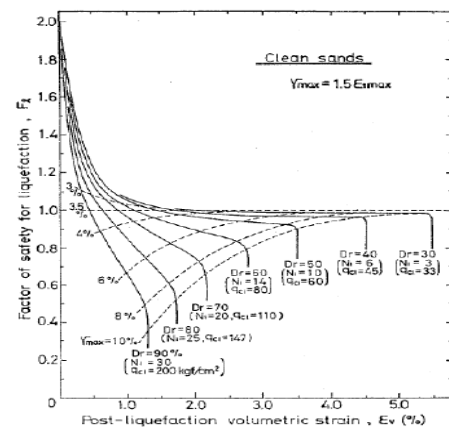
Jika  $FS < 1$ , Terjadi Likuifaksi

Jika  $FS = 1$ , Kondisi Kritis

Jika  $FS > 1$ , Tidak terjadi Likuifaksi

#### F. Penurunan akibat likuifaksi

penurunan tanah ini di pengaruhi oleh regangan volumetrik setelah terjadinya likuifaksi (*post-liquefaction*). Yang dimana nilai regangan volumetrik setelah terjadinya likuifaksi didapat dari hubungan antara kerapatan relatif ( $D_r$ ) dengan faktor keamanan terhadap likuifaksi yang gambarkan pada



gambar 2

**Gambar 2.** Hubungan regangan volumetrik, kerapatan relatif dan faktor keamanan likuifaksi (Ishihara & Yoshimine, 1992)

Penurunan permukaan tanah dapat dihitung dengan melakukan integral regangan vertikal untuk setiap lapisan tanah pada seluruh kedalaman dengan menggunakan persamaan 12 (Zhang dkk., 2002).

$$S = \int_0^z \varepsilon_v dz = \sum_{i=0}^n \varepsilon_{v,i} \Delta z_i \quad (12)$$

Dimana :

$\Delta z_i$  = tebal lapisan tanah ke-i

$\varepsilon_{v,i}$  = regangan volumetrik pasca likuifaksi pada lapisan tanah ke-i

Ishihara & Yoshimine (1992) membuat suatu hubungan antara penurunan yang terjadi akibat likuifaksi dengan kerusakan yang terjadi yang dimana penurunan berhubungan dengan fenomena likuifaksi yang terjadi, pada tabel 3

**Tabel 3** hubungan antara besar penurunan dengan kerusakan yang terjadi (Ishihara & Yoshimine, 1992)

Tingkat kerusakan	Penurunan (cm)	kerusakan yang terjadi
Kerusakan ringan	0-10	Retak kecil
Kerusakan sedang	10-cm	Retak kecil, pasir mengalir
Kerusakan berat	>30	Retak besar, semburan pasir, Retak besar, pergerakan lateral



### G. 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. Batuan tersebut umumnya batuan lepas dan tidak diikat oleh bahan pengikat semen atau lainnya. Pemasangan *stone column* adalah salah satu metode perbaikan tanah. Fungsi utama pemasangan *stone column* adalah untuk meningkatkan daya dukung tanah. Selain untuk meningkatkan daya dukung tanah, menurut Barksdale dan Banchus (1983) yang dikutip dalam *Design And Construction Stone columns Vol I.* (1983) ada beberapa keuntungan lain, seperti :

1. Mengurangi total *settlement* tanah.
2. Memperpendek waktu konsolidasi.
3. Mengurangi bahaya *liquefaction*.

Spasi dan diameter *stone column* ditentukan terhadap luas area *stone column*, diameter ekuivalen dan luas area cell,yang di tentukan persamaan 13 sebagai berikut:

$$A_c = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (13a)$$

$$A = \frac{\pi \cdot D_e^2}{4} \quad (13b)$$

$$D_e = 1,05 * S \quad (13c)$$

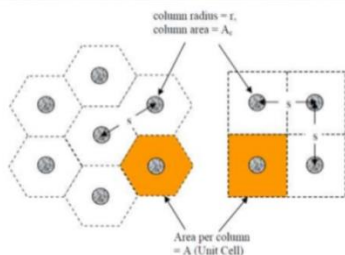
Dimana:

D = Diameter kolom

D<sub>e</sub> = Diamater efektif berdasarkan pola (segitiga)

S = Jarak antar *Stone column*

Pola pemasangan *stone column* ada pola segitiga dan persegi. Dari segi keefektifan lebih efektif menggunakan pola segitiga. Dalam konstruksi pelaksanaannya pola segi empat lebih mudah pemasangan di lapangan sedangkan pola segitiga lebih stabil dan seragam penurunan tanahnya. Pola pemasangan ditunjukkan pada gambar 3



**Gambar 3** Tipikal pola *stone column*

Volume tanah yang di gantikan oleh *stone column* memiliki pengaruh yang penting terhadap hasil perkuatan tanah. Dalam menghitung jumlah tanah yang hilang ditetapkanlah rasio pergantian tanah. Rasio pergantian dihitung dengan menggunakan persamaan 14

$$a_s = \frac{A_c}{A} = a_s = c_1 * \left(\frac{D}{S}\right)^2 \quad (14a)$$

$$a_c = \frac{A - A_c}{A} = 1 - a_s \quad (14b)$$

Dimana:

D = Diameter kolom

S = Jarak antar *stone column*

$$c_1 = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \text{ (pola segitiga)}$$

Hasil evaluasi dihitung sebagai faktor perbaikan dasar ( $n_0$ ) dengan poisson ratios ( $\mu_s$ ) yang digunakan adalah 1/3. Faktor perbaikan dasar ( $n_0$ ) dapat dihitung dengan persamaan 15 dibawah ini

$$n_0 = 1 + \frac{A_c}{A} \left[ \frac{1/2 + f(\mu_s, A_c/A)}{K_{ac} \cdot f(\mu_s, A_c/A)} \right] \quad (15a)$$

$$f\left(\mu_s, \frac{A_c}{A}\right) = \frac{(1 - \mu_s) * (1 - A_c/A)}{1 - 2\mu_s + A_c/A} \quad (15b)$$

$$K_{ac} = \tan^2(45 - \varphi_c/s) \quad (15c)$$

Dengan:

$n_0$  = faktor perbaikan dasar

$A_c/A$  = rasio luas kolom terhadap luas *cell*

$\mu_s$  = poisson ratio (1/3)

$K_{ac}$  = koefisien tekanan tanah

Material timbunan di sekitar *stone column* yang telah dipadatkan masih dapat dikompresi.. Oleh karena itu, dalam kasus penggantian tanah yang dimana rasio area sebesar  $A/AC$ , nilai  $A/AC_1$  dapat dihitung dengan persamaan 16 dibawah ini

$$\left(\frac{A_c}{A}\right)_1 = -\frac{4 \cdot K_{ac}(n_0-2)+5}{2 \cdot (4 \cdot K_{ac}-1)} \pm \frac{1}{2} \cdot \sqrt{\left[\frac{4 \cdot K_{ac}(n_0-2)+5}{(4 \cdot K_{ac}-1)}\right]^2 + \frac{16 \cdot K_{ac}(n_0-2)}{4 \cdot K_{ac}-1}} \quad (16)$$

Dimana:

$(A_c/A)_1$  = rasio area luas penampang setelah adanya perbaikan dasar

$K_{ac}$  = koefisien tekanan tanah

$n_0$  = faktor perbaikan dasar

Pertimbangan terhadap kompresibilitas kolom diperhitungkan terhadap rasio luas ( $A_c/A$ ) yang dipengaruhi faktor perbaikan dasar ( $n_0$ ) yang telah dihitung sebelumnya. Rasio luas  $(A_c/A)_1$  dapat diperhitungkan dengan menggunakan *reduced improvement factor* ( $n_1$ ) menggunakan persamaan 17 berikut:

$$n_1 = 1 + \frac{\bar{A}_c}{A} \left[ \frac{1/2 + f(\mu_s, \bar{A}_c/A)}{K_{ac} \cdot f(\mu_s, \bar{A}_c/A)} - 1 \right] \quad (17a)$$

$$\Delta(A/A_c) = \frac{1}{(A_c/A)_1} - 1 \quad (17b)$$

$$\frac{\bar{A}_c}{A} = \frac{1}{A/A_c + \Delta(A/A_c)} \quad (17c)$$

Dimana :

$n_1$  = Reduced improvement factor

$A_c/A$  = rasio luas kolom terhadap luas *cell*

$\mu_s$  = poisson rasio (1/3)

$K_{ac}$  = koefisien tekanan tanah (1)

Setelah *stone column* terpasang dan seluruh beban yang berkerja (full loading), maka dapat di perkirakan faktor perbaikan akhir (*final improvement factor*) dengan menggunakan persamaan 18 dibawah ini

$$f_d = \frac{1}{1 + \frac{K_{0c}-1}{K_{0c}} \cdot \frac{\Sigma(\gamma_s \cdot \Delta d)}{pc}} \quad (18a)$$

$$\frac{pc}{ps} = \frac{1/2 + f(\mu_s, \bar{A}_c/A)}{K_{ac} \cdot f(\mu_s, \bar{A}_c/A)} \quad (18b)$$

$$K_{0c} = 1 - \sin \varphi_c \quad (18c)$$

$$n_2 = f_d \times n_1 \quad (18d)$$

Dimana :

$n_1$  = Reduced improvement factor

$A_c/A$  = rasio luas kolom terhadap luas cell kompresibilitas

$\phi_c$  = Sudut geser stone column

$A_c/A$  = rasio luas kolom terhadap luas cell

Kolom menerima pembagian total beban (m) bergantung pada rasio luas  $A_c/A$  dan faktor perbaikan (n), pembagian total beban (m) ditentukan menggunakan persamaan 19 dibawah ini

$$m = (n-1 + A_c/A) / n \quad (19a)$$

$$m = (n-1) / n \quad (19b)$$

Berdasarkan pembagian beban (m) pada tanah dan kolom, maka tahanan geser dari sudut geser dan kohesi ditentukan dengan persamaan 20 dibawah ini

$$\tan \bar{\phi} = m' \cdot \tan \phi_c + (1-m') \cdot \tan \phi_s \quad (20a)$$

$$c = (1 - A_c/A) / c_s \quad (20b)$$

Dengan:

m = Portion load kolom

$A_c/A$  = Rasio luas kolom terhadap luas cell

N = Faktor perbaikan

$\phi_c$  = Sudut geser kolom

$\phi_s$  = Sudut geser tanah

$c_s$  = Kohesi tanah

Saat mengalami pembebanan, penurunan yang terjadi pada *stone column* dan tanah sekitarnya adalah sama. Hal ini menandakan bahwa pergantian massa tanah dengan menggunakan *stone column* akan mengurangi tekanan overburden total dan juga meningkatkan tahanan tanah (*Cyclic Resistance Ratio*) sebagai efek dari pemadatan tanah akibat *stone column*. Peningkatan nilai *safety factor* dapat di hitung dengan menggunakan persamaan 21 dibawah ini

$$FS' = \frac{CRR}{CSR} * n \quad (21)$$

Dimana:

FS' = faktor aman likuifaksi setelah pemasangan *stone column*

n = nilai faktor perbaikan pemasangan *stone column*

### 3. METODOLOGI PENELITIAN

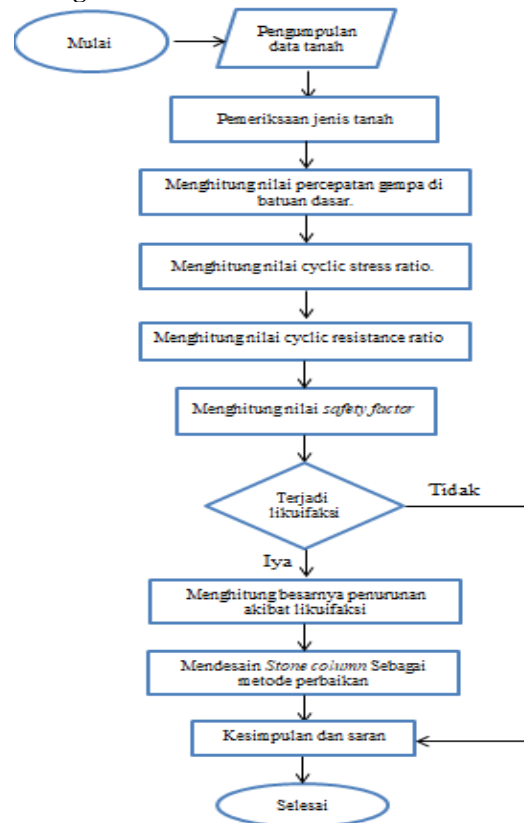
#### A. Tempat dan waktu penelitian

Lokasi penelitian berada pada Proyek Jalan Tol Manado – Bitung (STA 39+259 s/d 39+775) tepat berada di Kota Bitung , penelitian ini di lakukan pada bulan Desember tahun 2020 hingga pada bulan September 2021

#### B. Objek penelitian

Potensi likuifaksi yang terdapat di Proyek Jalan Tol Manado – Bitung pada STA 39+259 s/d 39+775 atau sepanjang 516 meter, yang dimana tanah pada daerah tersebut telah di lakukan pengujian oleh CV. INDOSAFAX.

### C. Diagram Alir



Gambar 4. Diagram alir

### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Analisis Potensi Likuifaksi

Perhitungan Potensi likuifaksi tanpa timbunan berdasarkan N-spt ialah sebagai berikut:

- Data :
  - Kedalaman lapisan z = 1 meter
  - M.A.T = 3 meter
  - Berat volume tanah ( $\gamma_{sat}$ ) = 17 kN/m<sup>3</sup>
  - Magnitude (Mw) = 7,5 SR
  - $a_{max}$  = 0,36 g
  - Berat volume air ( $\gamma_w$ ) = 10 kN/m<sup>3</sup>
  - $Magnitude\ scale\ factor = \frac{10^{2,24}}{M_w^{2,56}} = 1,00$

Tabel 4 menunjukkan hasil perhitungan analisis likuifaksi tanpa timbunan yang terjadi pada kedalaman 1 hingga 29 meter dan pada tabel 5 menunjukkan analisis potensi likuifaksi dengan adanya timbuna

**Tabel 4.** Perhitungan Analisis Potensi Likuifaksi Tanpa Timbunan

depth (m)	N-Spt (blow)	finest content <0,005	(n1)60	rd	$\tau_{eye}$ (kN/m <sup>2</sup> )	csr	$\alpha$	$\beta$	(N <sub>1</sub> ) <sub>60cs</sub>	crr	Sf <sub>L</sub>	Keterangan
1	2	5	3	0,994	3,955	0,565	0	1	3	0,058	0,103	likuifaksi
2	2	5	3	0,987	7,850	0,561	0	1	3	0,058	0,104	likuifaksi
3	2	5	3	0,979	11,689	0,557	0	1	3	0,058	0,105	likuifaksi
4	3	5	4	0,973	15,475	0,553	0	1	4	0,065	0,117	likuifaksi
5	3	5	4	0,965	19,203	0,549	0	1	4	0,065	0,118	likuifaksi
6	2	5	3	0,958	22,858	0,544	0	1	3	0,058	0,107	likuifaksi
7	2	5	3	0,949	26,413	0,539	0	1	3	0,058	0,108	likuifaksi
8	4	5	5	0,937	29,826	0,533	0	1	5	0,072	0,135	likuifaksi
9	4	5	5	0,923	33,043	0,524	0	1	5	0,072	0,137	likuifaksi
10	9	5	10	0,905	35,998	0,514	0	1	10	0,113	0,220	likuifaksi
11	9	5	11	0,883	38,630	0,502	0	1	11	0,122	0,243	likuifaksi
12	14	5	16	0,857	40,887	0,487	0	1	16	0,170	0,350	likuifaksi
13	14	5	15	0,827	42,749	0,470	0	1	15	0,160	0,341	likuifaksi
14	17	5	18	0,794	44,234	0,451	0	1	18	0,192	0,425	likuifaksi
15	17	5	17	0,761	45,394	0,432	0	1	17	0,181	0,418	likuifaksi
16	17	5	17	0,728	46,311	0,413	0	1	17	0,181	0,437	likuifaksi
17	17	5	16	0,696	47,073	0,396	0	1	16	0,170	0,430	likuifaksi
18	17	5	16	0,667	47,764	0,379	0	1	16	0,170	0,449	likuifaksi
19	17	5	15	0,641	48,447	0,364	0	1	15	0,160	0,439	likuifaksi
20	17	5	15	0,618	49,169	0,351	0	1	15	0,160	0,456	likuifaksi
21	17	5	15	0,598	49,956	0,340	0	1	15	0,160	0,471	likuifaksi
22	17	5	14	0,581	50,818	0,330	0	1	14	0,150	0,455	likuifaksi
23	17	5	14	0,566	51,758	0,321	0	1	14	0,150	0,467	likuifaksi
24	17	5	13	0,553	52,770	0,314	0	1	13	0,141	0,447	likuifaksi
25	17	5	13	0,541	53,845	0,308	0	1	13	0,141	0,457	likuifaksi
26	17	5	13	0,532	54,974	0,302	0	1	13	0,141	0,465	likuifaksi
27	17	5	13	0,523	56,147	0,297	0	1	13	0,141	0,473	likuifaksi
28	17	5	12	0,515	57,355	0,293	0	1	12	0,131	0,448	likuifaksi
29	17	5	12	0,508	58,589	0,289	0	1	12	0,131	0,454	likuifaksi
30	60	5	40	0,501	59,843	0,285	0	1	40	0,458	1,607	non-likuifaksi
31	60	5	40	0,496	61,111	0,282	0	1	40	0,458	1,627	non-likuifaksi
32	60	5	39	0,490	62,386	0,279	0	1	39	0,484	1,738	non-likuifaksi
33	60	5	38	0,485	63,666	0,276	0	1	38	0,527	1,911	non-likuifaksi
34	60	5	37	0,480	64,946	0,273	0	1	37	0,603	2,208	non-likuifaksi
35	60	5	37	0,476	66,223	0,270	0	1	37	0,603	2,229	non-likuifaksi
36	60	5	36	0,471	67,496	0,268	0	1	36	0,762	2,844	non-likuifaksi
37	60	5	35	0,467	68,762	0,265	0	1	35	1,255	4,724	non-likuifaksi
38	60	5	35	0,463	70,020	0,263	0	1	35	1,255	4,764	non-likuifaksi
39	60	5	33	0,459	71,268	0,261	0	1	33	1,240	4,748	non-likuifaksi
40	60	5	33	0,456	72,505	0,259	0	1	33	1,240	4,786	non-likuifaksi

depth (m)	N-Spt (blow)	finest content <0,005	(n1)60	rd	$\tau_{cyc}$ (kN/m <sup>2</sup> )	csr	$\alpha$	$\beta$	(N <sub>1</sub> ) <sub>60cs</sub>	crr	sf	keterangan
1	2	5	3	0,994	3,955	0,025	0	1	3	0,058	2,361	non-likuifaksi
2	2	5	3	0,987	7,850	0,047	0	1	3	0,058	1,242	non-likuifaksi
3	2	5	3	0,979	11,689	0,067	0	1	3	0,058	0,869	likuifaksi
4	3	5	4	0,973	15,475	0,085	0	1	4	0,065	0,759	likuifaksi
5	3	5	4	0,965	19,203	0,102	0	1	4	0,065	0,635	likuifaksi
6	2	5	3	0,958	22,858	0,117	0	1	3	0,058	0,498	likuifaksi
7	2	5	3	0,949	26,413	0,131	0	1	3	0,058	0,446	likuifaksi
8	4	5	5	0,937	29,826	0,143	0	1	5	0,072	0,505	likuifaksi
9	4	5	5	0,923	33,043	0,153	0	1	5	0,072	0,471	likuifaksi
10	9	5	10	0,905	35,998	0,161	0	1	10	0,113	0,701	likuifaksi
11	9	5	11	0,883	38,630	0,168	0	1	11	0,122	0,727	likuifaksi
12	14	5	16	0,857	40,887	0,173	0	1	16	0,170	0,987	likuifaksi
13	14	5	15	0,827	42,749	0,175	0	1	15	0,160	0,914	likuifaksi
14	17	5	18	0,794	44,234	0,176	0	1	18	0,192	1,088	non-likuifaksi
15	17	5	17	0,761	45,394	0,176	0	1	17	0,181	1,028	non-likuifaksi
16	17	5	17	0,728	46,311	0,175	0	1	17	0,181	1,035	non-likuifaksi
17	17	5	16	0,696	47,073	0,173	0	1	16	0,170	0,984	likuifaksi
18	17	5	16	0,667	47,764	0,171	0	1	16	0,170	0,995	likuifaksi
19	17	5	15	0,641	48,447	0,169	0	1	15	0,160	0,945	likuifaksi
20	17	5	15	0,618	49,169	0,168	0	1	15	0,160	0,954	likuifaksi
21	17	5	15	0,598	49,956	0,167	0	1	15	0,160	0,961	likuifaksi
22	17	5	14	0,581	50,818	0,166	0	1	14	0,150	0,907	likuifaksi
23	17	5	14	0,566	51,758	0,165	0	1	14	0,150	0,911	likuifaksi
24	17	5	13	0,553	52,770	0,164	0	1	13	0,141	0,855	likuifaksi
25	17	5	13	0,541	53,845	0,164	0	1	13	0,141	0,856	likuifaksi
26	17	5	13	0,532	54,974	0,164	0	1	13	0,141	0,856	likuifaksi
27	17	5	13	0,523	56,147	0,164	0	1	13	0,141	0,856	likuifaksi
28	17	5	12	0,515	57,355	0,164	0	1	12	0,131	0,798	likuifaksi
29	17	5	12	0,508	58,589	0,165	0	1	12	0,131	0,797	likuifaksi
30	60	5	40	0,501	59,843	0,165	0	1	40	0,125	0,758	likuifaksi
31	60	5	40	0,496	61,111	0,165	0	1	40	0,125	0,756	likuifaksi
32	60	5	39	0,490	62,386	0,165	0	1	39	0,084	0,509	likuifaksi
33	60	5	38	0,485	63,666	0,166	0	1	38	0,027	0,161	likuifaksi
34	60	5	37	0,480	64,946	0,166	0	1	37	0,603	3,628	non-likuifaksi
35	60	5	37	0,476	66,223	0,166	0	1	37	0,603	3,622	non-likuifaksi
36	60	5	36	0,471	67,496	0,167	0	1	36	0,762	4,572	non-likuifaksi
37	60	5	35	0,467	68,762	0,167	0	1	35	1,255	7,517	non-likuifaksi
38	60	5	35	0,463	70,020	0,167	0	1	35	1,255	7,507	non-likuifaksi
39	60	5	33	0,459	71,268	0,167	0	1	33	1,240	7,411	non-likuifaksi
40	60	5	33	0,456	72,505	0,167	0	1	33	1,240	7,404	non-likuifaksi

Berdasarkan hasil perhitungan pada tabel 4 dan tabel 5 terdapat perbedaan yaitu sebelum adanya timbunan, likuifaksi terjadi pada kedalaman 1 sampai 29 meter, sedangkan setelah adanya timbunan, likuifaksi terjadi hanya pada kedalaman tertentu, hal ini disebabkan oleh tanah timbunan yang dapat meningkatkan tekanan *overburden*.

Berdasarkan hasil perhitungan pada tabel 4 dan tabel 5 terdapat perbedaan yaitu sebelum adanya timbunan, likuifaksi terjadi pada kedalaman 1 sampai 29 meter, sedangkan setelah adanya timbunan,

likuifaksi terjadi hanya pada kedalaman tertentu, hal ini disebabkan oleh tanah timbunan yang dapat meningkatkan tekanan *overburden*.

Meningkatnya tekanan *overburden* menyebabkan semakin cepatnya kenaikan air pori sehingga likuifaksi masih dapat terjadi pada beberapa kedalaman tertentu.

Chandra O., dkk. (2017) menyatakan bahwa kenaikan air pori yang terjadi akan semakin besar seiring bertambahnya beban.

#### B. Penurunan Akibat Likuifaksi

Estimasi besar penurunan yang terjadi akibat likuifaksi ditunjukkan pada tabel 6.



Tabel 6. Penurunan Tanah Akibat Likuifaksi

boing log	Kedalaman(m)	Δz	n1	σ <sub>o</sub>	ev	s	stot
BH-1	0 s/d 10	10	10	70	3,5%	0,35	0,83
	10 s/d 20	10	17	140	2,4%	0,24	
	10 s/d 30	10	17	210	2,4%	0,24	

Berdasarkan tabel 6, didapatkan penurunan akibat likuifaksi sebesar 0,83 meter, yang dimana hal tersebut melebihi batas yang izinkan oleh karena itu perlu adanya perkuatan tanah, penurunan akibat likuifaksi diakibatkan oleh besarnya regangan volumetrik yang terjadi, semakin besar regangan volumetrik maka semakin besar pula penurunan yang terjadi.

**C. Desain Stone Column**

Penambahan kolom vertikal dapat memperkuat tanah dengan meningkatnya kekakuan tanah sehingga mengurangi kemungkinan tanah bergelombang, miring bahkan penurunan permukaan tanah akibat likuifaksi selama adanya beban gempa

• Direncanakan

- Jarak *Stone column* (s) = 2,1 meter
- Luas area *stone column* (ac) = 0,5024 m<sup>2</sup>
- Pola pemasangan *stone column* = segitiga
- Kohesi tanah initial (cs) = 1 kN/m<sup>2</sup>
- Sudut geser tanah initial (Φ<sub>s</sub>) = 21°
- Sudut geser *stone column* (Φ<sub>c</sub>) = 45°
- Berat jenis *stone column* (γ<sub>sc</sub>) = 10 kN/m<sup>3</sup>
- Modulus elastisitas (Ec) = 200000 kN/m<sup>3</sup>
- Poison ratio (μ) = 1/3 = 0,3333
- Beban yang bekerja :
  - Berat timbunan = γ \* h = 153 kN/m<sup>2</sup>
  - Beban perkerasan + lalu lintas = 20 kN/m<sup>2</sup>
  - Total beban (*full loading*) = 173 kN/m<sup>2</sup>

Tabel 7 menunjukkan peningkatan *safety factor* likuifaksi di pengaruhi oleh pemasangan *stone column*. Fathonah W., dkk (2021) menyatakan bahwa setelah adanya pemasangan *stone column*, *safety factor* likuifaksi meningkat secara signifikan

Tabel 7. Peningkatan *safety factor*

depth (m)	N-SPT (blow)	finest content <0,005	(n1)60	rd	τ <sub>yc</sub> (kN/m <sup>2</sup> )	csr	α	β	(N <sub>1</sub> ) <sub>60cs</sub>	crr	n1 s'	n2 s'	Keterangan	
													non-likuifaksi	non-likuifaksi
1	2	5	3	0,994	3,955	0,025	0	1	3	0,058	3,480	4,919	non-likuifaksi	non-likuifaksi
2	2	5	3	0,987	7,850	0,042	0	1	3	0,058	2,050	2,897	non-likuifaksi	non-likuifaksi
3	2	5	3	0,979	11,689	0,060	0	1	3	0,058	1,428	2,018	non-likuifaksi	non-likuifaksi
4	3	5	4	0,973	15,475	0,077	0	1	4	0,065	1,242	1,756	non-likuifaksi	non-likuifaksi
5	3	5	4	0,965	19,203	0,092	0	1	4	0,065	1,036	1,464	non-likuifaksi	non-likuifaksi
6	2	5	3	0,958	22,858	0,106	0	1	3	0,058	0,809	1,144	likuifaksi	non-likuifaksi
7	2	5	3	0,949	26,413	0,119	0	1	3	0,058	0,723	1,022	likuifaksi	non-likuifaksi
8	4	5	5	0,937	29,826	0,130	0	1	5	0,072	0,815	1,153	likuifaksi	non-likuifaksi
9	4	5	5	0,923	33,043	0,140	0	1	5	0,072	0,759	1,072	likuifaksi	non-likuifaksi
10	9	5	10	0,905	35,998	0,148	0	1	10	0,113	1,125	1,591	non-likuifaksi	non-likuifaksi
11	9	5	11	0,883	38,630	0,155	0	1	11	0,122	1,164	1,646	non-likuifaksi	non-likuifaksi
12	14	5	16	0,857	40,887	0,159	0	1	16	0,170	1,577	2,230	non-likuifaksi	non-likuifaksi
13	14	5	15	0,827	42,749	0,162	0	1	15	0,160	1,457	2,059	non-likuifaksi	non-likuifaksi
14	17	5	18	0,794	44,234	0,163	0	1	18	0,192	1,732	2,448	non-likuifaksi	non-likuifaksi
15	17	5	17	0,761	45,394	0,163	0	1	17	0,181	1,632	2,307	non-likuifaksi	non-likuifaksi
16	17	5	17	0,728	46,311	0,162	0	1	17	0,181	1,640	2,319	non-likuifaksi	non-likuifaksi
17	17	5	16	0,696	47,073	0,161	0	1	16	0,170	1,557	2,200	non-likuifaksi	non-likuifaksi
18	17	5	16	0,667	47,764	0,160	0	1	16	0,170	1,571	2,221	non-likuifaksi	non-likuifaksi
19	17	5	15	0,641	48,447	0,158	0	1	15	0,160	1,490	2,106	non-likuifaksi	non-likuifaksi
20	17	5	15	0,618	49,169	0,157	0	1	15	0,160	1,502	2,123	non-likuifaksi	non-likuifaksi
21	17	5	15	0,598	49,956	0,156	0	1	15	0,160	1,511	2,136	non-likuifaksi	non-likuifaksi
22	17	5	14	0,581	50,818	0,155	0	1	14	0,150	1,424	2,013	non-likuifaksi	non-likuifaksi
23	17	5	14	0,566	51,758	0,155	0	1	14	0,150	1,428	2,019	non-likuifaksi	non-likuifaksi
24	17	5	13	0,553	52,770	0,155	0	1	13	0,141	1,339	1,892	non-likuifaksi	non-likuifaksi
25	17	5	13	0,541	53,845	0,155	0	1	13	0,141	1,339	1,893	non-likuifaksi	non-likuifaksi
26	17	5	13	0,532	54,974	0,155	0	1	13	0,141	1,338	1,891	non-likuifaksi	non-likuifaksi
27	17	5	13	0,523	56,147	0,155	0	1	13	0,141	1,336	1,888	non-likuifaksi	non-likuifaksi
28	17	5	12	0,515	57,355	0,155	0	1	12	0,131	1,244	1,758	non-likuifaksi	non-likuifaksi
29	17	5	12	0,508	58,589	0,156	0	1	12	0,131	1,241	1,754	non-likuifaksi	non-likuifaksi
30	60	5	40	0,501	59,843	0,156	0	1	40	0,125	1,178	1,665	non-likuifaksi	non-likuifaksi
31	60	5	40	0,496	61,111	0,157	0	1	40	0,125	1,175	1,660	non-likuifaksi	non-likuifaksi
32	60	5	39	0,490	62,386	0,157	0	1	39	0,084	0,789	1,116	likuifaksi	non-likuifaksi
33	60	5	38	0,485	63,666	0,158	0	1	38	0,027	0,250	0,354	likuifaksi	likuifaksi
34	60	5	37	0,480	64,946	0,158	0	1	37	0,603	5,622	7,946	non-likuifaksi	non-likuifaksi
35	60	5	37	0,476	66,223	0,158	0	1	37	0,603	5,607	7,926	non-likuifaksi	non-likuifaksi
36	60	5	36	0,471	67,496	0,159	0	1	36	0,762	7,072	9,996	non-likuifaksi	non-likuifaksi
37	60	5	35	0,467	68,762	0,159	0	1	35	1,255	11,618	16,421	non-likuifaksi	non-likuifaksi
38	60	5	35	0,463	70,020	0,159	0	1	35	1,255	11,594	16,388	non-likuifaksi	non-likuifaksi
39	60	5	33	0,459	71,268	0,160	0	1	33	1,240	11,436	16,165	non-likuifaksi	non-likuifaksi
40	60	5	33	0,456	72,505	0,160	0	1	33	1,240	11,417	16,138	non-likuifaksi	non-likuifaksi

Jarak dan kedalaman *stone column* ditentukan dengan memperhitungkan peningkatan parameter kohesi ( $c$ ) dan sudut geser tanah ( $^\circ$ ). Kenaikan sudut geser tanah dibatasi lebih dari  $30^\circ$  dimana setara dengan nilai NSPT 20. Tabel 8 menunjukkan peningkatan parameter tanah yang di akibatkan oleh pemasangan *stone colum*

Tabel 8. Peningkatan parameter tanah

lapisan tanah	kedalaman	d	$\gamma_s$	$\zeta_s$	$\phi_s$	Improvement			
						$c^1$	$\phi^1$	$c^2$	$\phi^2$
1	0,0-5,0	5	17	1	20,81	0,929	28,717	0,929	33,96

peningkatan sudut geser tanah eksisting yang awalnya sebesar  $20,81^\circ$  menjadi sebesar  $28,717$  kemudian setelah adanya *full loading* sudut geser tanah meningkat menjadi  $33,96^\circ$ . yang dimana hal tersebut mempengaruhi tahanan tanah siklik (*Cyclic Resistance Ratio*).

(Ramadhan 2011) pemasangan *stone column* dapat meningkatkan sudut geser tanah sehingga menghasilkan lapisan tanah yang aman dari bahaya likuifaksi.

## 5. KESIMPULAN

1. Potensi likuifaksi dengan metode konvensional (NCEER) menunjukkan terdapat potensi likuifaksi hingga kedalaman maksimum 29 m untuk kondisi dengan adanya timbunan, sedangkan tanpa adanya timbunan likuifaksi terjadi pada kedalaman tertentu.
2. Metode mitigasi terhadap likuifaksi *Vibro Stone column* dengan diameter sebesar 80 cm dan jarak antar *stone column* sebesar 2.1 meter kedalaman 29 meter.
3. Pengaruh *improvement factor* maka *safety factor* terhadap likuifaksi meningkat, hal ini terjadi peningkatan sudut geser tanah eksisting yang awalnya sebesar  $20,81^\circ$  setelah adanya *full loading* sudut geser tanah meningkat menjadi  $33,96^\circ$ .

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- [1] Chandra O., A. Putra, Nugroho S. H. 2017. Potensi Likuifaksi pada Tanah Timbunan Pasir diatas Tanah Gambut dengan Variasi Berat Beban Melalui Uji Model Laboratorium, Vol 1
- [2] Fathonah W., Mina E., Kusuma R., & Hurtami R. 2021. Analisis potensi likuifaksi dan alternatif perbaikannya dengan metode *stone coloumn*.
- [3] Idriss, I, M, and W Boulanger. 2008. Soil Liquefaction During Earthquakes. Earthquake Engineering Research Institute.
- [4] Priebe, H. J. (1995). The design of vibro replacement. In *Ground Engineering* (Vol 28, Issue 10).
- [5] Pusat Studi Gempa Nasional. 2017. Peta Sumber Dan Bahaya Gempa Indonesia Tahun 2017. Jakarta: Pusat Penelitian dan Pengembangan Perumahan dan Permukiman.
- [6] Ramadhan A. 2011. Analisis Penggunaan *Stone Column* Pada Daerah Berpotensi Likuifaksi: Studi Kasus Proyek Airstrip Tanjung Ulie Halmahera, Maluku Utara. p. 8.

- [7] SNI 1726-2019 Tata Cara Perencanaan Ketahanan Gempa Untuk Bangunan Gedung Dan Non Gedung, pp. 29-39.
- [8] Seed, H.B., and Idriss I.M., 1971. *Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential. Journal Of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol 97, pp. 1249-1273.
- [9] U. S. Department of Transportation-Federal Highway Administration. Design and Construction of *Stone column* Vol. I.
- [10] Youd, T. L., & Idriss, I. M. (2001). Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER/NSF Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 127(4), pp. 297–313.