

JURNAL TEKNIK SIPIL

Jurnal Teoretis dan Terapan Bidang

Efektivitas Drainase Vertikal sebagai Mitigasi Likuefaksi dalam Ragam Potensi Percepatan Tanah Maksimum

Chariznantya Renatra*

Departemen Teknik Sipil Universitas Indonesia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia,
E-mail: chariznantyarenatra@gmail.com

Widjojo Adi Prakoso

Departemen Teknik Sipil Universitas Indonesia, Fakultas Teknik Universitas Indonesia,
E-mail: wprakoso@eng.ui.ac.id

Abstrak

Desa Lolu, berada di alur patahan Palu Koro dan memiliki stratifikasi sedimen tanah yang berlapis-lapis dengan karakter heterogen. Antara tanah kohesif dan granular, membentuk suatu lapis yang tumpang tindih. Desa Lolu memiliki tantangan tersendiri dalam menghadapi potensi gempa serta likuefaksi sebagai efeknya. Salah satu mitigasi likuefaksi pada SNI 8460:2017 adalah stone columns sebagai media drainase vertikal yang berfungsi untuk mempercepat laju disipasi air pori. Namun, kondisi tanah yang berlapis diselingi tanah kohesif dengan permeabilitas rendah, memberikan tantangan tersendiri dalam menentukan kedalaman stone columns. Perlu ditinjau, sejauh apa efektivitas stone columns terhadap Percepatan Tanah Maksimum (PGA) yang berpotensi terjadi di Desa Lolu. Stratifikasi tanah dan stone columns akan dimodelkan menggunakan Midas GTS NX. Lapis tanah dengan potensi likuefaksi menggunakan model UBC Sand dan stone columns dengan model Mohr Coulomb. Saat permodelan stratifikasi tanah diguncang beban siklik, didapati bahwa hanya lapisan granuler atas yang mengalami likuefaksi. Hal ini mengidentifikasi bahwa lapisan tipis tanah kohesif antar lapis granuler, memiliki peranan sebagai perisai untuk menahan tekanan air pori dari lapisan tanah granuler dibawahnya. Penelitian membandingkan kondisi tanah awal terhadap dua variasi kedalaman stone columns. Didapati, dengan kedalaman stone columns yang diteruskan menembus lapis tipis tanah kohesif antar lapis granuler, memperburuk kondisi likuefaksi lapis atas.

Kata-kata Kunci : Likuefaksi, Midas GTS NX, Pore Pressure Ratio PPR, stone columns

Abstract

Lolu Village, located in the Palu Koro fault groove and has a stratification of soil sediment that is layered with heterogeneous characters. Between the cohesive and granular soils, forming an overlapping layer. Loluvillage has its own challenges in dealing with the potential for earthquakes and liquefaction as a result. One of the liquefaction mitigations in SNI 8460:2017 is stone columns (SC) as a vertical drainage medium that functions to accelerate the rate of pore water dissipation. However, the condition of the layered soil interspersed with cohesive soil with low permeability, presents its own challenges in determining the depth of stone columns. It is necessary to review the extent of the effectiveness of SC against Peak Ground Accelerations (PGA) that have the potential to occur in Loluvillage. The stratification of the soil and stone columns will be modelled using the Midas GTS NX. Soil layers with liquefaction potential use the UBC Sand model and SC with the Mohr Coulomb model. When the stratification modeling of the soil was shaken by cyclic loads, it was found that only the upper granular layer was liquefaction. This identifies that the thin layer of cohesive soil between the layers of granular, has a role as a shield to resist the pore water pressure of the granular soil layer underneath. The study compared the initial soil conditions against two variations in the depth of SC. It was found that the depth of the SC was passed through the thin layer of cohesive soil between the granular layers, worsening the liquefaction condition of the upper layer.

Keywords : Liquefaction, Midas GTS NX, Pore Pressure Ratio PPR, stone columns

1. Pendahuluan

Indonesia, dengan keunikan lokasi geologinya, membentang di antara pertemuan Lempeng Pasifik, Eurasian dan Indo-Australian. Lempeng-lempeng tersebut terus bergerak, membentuk dataran tinggi hingga

hingga lembah, yang menghasilkan topografi cukup kontras di beberapa wilayah disertai lapisan geologi yang beragaam. Salah satu contoh keunikan geologi dan stratifikasi akibat pergerakan lempeng di Indonesia

* Penulis Korespondensi: chariznantyarenatra@gmail.com

adalah daerah Palu, Sulawesi Tengah. Kota Palu berada di teluk Palu di mana Selat Makassar yang menjorok ke daratan dan dibelah oleh sungai Palu yang mengalir dari Pegunungan Kulawi terus ke barat laut mengikuti alur patahan Palu Koro. Hal tersebut menyebabkan Palu berdiri di deposit lapisan tanah yang terdiri dari lapisan-lapisan dengan perbedaan karakteristik yang cukup kontras. Lapisan tersebut tersusun dari tanah dengan potensi likuifaksi yang berselang-seling dengan tanah non potensi likuifaksi membentuk stratifikasi tanah yang unik. Pada penelitian ini terdapat dua lapis utama lapis likuifaksi, yang berikutnya disebut lapis atas, dengan tanah granuler di kedalaman 1 sd. 4 meter dan lapis bawah dengan tanah granuler di kedalaman 5 sd. 9 meter (**Gambar 1**). Kedua lapisan ini diselingi oleh tanah tipis kohesif, dengan permeabilitas rendah yang tidak teridentifikasi akan terlikuifaksi.

Dengan kondisi yang berada di patahan Palu Karo, ditambah deposit tanah yang terdiri dari beberapa lapis pasir yang tidak padat, Kota Palu menjadi rentan terguncang gempa yang disertai efek likuifaksi. Sejarah likuifaksi menyebabkan kerusakan fasilitas dan infrastruktur di atasnya pada tahun 2018 silam. Untuk menghindari kerusakan serupa, sesuai SNI 8460:2017, Persyaratan Perencanaan Geoteknik, menyebutkan salah satu mitigasi yang diusulkan sebagai perbaikan untuk tanah dengan potensi likuifaksi adalah *Stone Columns*. *Stone Columns* sendiri dilaksanakan dengan melakukan pengeboran dan pengisian lubang berisi material agregat dengan cara digetarkan. Efek penggetaran tersebut dapat memadatkan *stone columns* dan mendesak tanah sekitarnya sehingga menambah kepadatan *stone columns* dan tanah sekitarnya. Selain itu, fokus penelitian ini pada fungsi *stone columns* yang terdiri material kerikil dengan gradasi yang cukup besar berperan sebagai media permeabilitas, untuk mempercepat proses disipasi pada kondisi tanah berpasir jenuh air yang mengalami likuifaksi, sehingga tidak terjadi kenaikan air pori.

Untuk mengetahui efektivitas *stone columns* selaku media drainase vertikal, akan dimodelkan stratifikasi tanah yang sama menggunakan tiga kondisi, yaitu kondisi tanah awal tanpa *stone columns*. Kemudian kondisi tanah dengan *stone columns* sampai dengan sampai dengan kedalaman 4 meter dan *stone columns* sampai dengan kedalaman 9 meter. Ketiga kondisi tersebut kemudian masing-masing diberi beban siklik dengan dua nilai PGA yang berbeda. Hasil dari permodelan adalah nilai *Excess Pore Pressure Ratio* (PPR) sebagai identifikasi apakah tanah terlikuifaksi atau tidak pada permodelan awal. Kemudian akan dibandingkan terhadap kondisi dengan *stone columns*, apakah air pori terdisipasi

atau tidak dengan identifikasi perubahan nilai PPR. Nilai PPR pada beberapa titik tinjau menggambarkan arah aliran air pori. Mengutip Prakoso (2022), saat *excess pore pressure ratio* pada lapisan bawah mulai menurun kemudian diikuti naiknya *excess pore pressure ratio* lapis atas, merupakan indikasi aliran *excess pore pressure* naik ke permukaan.

Namun, aliran air di dalam *stone columns* dan pada tanah non-likuifaksi tidak dijelaskan pada penelitian ini terkait keterbatasan hasil dari permodelan. Titik tinjau nilai PPR pun diambil pada posisi tengah antar *stone columns* dan tepat di sisi *stone columns*. Nilai PPR pun dibatasi selama durasi catatan gempa.

Selain itu, walaupun *stone columns* sendiri memiliki fungsi lain untuk memadatkan tanah disekitarnya, efek dari hal tersebut tidak diperhitungkan dalam penelitian ini.

2. Parameter Tanah dan Percepatan Puncak di Desa Lolu

Pengambilan sampel tanah telah di ambil pada Desa Lolu, Sulawesi Tengah yang mengalami pergeseran lateral besar efek likuifaksi pada gempa 2018 lalu. Menggunakan data Nurizkatilah (2020), terutama data penyelidikan tanah borlog BH-02 yang kemudian menjadi dasar permodelan untuk lapisan tanah dengan potensi likuifaksi diselingi tanah kohesif yang tidak memiliki potensi likuifaksi.

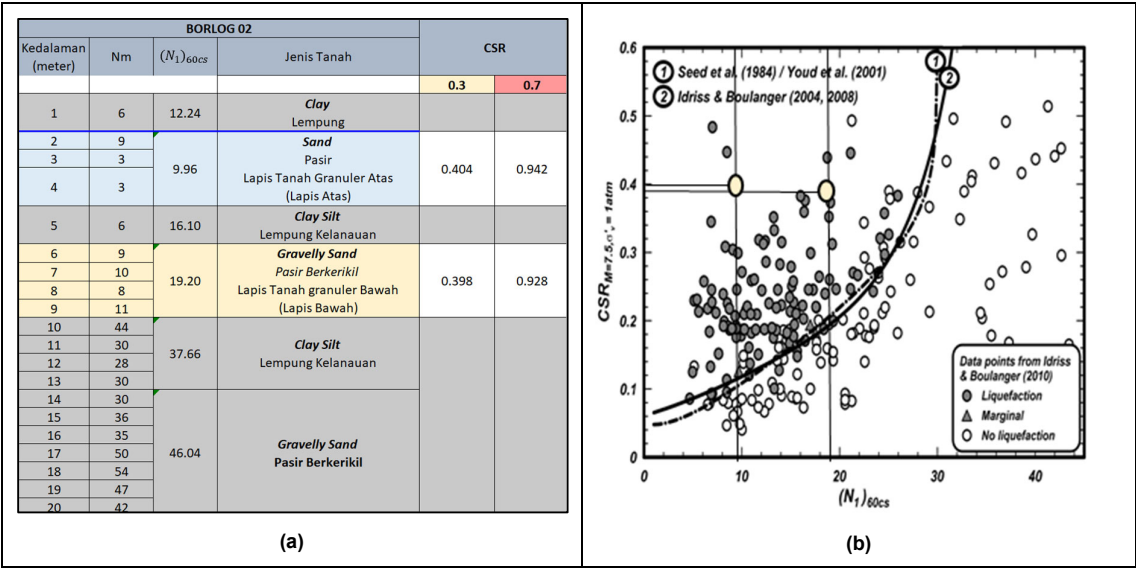
Lebih lanjut, untuk kembali memastikan potensi likuifaksi, maka hasil hitungan sesuai Metode Youd dkk (2001), pada **Gambar 1**, di plot pada grafik hubungan CSR Versus $(N_1)_{60cs}$. Permodelan akan terdapat dua lapis yang dianggap memiliki potensi likuifaksi. Lapis Atas dengan nilai $(N_1)_{60cs}$ sama dengan 9,96 dengan material pasir berada di kedalaman 1 sampai dengan 4 meter. Diselingi lapisan tanah non kohesif setebal satu meter. Berikutnya terdapat tanah dengan potensi likuifaksi kedua, dengan material pasir berkerikil nilai $(N_1)_{60cs}$ adalah 19,2. Ketebalan lapisan dua ini adalah empat meter. Menembus sampai dengan kedalaman keseluruhan 9 meter. Dibawahnya, pada kedalaman 9 s.d. 13 meter terdapat lapisan lempung kelanauan dengan *friction angle* yang rendah, yaitu 10° .

Kedua lapisan kemudian di plot pada grafik *Cyclic Stress Ratio* (CSR) terhadap $(N_1)_{60cs}$ oleh Idriss dan Boulanger (2008), untuk mengetahui seberapa besar potensi likuifaksinya pada setiap lapisnya. Namun perlu diingat, pada pengisian grafik ini, tidak terlalu jauh mempertimbangkan terhadap kondisi stratifikasi tanah yang berlapis. Perhitungan berdasarkan tekanan *overburden* efektif yang dipengaruhi lapisan di atasnya secara menerus.

Sedangkan untuk penentuan beban gempa, mengacu kepada SNI 8460:2017, Pasal 12.2 Persyaratan teknis perancangan kegempaan, Tabel 52. Kriteria perancangan gempa berdasarkan peruntukan infrastruktur, dikarenakan kondisi lahan yang diteliti belum terdapat rencana peruntukannya, sehingga diambil peruntukan bangunan gedung dan non-gedung. Umur rencana peruntukan bangunan gedung dan non gedung adalah 50 tahun dengan probabilitas terlampaui 2%. Dari kriteria tersebut, akan merujuk ke Peta Percepatan Puncak yang telah diterbitkan oleh Badan Penelitian dan Pengembangan, Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat dengan probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun. Sesuai yang tertera pada gambar peta percepatan puncak di batuan dasar (SB) untuk

probabilitas terlampaui 2% dalam 50 tahun, didapati pada kisaran daerah Desa Lolu, memiliki nilai PGA senilai sekitar 0,7g.

Sebagai pembanding yang kontras, akan dilakukan permodelan dengan umur rencana paling rendah yang terdapat pada Peta Percepatan Puncak, yaitu probabilitas terlampaui 20% dalam 10 tahun. Pada peta percepatan puncak dasar di batuan dasar (SB) untuk probabilitas terlampaui 20% dalam 10 tahun, didapati nilai PGA pada lokasi yang sama adalah di sekitar 0,3g. Sehingga, akan dilakukan dua permodelan dengan stratifikasi tanah yang sama, namun percepatan puncak yang berbeda. Yaitu percepatan puncak PGA = 0,3g dan PGA = 0,7g.



Gambar 1. (a) Tabel parameter tanah (b) Grafik perbandingan CSR versus (N₁)_{60cs} Metode Youd dkk (2001)

BORLOG 02			Parameter General						Parameter UBC Sand				
Kedalaman	N1(60cs)	Jenis Tanah	Elastic Modulus	Poisson Ration	Unit Weight	Permeability	Kohesi	Friction Angle	Elastic Shear Modulus K_{vs}^e	Peak Friction Angle Φ_{peak}	Constan Volume Friction Angle Φ_{cv}	Plastic Shear Modulus Number	Post Liquefaction Calibration
			kN/m ²		kN/m ³	m/sec	kN/m ²	deg		deg	deg		
0													
1	12.24	Clay Lempung	10,725	0.15	17	1E-07	10	20					
2	9.96	Sand Pasir	21450	0.2	16	0.001	7	30	933	32	31	378	0,7
3													
4													
5	16.10	Clay Silt Lempung Kelanauan	42,900	0.15	18	1E-07	15	20					
6	19.20	Gravelly Sand Pasir Berkerikil	75075	0.3	18	0.001	20	33	1161	35	33	980	0,7
7													
8													
9	37.66	Clay Silt Lempung Kelanauan	75075	0.3	18	1E-07	20	10					
10													
11													
12	46.04	Gravelly Sand Pasir Berkerikil	160875	0.4	22	0.0001	20	40					
13													
14													
15													
16													
17													
18													
19													
20													
		Stone Columns	90,000	0.35	20	0,1	2	37					

Gambar 2. Parameter tanah dalam Permodelan GTS NX UBC San

3. Stone Columns

Parameter stone columns dapat dilihat pada **Gambar 3**, baris paling bawah. Dapat dilihat dari nilai permeability, dengan material granuler, stone columns dirancang untuk dapat mengalirkan air lebih cepat dari tanah UBC yang memiliki potensi likuefaksi. Selain itu elastic modulus dirancang lebih kaku dari tanah sekitarnya. Hal ini terkait terhadap penyerapan energi saat terjadi beban gempa.

Kenaikan tekanan efektif air pori saat terjadi getaran sangat dipengaruhi dari frekuensi catatan gempa. Umumnya, PPR mengalami peningkatan tajam mengikuti saat puncak getaran mulai terjadi. Dalam hal ini, agar tidak memperparah kenaikan air pori, dibutuhkan suatu media untuk membantu disipasi air pori pada lapisan likuefaksi.

Hasil dari gradasi tersebut dimasukkan ke dalam rumus Hazen, persamaan 1, untuk mendapatkan nilai konduktivitas hidraulik stone columns yang dimodelkan. Namun mempertimbangkan kondisi lapangan, sering kali pada daerah-daerah sulit ditemukan material sesuai yang rancangan awal dan keterbatasan disposasi di lokasi, nilai permeabilitas yang diterapkan pada permodelan Midas GTS diturunkan hingga hampir mencapai 10% nya. Nilai akhir yang dipakai adalah 0,1 meter per detik.

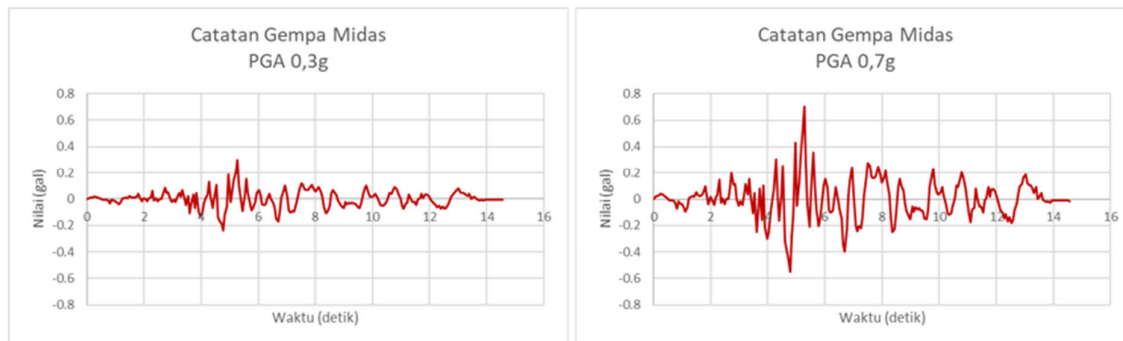
$$k = \frac{1}{100} (D_{10})^2 \quad (1)$$

k = Konduktivitas hidraulik (m/detik)
 D_{10} = Besaran diameter butiran sehingga 10% dari total butiran lolos/lebih kecil dari diameter tersebut (mm)

4. Permodelan Gempa dengan Midas GTS NX

Dalam permodelan ini, digunakan catatan gempa dari aplikasi Midas GTS NX pada modul *2D Liquefaction Analysis for Bridge Abutment*, seperti terlihat pada Gambar 3. Nilai puncak di permukaan tanah pada catatan gempa ini adalah 0,132. Nilai tersebut kemudian di skala untuk mendapatkan variasi *Peak Ground Acceleration* (PGA) Kota Palu yang sudah ditentukan sebelumnya, yaitu PGA 0,3g dan PGA 0,7g (**Gambar 3**). Masing-masing kode untuk variasi permodelan diterangkan dinamakan sesuai dengan Tabel 1.

Untuk analisis seismik, dikarenakan mustahil untuk membuat model yang tidak terbatas, diperlukan sejenis batasan pada tepi-tepi permodelan, yang berfungsi mengeliminasi efek refleksi gelombang seismik itu sendiri. Batasan yang berfungsi memutus efek gelombang biasa disebut dengan *free field*. Pada permodelan ini, juga digunakan *absorbent boundary* yang berfungsi mengeleminasi refleksi gelombang pada lapisan tanah dasar.



Gambar 3. Catatan gempa Midas (a) PGA 0,3g (b) PGA 0,7g

Permodelan dengan Midas GTS menggunakan model *UBS Sand* untuk mendapatkan nilai *pore pressure ratio* (PPR) sebagai *output* untuk indikasi terjadinya likuefaksi ataupun tidak. Nilai PPR merupakan rasio perubahan tekanan air pori berlebih. Yaitu deviasi perubahan tekanan air pori akibat beban siklik dibandingkan terhadap tekanan efektif awal. Mendekati 1,0 diartikan likuefaksi telah terjadi. Menurut Hutabarat dan Bray (2021), nilai 0,8 sudah mengidentifikasi bahwa karakter tanah telah berubah menjadi likuid.

$$PPR = -\frac{\Delta P_w}{P'_{init}} = -\frac{P'_{init} - P'_{current}}{P'_{init}} \quad (2)$$

ΔP_w = Excess Pore Pressure Change

P'_{init} = Initial Effective Pressure

$P'_{current}$ = Current Effective Pressure

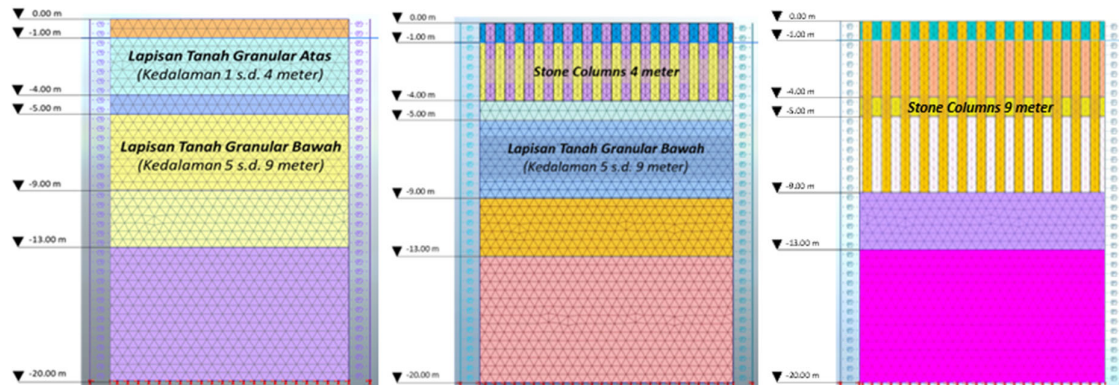
Oktarina (2023) menyebutkan akumulasi dari *excess pore pressure* selama getaran siklik, menyebabkan penurunan *effective stress* yang pada akhirnya menyebabkan likuefaksi. Pada fenomena di gempa Palu 2018, menyebabkan akumulasi *excess pore*

pressure yang memicu hilangnya kekuatan dan kekakuan tanah sehingga terjadi kerusakan yang luas.

Dengan parameter tanah sesuai **Gambar 2** dan input catatan gempa pada **Gambar 3**, dilakukan permodelan stratifikasi tanah sesuai dengan Borlog 2 Nurizkatilah (2020). Dilakukan simplifikasi permodelan dilapangan berbentuk tiga dimensi, menjadi permodelan dua dimensi. Permodelan ini tetap diharapkan dapat menangkap fenomena dasar seperti aliran air pori saat terjadi likuefaksi. Menurut Cubrinovski (2019), kondisi likuefaksi pada suatu lapis dipicu dari kedalaman yang lebih dalam dan kemudian memberikan efek ke tanah di atasnya.

Sehingga aliran air kemudian naik mendekati permukaan.

Gambar 4.a menunjukkan permodelan awal dengan Midas GTS NX, ketika kondisi tanah dengan stratifikasi yang memiliki beberapa lapis berselang seling antara tanah kohesif yang tidak berpotensi likuefaksi, dan tanah dengan material granular yang memiliki potensi likuefaksi. Elevasi muka air tanah adalah satu meter di bawah permukaan tanah, sehingga kedua tanah granular ini berada di bawah muka air tanah hingga bersifat jenuh air. Salah satu syarat terjadi likuefaksi sendiri adalah tanah granular yang bersifat jenuh air.



Gambar 4. Permodelan pada midas GTS NX (a) Kondisi tanah awal (b) kondisi dengan *stone columns* 4 meter (c) kondisi dengan *stone columns* 9 meter

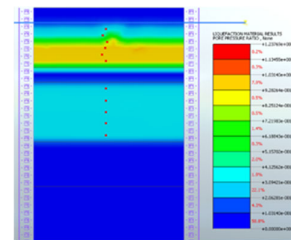
Antara lapisan tanah *Sand* (kedalaman 1 sd. 4 meter) dengan *Gravelly Sand* (kedalaman 5 sd. 9 meter), terdapat lapisan tanah *clay silt* (lempung kelanauan) setebal satu meter dengan nilai permeabilitas yang rendah, yaitu 1×10^{-7} meter per detik. Sedangkan tanah granular memiliki permeabilitas 1×10^{-3} . Perbedaan permeabilitas hingga 10.000 kali tersebut menjadi lapisan tanah lempung kelanauan tersebut bersifat layaknya membran pemisah antara dua lapis tanah granular. Untuk tanah granular dimodelkan dengan UBC Sand, sedangkan tanah kohesif akan dimodelkan dengan *Mohr Coulomb*.

Setelah dilakukan analisa dengan permodelan pertama seperti pada gambar 4.a, dengan kondisi awal tanpa *stone columns* menggunakan variasi catatan gempa, apabila terdapat lapisan tanah yang mengalami likuefaksi, akan dimodelkan kembali. Permodelan kedua adalah ketika kedalaman *stone columns* sampai dengan kedalaman 4 meter (Gambar 4.b). Permodelan ketiga *stone columns* menembus sampai dengan lapisan tanah granular kedalaman 9 meter (Gambar 4.c). Diameter yang dimodelkan adalah satu meter dan jarak antar as *stone columns* adalah dua meter.

4.1. Permodelan gempa kondisi awal tanpa *Stone Columns*

Permodelan menggunakan GTS NX kondisi Desa Lolu, Borlog - 02 dengan kondisi awal ketika belum terdapat *stone columns*. Permodelan dilakukan dengan dua variasi percepatan puncak di batuan dasar, yang pertama adalah PGA 0,3g (**Gambar 5**) (**Gambar 7**).

4.1.1. Model kondisi awal dengan input gempa PGA 0,3g



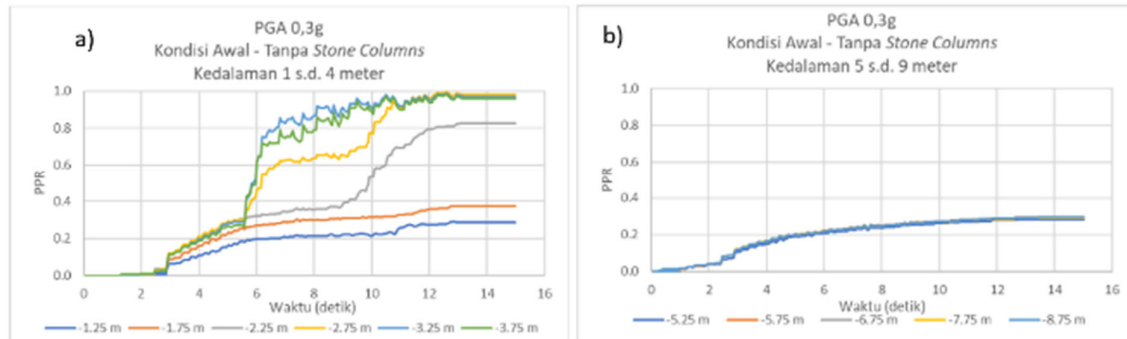
Gambar 5. Maximum Value Contour Pore Pressure Ratio (PPR) dengan PGA = 0,3g

Pada **Gambar 5**, dapat dilihat kedalaman yang mengalami likuefaksi ataupun tidak. Pada Midas GTS NX, legenda sebelah kanan menunjukkan semakin terang dan mendekati merah, memiliki

pengertian bahwa *Pore Pressure Ratio* (PPR) semakin tinggi dan hal tersebut mengidentifikasi likuefaksi. *Value contour* berwarna jingga menjelaskan bahwa dengan PGA 0,3g, likuefaksi terjadi lebih dahulu di kedalaman lebih dalam pada lapisan pasir. Hal tersebut senada dengan **Grafik 6.a**, saat PPR melebihi 0,8 pada kedalaman 2,25 meter s.d. 3,75 meter.

Cubrinovski (2019) yang menyebutkan bahwa likuefaksi terpacu pada kedalaman yang lebih dalam terlebih dahulu, sesuai dengan penjelasan diatas.

Selain itu, pada PGA = 0,3g, aliran alir belum menuju permukaan selama durasi gempa sepanjang 15 detik, sehingga PPR pada kedalaman 1,25 meter dan 1,75 meter masih bernilai di bawah 0,8. Sedangkan pada kedalaman 5 s.d.9 meter, *contour* masih berwarna biru terang, menjelaskan bahwa PPR masih rendah dan tidak terjadi likuefaksi. Hal tersebut tergambarkan pada **Gambar 6b**. Semua PPR pada titik tinjau pada kedalaman 5,25 m s.d. 8,75 meter berada dikisaran 0,3.



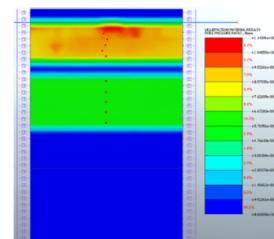
Gambar 6. Grafik PPR hasil permodelan kondisi awal dengan PGA = 0,3g

Namun, apabila disandingkan dengan perbandingan CSR versus $(N_1)_{60CS}$. Metode Youd dkk (2001) pada **Gambar 1**, terdapat perbedaan, bahwa lapisan pasir di kedalaman 5 s.d. 9 meter turut mengalami likuefaksi. Hal ini bisa terjadi karena pada Metode Youd dkk (2001), efek dari sisipan lapisan tipis lempung kelanauan yang memiliki permeabilitas rendah, belum diperhitungkan. Menurut Hutabarat (2020), lapisan stratifikasi tanah dengan permeabilitas rendah meningkatkan tekanan air pori pada lapis tanah granular di bawahnya, namun jumlah dan tingkat aliran air pori tidak cukup kuat untuk naik melewati lapisan tersebut.

Perbedaan hasil terhadap Metode Youd dkk (2001) lainnya, yaitu ketika suatu lapisan mengalami likuefaksi, tidak dapat diketahui lokasi detail pada kedalaman dimana saja. Sedangkan dengan permodelan Midas GTS NX, dapat ditentukan titik tinjau pada setiap lapisan untuk diketahui nilai *PPR*-nya.

Perlu ditambahkan catatan, bahwa sesuai material properties pada **Gambar 2**, dapat dilihat perbedaan *friction angle* yang cukup signifikan terhadap lapisan pasir berkerikil di kedalaman 5 s.d. 9 meter dengan terhadap lempung kelanauan di kedalaman 9 s.d. 13 meter. Hal ini turut memberikan sumbangsih tidak terjadinya likuefaksi pada permodelan UBC sand di kedalaman 5 s.d. 9 meter.

4.1.2. Model kondisi awal dengan input gempa 0,7g



Gambar 7 Maximum Value Contour Pore Pressure Ratio (PPR) dengan PGA = 0,7g

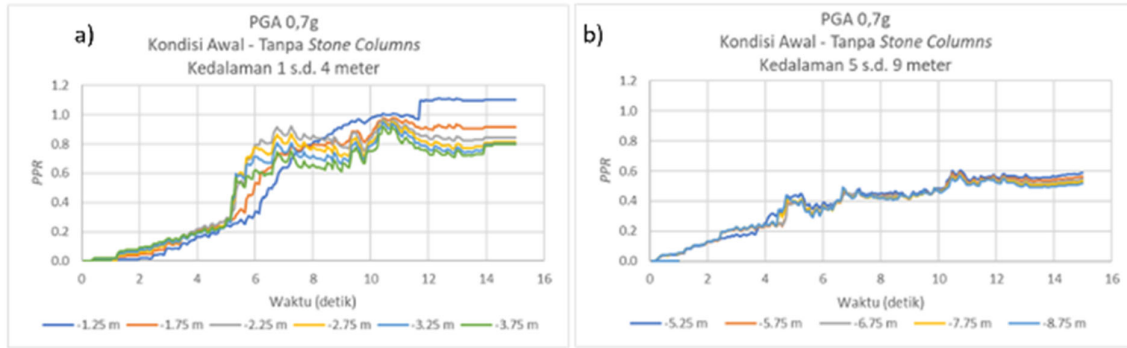
Pada PGA = 0,7g memiliki kemiripan dengan PGA = 0,3g. Likuefaksi tetap terjadi hanya pada lapis pasir kedalaman 1 s.d. 4 meter saja. Namun, dengan PGA yang lebih tinggi, lapisan tanah pasir di kedalaman 1 s.d. 4 meter terindikasi mengalami likuefaksi pada semua titik tinjau ditandai *contour* yang semakin terang, dan warna merah mendekati permukaan (Gambar 7). Apabila diperhatikan pada **Gambar 8.a**, garis PPR 1,25 meter terus melaju naik melebihi PPR 1, disaat titik tinjau lainnya mengalami penurunan. Hal ini senada dengan *countur* yang berwarna merah di permukaan. Menandakan bahwa aliran air dari bawah menuju ke atas.

Namun, **Gambar 7** juga menggambarkan warna hijau secara homogen pada keseluruhan lapisan granuler di kedalaman 5 s.d. 9 meter dengan tebal 4

meter. **Gambar 8.b** memperlihatkan nilai PPR konstan, yaitu dikisaran 0,6. Dikarenakan nilai PPR belum mencapai 0,8, mengidentifikasi tidak terjadinya likuefaksi.

Hal tersebut masih sejalan, ketika lapisan lempung

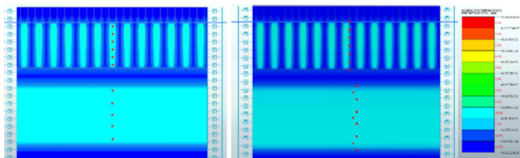
dengan permeabilitas rendah bersifat menjadi membran yang mencegah kenaikan air pori merembes keatas. Semakin tebal lapisan membran di atas lapisan likuefaksi, makin semakin mereduksi kenaikan *pore pressure* saat gempa terjadi.



Gambar 8. Grafik PPR hasil permodelan kondisi awal dengan PGA = 0,7g

4.2. Permodelan gempa dengan *Stone Columns* 4 meter

4.2.1. Model dengan *input* gempa PGA 0,3g



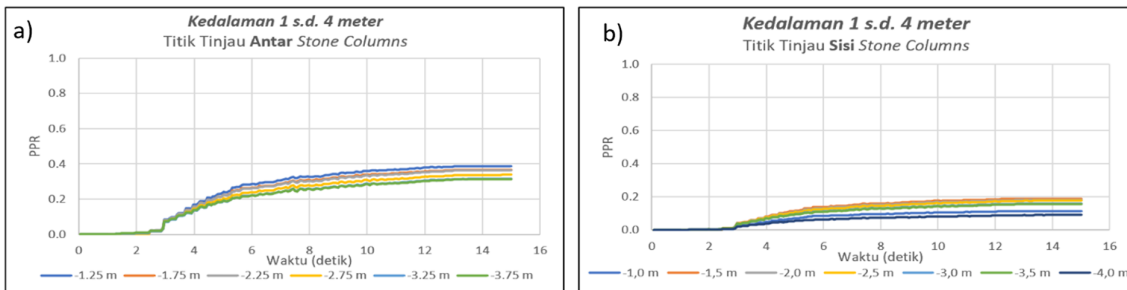
Gambar 9. *Maximum Value Contour* PPR PGA = 0,3g permodelan SC 4 meter (a) titik tinjau antar SC (b) titik tinjau sisi SC

Gambar 9.a menunjukkan pengambilan titik tinjau diantara *stone columns*. Sedangkan **Gambar 9.b** menunjukkan titik tinjau di sisi *stone columns*. Pada kondisi tanpa *stone columns* lapisan 1 s.d. 4 meter berwarna jingga di kedalaman 2,25 s.d. 4 meter (**Gambar 5**), dengan adanya SC, semua kedalaman berwarna biru terang, sebagai indikasi PPR yang

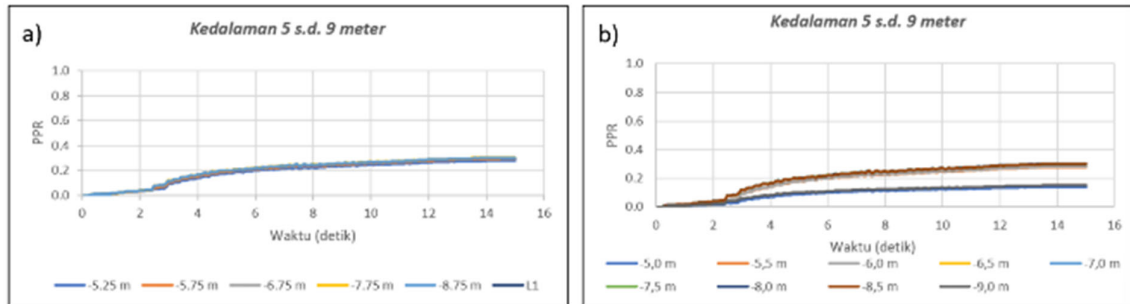
rendah. Hal tersebut menunjukkan bahwa *stone columns* dengan nilai permeabilitas 0,1 meter per detik, atau 100 kali dari permeabilitas tanah granular, mampu untuk mempercepat laju disipasi air pori.

Pada **Gambar 10.a**, setelah ditanam *stone columns* 4 meter, mengalami penurunan yang homogen pada setiap titik tinjau dengan nilai PPR di bawah 0,4 pada kedalaman 1 s.d 4 meter. Sedangkan **Gambar 10.b**, dengan titik tinjau di sisi SC, menunjukan nilai PPR yang lebih rendah, yaitu di dibawah 0,2 pada semua titik tinjau. Hal tersebut memperlihatkan bahwa semakin mendekati *stone columns*, PPR semakin mengalami penurunan.

Sedangkan untuk lapisan di kedalaman 5 s.d. 9 meter, masih memiliki nilai PPR yang stabil, yaitu 0,3 (**Gambar 11.a** dan **Gambar 11.b**). Hal tersebut dikarenakan pada PGA = 0,3g, kondisi tanpa SC, lapisan ini tidak mengalami likuefaksi.



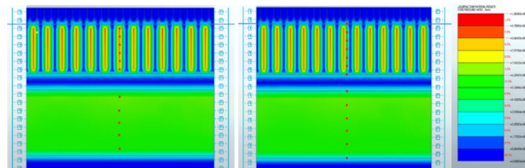
Gambar 10. Grafik PPR hasil permodelan SC 4 meter PGA = 0,3g pada kedalaman 1 s.d. 4 meter (a) di bawah titik tinjau antar SC (b) di bawah titik tinjau sisi SC



Gambar 11. Grafik PPR hasil permodelan SC 4 meter PGA = 0,3g pada kedalaman 5 s.d. 9 meter (a) di bawah titik tinjau antar SC (b) di bawah titik tinjau sisi SC

4.2.2. Model dengan input gempa PGA 0,7g

Gambar 12 menggambarkan kondisi PPR pada PGA = 0,7g. Dapat dilihat bahwa dengan percepatan tanah yang lebih tinggi, pengaruh jarak SC semakin mempengaruhi. Contour berwarna merah, dengan PPR tertinggi, berada tepat di tengah jarak antar SC. Sedangkan semakin mendekati SC, contour semakin berwarna hijau. **Gambar 12.a** yang memperlihatkan pengambilan titik tinjau antar SC, yang kemudian akan di detailkan nilai PPR nya pada grafik di **Gambar 13.a**. Sedangkan pada titik tinjau sisi SC yang diperlihatkan pada **Gambar 12.b**, akan diperjelas pada grafik di **Gambar 13.b**.



Gambar 12. Maximum Value Contour PPR PGA = 0,3g permodelan SC 4 meter (a) titik tinjau antar SC (b) titik tinjau sisi SC

Grafik pada **Gambar 13.a** menunjukkan bahwa keseluruhan titik tinjau setelah 11 detik mencapai PPR 0,8, sehingga terindikasi terlikuefaksi. Hal yang membedakan dengan kondisi awal adalah, tanpa SC titik tinjau kedalaman 1,25 m dan 1,75 meter terus mengalami lonjakan PPR melebihi satu, meskipun durasi gempa telah selesai di lima belas detik (**Gambar 8.a**).

Namun, dengan adanya stone columns, setelah lima detik, yaitu puncak gempa, terdapat perubahan pola aliran yang di wakili grafik pada **Gambar 13.a**. Hal tersebut ditandai dengan titik tinjau 3,25 meter dan 3,75 meter, yang awalnya memiliki PPR tertinggi sampai dengan lima detik, kemudian stabil

sampai kedelapan detik. Sampai akhir durasi gempa, lima belas detik, kedalaman tersebut memiliki PPR terendah. Sedangkan kedalaman lebih dangkal lainnya, seperti 1,25 m dan 1,75 m, meningkat PPR nya setelah lima detik, usai puncak gempa, kemudian melandai dan merata pada sepuluh detik. **Gambar 13.a** menunjukkan aliran air saat adanya SC, mengalir dari bawah ke atas.

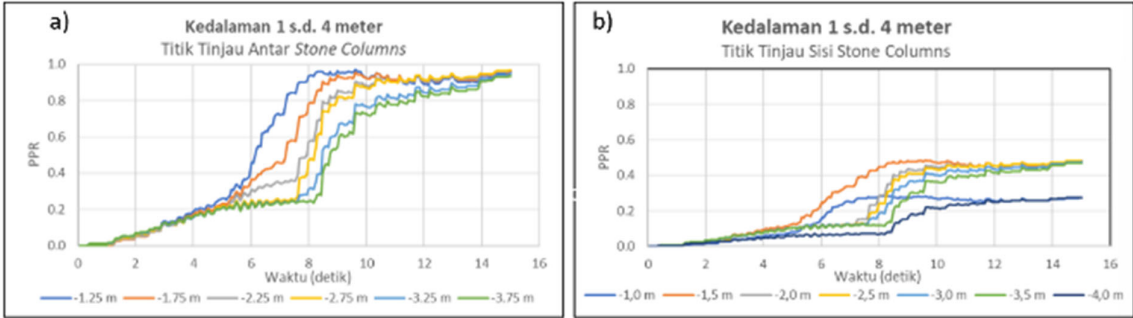
Menurut Sarimurat dkk (2022), efek positif dari stone columns adalah meningkat dari bawah ke atas. Hal ini dikarenakan jarak drainase menjadi lebih pendek ke permukaan. Kemudian mendekati titik keempat belas, semua titik tinjau memiliki nilai PPR yang relatif sama. Hal tersebut masih sejalan dengan penelitian Sarimurat dkk (2022).

Pada **Gambar 13.b** menjelaskan bahwa efektivitas drainase stone columns sangat terpengaruhi oleh jarak. Semakin mendekati SC, efektivitas drainase semakin meningkat sehingga nilai PPR lebih rendah, dibawah 0,6.

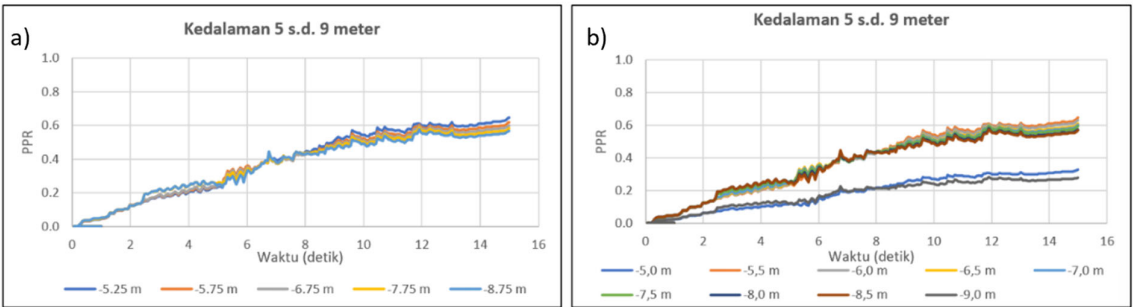
Sedangkan pada kedalaman 5 s.d. 9 meter tidak terdapat perbedaan signifikan baik di titik tinjau antar maupun sisi SC. Hal tersebut dikarenakan tidak ada pengaruh stone columns di sana.

4.3. Permodelan gempa dengan Stone Columns 9 meter

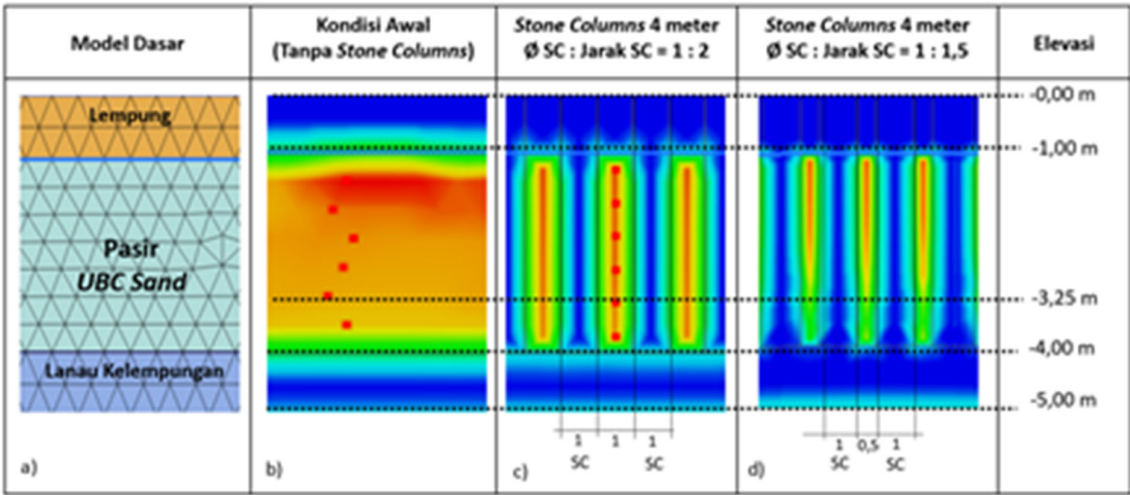
Pada PGA = 0,3g, terbukti bahwa *stone columns* dengan kedalaman 4 meter dapat mempercepat proses disipasi. Meskipun dengan permodelan sebelumnya *stone columns* cukup mereduksi potensi likuefaksi, namun tetap dilakukan permodelan sampai dengan stone columns kedalaman 9 meter. Hal tersebut dikarenakan sesuai **Gambar 1**, tanah granuler pada kedalaman 5 s.d 9 meter, menurut Seed dkk (1984)/ Youd dkk (2001) dan Idriss & Boulanger (2004/2008) masih memiliki potensi likuefaksi.



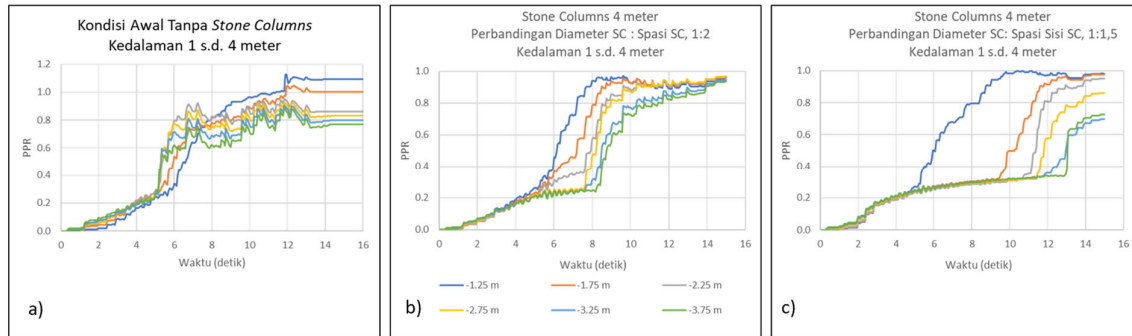
Gambar 13. Grafik PPR hasil permodelan SC 4 meter PGA = 0,7g pada kedalaman 1 s.d. 4 meter (a) di bawah titik tinjau antar SC (b) di bawah titik tinjau sisi SC



Gambar 14. Grafik PPR hasil permodelan SC 4 meter PGA = 0,7g pada kedalaman 5 s.d. 9 meter (a) di bawah titik tinjau antar SC (b) di bawah titik tinjau sisi SC



Gambar 15. Maximum Value Contour PPR PGA 0,7 (a) Model dasar (b) Kondisi Awal



Gambar 16. Grafik PPR hasil permodelan SC 4 meter PGA 0,7g pada kedalaman 1 s.d. 4 meter (a) kondisi awal tanpa SC (b) perbandingan diameter : spasi sisi 1:2 (c) perbandingan diameter : spasi sisi 1:1,5

4.3. Permodelan gempa dengan Stone Columns 9 meter

Pada $PGA = 0,3g$, terbukti bahwa *stone columns* dengan kedalaman 4 meter dapat mempercepat proses disipasi. Meskipun dengan permodelan sebelumnya *stone columns* cukup mereduksi potensi likuefaksi, namun tetap dilakukan permodelan sampai dengan *stone columns* kedalaman 9 meter. Hal tersebut dikarenakan sesuai **Gambar 1**, tanah granuler pada kedalaman 5 s.d 9 meter, menurut Seed dkk (1984)/ Youd dkk (2001) dan Idriss & Boulanger (2004/2008) masih memiliki potensi likuefaksi.

4.3.1. Model dengan input gempa PGA 0,3g

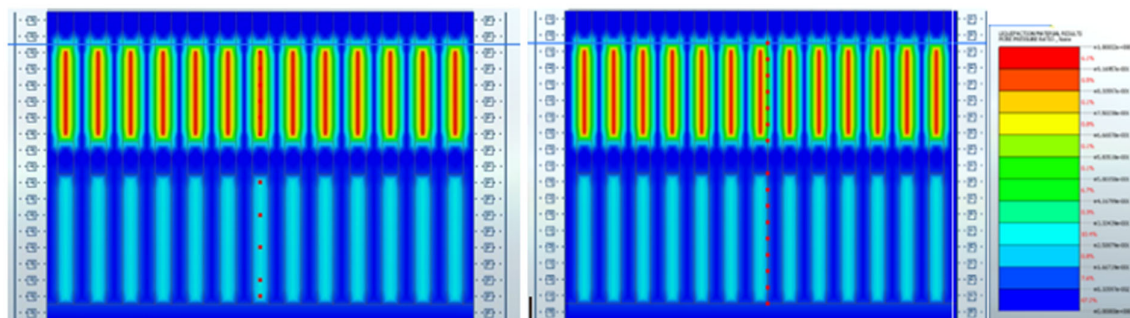
Sesuai bahasan pada kondisi awal dan kondisi dengan SC 4 meter, selingan lapisan tipis dengan permeabilitas yang rendah, memiliki fungsi menahan kenaikan air pori. Namun, dengan menembuskan drainase vertikal sampai dengan lapisan granuler di kedalaman 9 meter, layaknya membuka katup saluran untuk air pori di lapisan bawah menjadi naik. *Stone columns* yang awalnya menjadi media untuk membantu mereduksi nilai PPR sebagai media disipasi pada SC 4 meter, dan terbukti berhasil, saat membran di bawahnya terbuka, menyebabkan lapisan pasir di kedalaman 1 s.d 4 meter, justru mengalami likuefaksi akibat transfer rembesan kenaikan air pori dari lapisan

dibawahnya.

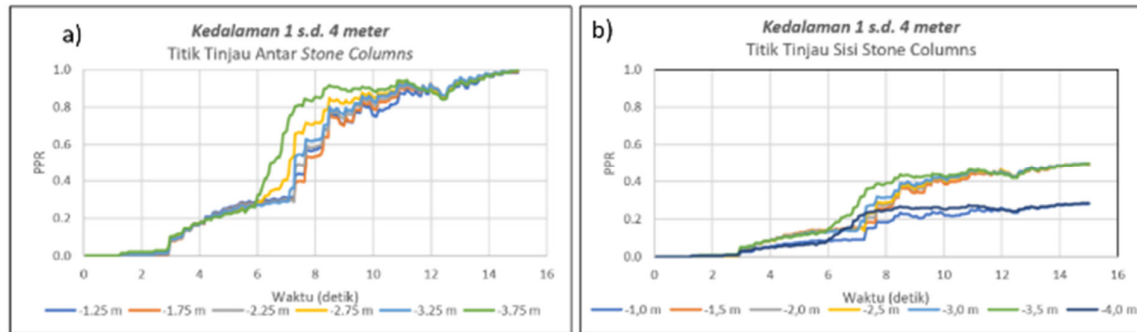
Gambar 17.a menunjukkan titik tinjau antar SC, diperjelas pada **Gambar 18.a** yang memperlihatkan keseluruhan nilai PPR pada kedalaman 1 s.d. 4 meter memiliki PPR di atas 0,8 yang mengidentifikasi terjadinya likuefaksi. Sedangkan **Gambar 17.b** memperlihatkan titik tinjau sisi SC, dan grafik pada **Gambar 18.b** nilai PPR masih dibawah 0,6, sehingga menunjukkan drainase masih berjalan dengan efektif di sekitar *stone columns*.

Nilai PPR pada permodelan SC 4 meter yang awalnya tidak sampai mencapai 0,4, kini dengan ditembusnya membran tanah permeabilitas rendah, meningkatkan nilai PPR mencapai 1,0. Sehingga likuefaksi teridentifikasi terjadi pada kedalaman 1 s.d 4 meter. Hal tersebut menunjukkan lonjakan PPR pada lapisan atas, yang terindikasi limpahan dari lapisan di kedalaman 5 s.d. 9 meter.

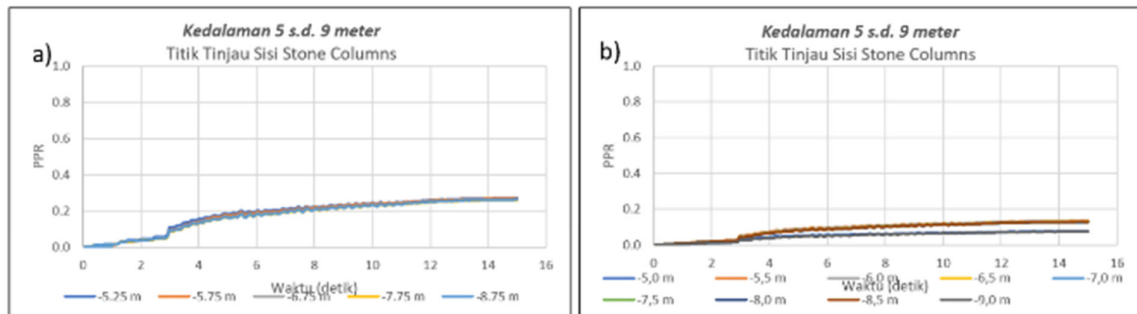
Sejalan dengan hal tersebut, dengan $PGA = 0,3g$, kedalaman 5 s.d. 9 meter nilai PPR masih stabil di bawah 0,4. Perlu kembali diingat, berdasarkan properties tanah yang tertera pada **Gambar 2**, menunjukkan deviasi nilai friction angle pada lapisan pasir berkerikil terhadap lempung kelanauan memiliki nilai yang signifikan berbeda, yaitu 33° dan 10° .



Gambar 17. Maximum Value Contour PPR PGA 0,3 permodelan SC 9 meter (a) titik tinjau antar SC (b) titik tinjau sisi SC

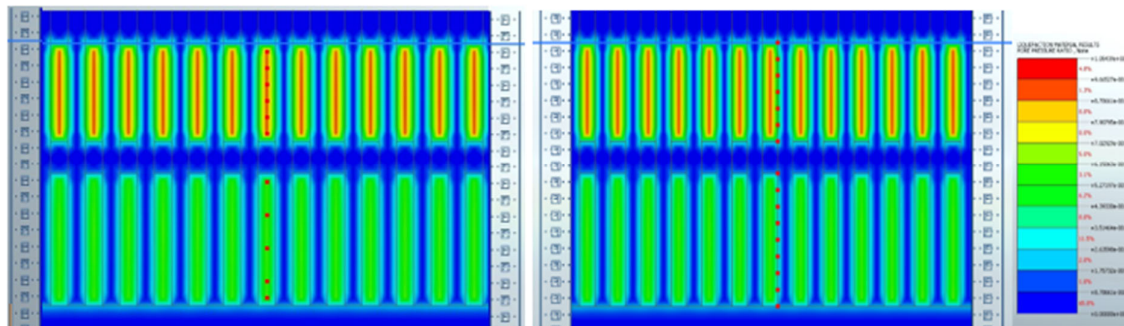


Gambar 18. Grafik PPR hasil permodelan SC 9 meter PGA = 0,3g pada kedalaman 1 s.d. 4 meter (a) titik tinjau antar SC (b) titik tinjau sisi SC



Gambar 19. Grafik PPR hasil permodelan SC 9 meter PGA = 0,3g pada kedalaman 5 s.d. 9 meter (a) titik tinjau antar SC (b) titik tinjau sisi SC

4.3.2. Model dengan input gempa PGA 0,7g

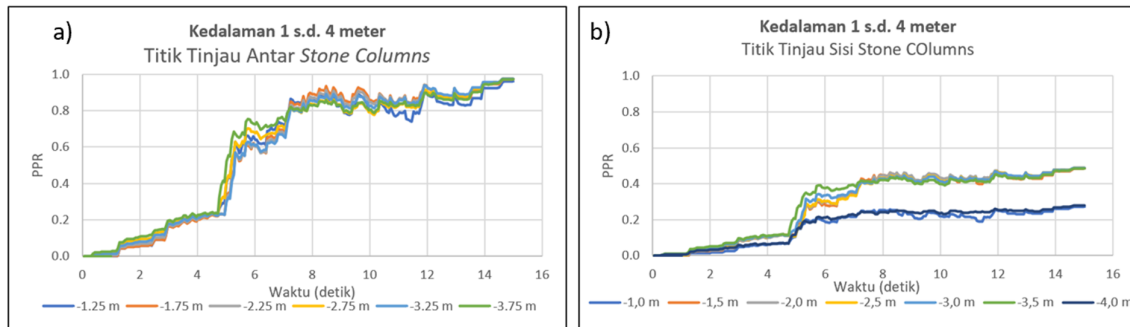


Gambar 20. *Maximum Value Contour* (PPR) PGA 0,3 permodelan SC 9 meter (a) titik tinjau antar SC (b) titik tinjau sisi SC

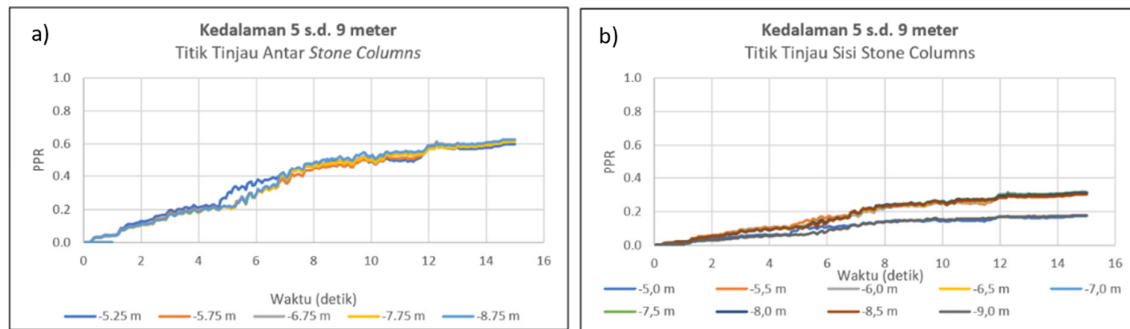
Pada permodelan PGA 0,7g dengan adanya stone columns 4 meter, mampu mengurai dan memberi jeda antar titik tinjau sebelum terlikuefaksi pada semua titik tinjau. Namun, saat stone columns diteruskan sampai dengan lapisan granular kedua, hal tersebut justru mempertegas keseragaman likuefaksi pada semua kedalaman lapis satu (Gambar 20.a). Gambar 21.a memperlihatkan bahwa titik tinjau 1,25 meter sampai dengan 3,75 meter, dimulai lima detik, tepat saat puncak frekuensi terjadi, mengalami lonjakan nilai PPR

tajam. Dan saat mencapai tujuh detik, nilai PPR konstan di atas 0,8 dan terus melaju menuju satu di semua lini.

Namun, hal konstan tetap terjadi pada lapisan pasir pada kedalaman 5 s.d. 9 meter (Gambar 22.b). Terbukanya membran akibat adanya stone columns, mempermudah aliran air pori di lapis kedua menuju lapis atas. Sampai dengan PGA berakhir, grafik PPR masih menunjukkan tren terus naik, namun masih di kisaran 0,5.



Gambar 20. Grafik PPR hasil permodelan SC 9 meter PGA = 0,7g pada kedalaman 1 s.d. 4 meter



Gambar 21. Grafik PPR hasil permodelan SC 9 meter PGA = 0,7g pada kedalaman 5 s.d. 9 meter (a) dibawah titik tinjau antar SC (b) dibawah titik tinjau sisi SC

4.4. Faktor penyerap energi akibat *Stone Columns*

Rayamajhi pada penelitiannya menuliskan persamaan untuk mengetahui rasio CSR. Yaitu seberapa jauh CSR antara kondisi tanah awal (*unimproved*) terhadap tanah dengan *stone columns* (*improved*). Awalnya di cari rasio antara kedua akselerasi tanah horisontal tanah, dilambangkan dengan R_{amax} , yaitu antara puncak akselerasi horisontal tanah *improved* ($a_{max, I}$) dan *unimproved* ($a_{max, U}$). Hasilnya kemudian dikali dengan rasio *stress reduction coefficient*. Sehingga didapatkan nilai rasio CSR.

Dengan mengetahui R_{amax} , akan diketahui seberapa efektif penyerapan energi terhadap percepatan tanah maksimum pada masing-masing kedalaman SC. Apabila R_{amax} sama dengan satu, maka respon dinamik pada tanah *improved* dan *unimproved* adalah sama (Rayamaji dkk, 2016).

Gambar 23.a, mengacu pada hasil penelitian Rayamajhi (2016) pada kondisi tanah jenuh. Grafik abu-abu menunjukkan sebaran hasil penelitian Rayamaji.

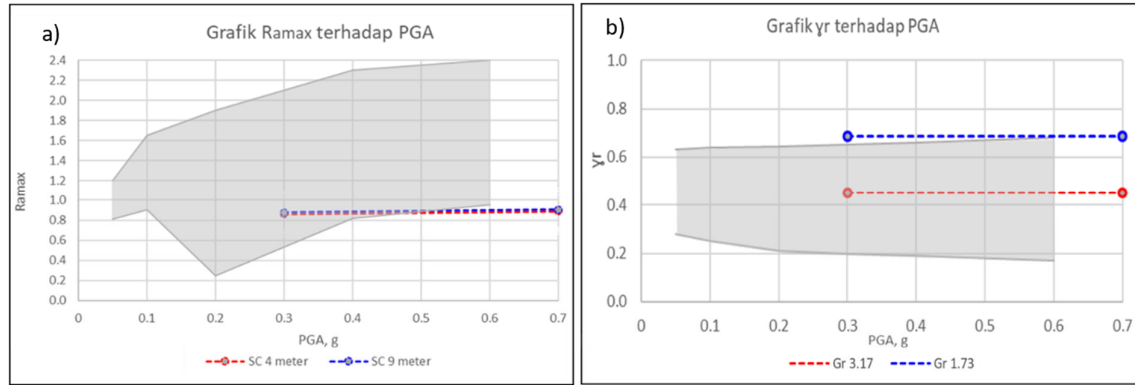
R_{amax} pada penelitian jurnal ini, SC 4 meter di wakili garis merah dan SC 9 meter di gambarkan pada garis berwarna biru tua. Pada PGA = 0,3g, SC 4 m dan SC 9 m masih berada dalam arsiran Rayamajhi. Sedangkan padas PGA = 0,7g, tidak dapat diketahui

karena penelitian Rayamajhi hanya sampai dengan PGA = 0,6g.

Dapat dilihat, semakin besar percepatan tanah puncak pada masing-masing kedalaman *stone columns*, nilai R_{amax} sedikit semakin meninggi. Sehingga bisa disimpulkan, penyerapan energi *stone columns* sangat dipengaruhi oleh seberapa besar akselerasi yang terjadi. Selain itu, SC 9 meter memiliki grafik lebih tinggi dari SC 4 meter, sehingga dengan kondisi stratifikasi yang dimodelkan, SC 4 meter lebih efektif terhadap redaman dinamik yang terjadi.

Sedangkan **Gambar 23.b** menunjukkan rasio terhadap *shear strain* pada *stone columns* terhadap tanah likuefaksi di sekitarnya. Gr = 3,17, yang diwakili garis merah, merupakan rasio kekakuan antara *stone columns* dan tanah pasir di kedalaman 1 s.d. 4 meter, dengan nilai *elastic module* (E) = 21.450 kN/m². Dan Gr 1,73, yang diwakili garis biru, merupakan rasio kekakuan antara *stone columns* terhadap tanah material pasir berkerikil di kedalaman 5 s.d. 9 meter yang memiliki nilai *elastic module* (E) = 40.000 kN/m². *Stone columns* sendiri memiliki nilai *elastic module* (E) = 90.000 kN/m².

Hal ini menunjukkan faktor redaman sangat dipengaruhi dari kekakuan *stone columns*. Semakin kaku material *stone columns*, maka semakin besar penyerapan energi terhadap getaran yang terjadi pada tanah disekitarnya. Semakin besar deviasi kekuan



Gambar 22. Grafik Ramax dan yr terhadap PGA dengan dua kondisi SC (a) Ramax (b) yr

antara SC dan tanah sekitarnya, semakin besar penyerapan energi yang terjadi.

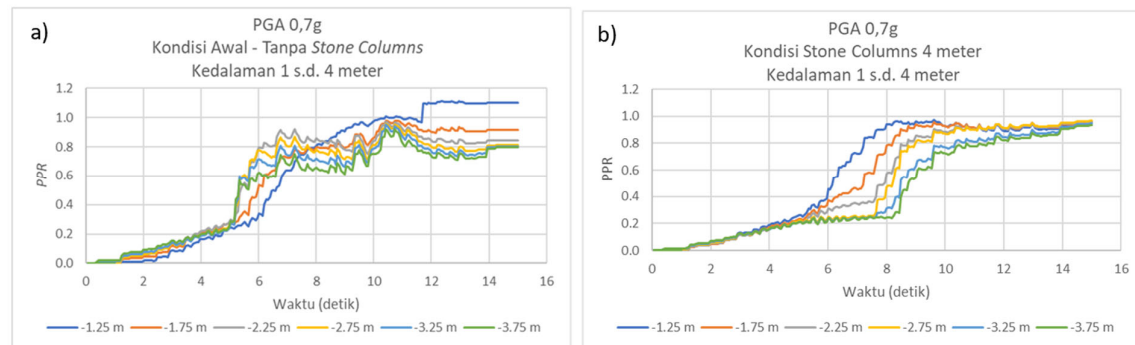
4.5 Diskusi proses terbentuknya *Water Film* dan efek *Stone Columns* sebagai mitigasi pergeseran Lateral

Saat terjadi akselerasi pada stratifikasi tanah berlapis, antara tanah granuler yang memiliki potensi likuefaksi diselingi dengan tanah kohesif, terdapat kemungkinan terjadi retakan antar lapisan yang akan berisi air. Lapisan ini biasa disebut *water film*. Proses terbentuknya erat kaitan dengan naiknya aliran air dari kedalaman lebih dalam menuju permukaan. Namun dikarenakan terdapat lapisan *impermeable* di atasnya, menghambat disipasi air pori, sehingga terbentuklah lapisan *water film*. Menurut Kokusho, (2002) efek dari terjadinya lapisan tampungan air ini memicu likuefaksi semakin parah dan juga sebagai bidang geser deformasi lateral.

Ditinjau lebih teliti dari Gambar 24.a dengan percepatan tanah maksimum sebesar 0,7g, disekitar lima detik awal, tepatnya saat puncak percepatan terjadi, nilai PPR tertinggi adalah pada kedalaman 3,75 meter diikuti kedalaman di atasnya secara

beruntun. Hal ini menunjukkan bahwa PPR terpacu pada lapisan lebih dalam terlebih dahulu. Namun sesaat setelah puncak gempa terjadi, susunan PPR mengalami perubahan. Kedalaman lebih dalam mulai mengalami penurunan PPR, hal ini sebagai indikasi bahwa aliran air mulai mengalir ke atas. Puncaknya setelah 8 detik pasca gempa dimulai, keseluruhan PPR mulai mengalami kelandaian di nilai 0,8, namun PPR pada kedalaman 1,25 meter yang paling mendekati lapisan *impermeable* di atasnya terus melaju naik. Kenaikan nilai PPR pada kedalaman 1,25 meter ini sebagai indikasi air pori terus naik ke permukaan sebagai upaya disipasi, namun tertahan lapisan *impermeable* di atasnya, sehingga tercipta lapisan *water film*.

Sedangkan, pada Gambar 24.b, setelah adanya SC kedalaman 4 meter, terdapat media disipasi air pori horisontal. Setelah 9 detik, keseluruhan titik tinjau menunjukkan PPR yang homogen di sekitar 0,9. Hal tersebut menunjukkan proses disipasi di setiap kedalaman secara horisontal. Kesimpulannya, dengan adanya SC, memberikan media disipasi horisontal sehingga mencegah terjadinya *water film* yang dapat memberikan dampak likuefaksi lebih parah seperti deformasi lateral.



Gambar 23. Grafik PPR pada PGA 0,7 g kedalaman 1 s.d. 4 meter (a) Kondisi awal dengan indikasi water film (b) Kondisi dengan SC 4 meter

Diskusi

5.1. Setelah dimodelkan dengan dua variasi **Percepatan Tanah Maksimum**, yaitu 0,3g dan 0,7g, didapati bahwa kedua model awal tanpa adanya *stone columns*, mengalami likuefaksi. Nilai PPR pada kedalaman 1 s.d. 4 meter mencapai 1, sehingga terindikasi mengalami likuefaksi. Sedangkan, pada kedalaman 5 s.d. 9 meter, walaupun semakin meningkatnya nilai PGA turut meningkatkan nilai PPR, namun tidak sampai mencapai 0,8. Sehingga kedalaman 5 s.d. 9 meter tidak terindikasi terjadi likuefaksi.

5.2. Pada Percepatan Tanah Maksimum 0,3g, permodelan *stone columns* sampai dengan kedalaman 4 meter, mengalami keberhasilan. Nilai PPR pada lapis kedalaman 1 s.d. 4 meter tereduksi secara drastis, berada di kisaran 0,3.

5.3. Sedangkan, *stone columns* kedalaman 4 meter tidak mampu menghilangkan indikasi likuefaksi pada Percepatan Tanah Maksimum 0,7g. Namun, SC memfasilitasi aliran mengalir dari bawah ke atas, yang digambarkan urutan grafik PPR tertinggi adalah pada kedalaman 1,25 meter disusul secara runtun kedalaman dibawahnya. Kemudian stabil pada PPR 0,9 yang awalnya adalah 1,2.

Saat spasi antar *stone columns* dirapatkan, didapati bahwa dapat menurunkan PPR di kedalaman yang lebih dalam. Hal ini turut menunjukkan *stone columns* bekerja dimulai dari kedalaman terbawah terlebih dahulu

Sedangkan pada *stone columns* sampai dengan kedalaman 9 meter, ternyata justru memperburuk kondisi lapisan tanah. Lapisan tipis tanah kohesif dengan permeabilitas rendah yang awalnya berfungsi sebagai membran untuk menahan kenaikan air pori pada kedalaman 5 s.d. 9 meter, saat ditembus oleh *stone columns*, menjadikan drainase vertikal itu sebagai media transfer kenaikan air pori lapis bawah ke lapis atas.

Akibatnya, *stone columns* sampai dengan 4 meter yang awalnya mampu menjadi media percepatan disipasi air pori, kini menjadi media penyalur air pori dari lapisan di bawahnya dan memperburuk kondisi likuefaksi pada kedalaman 1 s.d. 4 meter.

5.4. Sebelum dilakukan permodelan dengan Midas GTS NX, terlebih dahulu dilakukan analisa dengan Metode Youd dkk (2001). Metode ini memperhitungkan tekanan *overburden* efektif yang dipengaruhi lapisan diatasnya secara menerus. Umumnya pendekatan ini cocok pada lapis tanah yang homogen. Namun, kondisi heterogon yang terdiri dari lapis-per lapis,

antara lapisan dengan indikasi likuefaksi berselang-seling dengan lapisan tanah kohesif, cukup sulit dipertimbangkan pada metode ini.

Sehingga, pada **Gambar 2**, menunjukkan lapisan pada kedalaman 5 s.d. 9 meter masih memiliki potensi likuefaksi yang cukup tinggi. Namun dengan permodelan Midas GTS-NX, didapati bahwa lapis tipis pada kedalaman 4 s.d. 5 meter dengan permeabilitas rendah, berfungsi sebagai membran yang menahan kenaikan air pori dari lapisan di kedalaman 5 s.d 9 meter untuk naik ke lapisan atasnya.

5.5. Dengan mengetahui Gr, rasio kekakuan antara *stone columns* terhadap tanah sekitarnya, dapat diketahui seberapa besar pengaruh penyerapan energi. Semakin kaku material *stone columns*, maka semakin besar penyerapan energi terhadap getaran yang terjadi pada tanah disekitarnya.

5.6. Lapisan *water film* terindikasi terjadi pada PGA = 0,7g dengan mengacu pada nilai PPR pada titik tinjau terdangkal, kedalaman 1,25 meter, yang terus mengalami kenaikan paska puncak gempa meskipun titik tinjau dibawahnya sudah mengalami kelandaian nilai PPR. Namun dengan adanya *stone columns* 4 meter, kenaikan PPR berurutan dari yang paling atas, 1,25 meter hingga titik tinjau bawahnya. Menandakan bahwa *stone columns* mampu memfasilitasi sebagai drainase horisontal dan bekerja dari bawah ke atas

Kesimpulan

Dapat disimpulkan, bahwa lapisan tipis tanah kohesif, ternyata memiliki fungsi sebagai perisai alami untuk menahan tekanan air pori dilapisan bawahnya naik ke permukaan. Dengan adanya lapisan tersebut, jumlah dan tingkat aliran air pori tidak cukup kuat untuk naik melewati lapisan tersebut sehingga tidak terjadi likuefaksi. *Stone columns* dengan kedalaman hanya sampai lapisan yang memang terindikasi likuefaksi (4 meter), mampu untuk mempercepat proses disipasi kelebihan air pori sehingga menurunkan PPR. Namun saat kedalaman *stone columns* diteruskan sampai merusak lapisan tipis tanah kohesif, hal tersebut memperburuk kondisi likuefaksi.

Ucapan Terimakasih

Penulis mengucapkan terimakasih kepada PT. Midasindo Teknik Utama yang telah memberikan lisensi *Full Version* Midas GTS NX sehingga penelitian ini dapat diselesaikan menggunakan *UBC Sand* untuk mengetahui potensi likuefaksi yang terjadi.

Daftar Pustaka

- Badan Standardisasi Nasional. (2017). SNI - 8460 - 2017 Tata Persyaratan Perancangan Geoteknik. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional
- Beauty, Michael H. & Byrne, Peter M. (2011). *Documentation Report: UBCSAND Constitutive Model on Itasca UDM Web Site*. Beauty Engineering LLC & University of British Columbia.
- Cubrinovski, Misko., Rhodes, Aimee., Ntritsos, Nikolaos & Ballegooy, Sjoerd Van. (2019). System response of Liquefiable Deposits. Elsevier.
- Idriss, I.M. and Boulanger, R.W. (2008) Soil Liquefaction during Earthquake. EERI Publication, Monograph MNO-12, Earthquake Engineering Research Institute, Oakland.
- Kokusho, Takeji (2002). Mechanism for Postliquefaction Water Film Generation in Layered Sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
- Prasojo, Danang & Hendriyawan (2018). Desain Stone Columns untuk Mitigasi Potensi Likuefaksi di kepulauan Tidore, Maluku Utara. Teknik Kelautan ITB.
- Priebe, H. J. (1995). The Design of Vibro Replacement. Keller.
- Hutabarat, Daniel. (2020). Estimating the Severity of Liquefaction Ejecta Using the Cone Penetration Test. ProQuest LLC.
- Nurizkatilah. (2020). Analisis Potensi Likuefaksi di Desa Lolu Kota Palu Menggunakan Metode Standard Penetration Test dan Uji Laboratorium Gradasi Butiran pada Area dengan Pergerakan Lateral Besar. Universitas Indonesia.
- Oktarina, Purbawati., Fikri, Faris & Istiarto. (2023). Correlation of excess pore water pressure ratio liquefaction phenomenon in Sibalaya – Central Province. EDP Sciences.
- Pestana, Juan M., Hunt, Cristopher E. & Goughnour, R. Robert. (1997). *FEQDrain: A Finite Element Computer Program for the Analysis of The Earthquake Generation and Dissipation of Pore Water Pressure In Lapsed Sand Deposit With Vertical Drains*. Earthquake Engineering Research Center. College of Engineering. University of California. Berkeley, California.
- Prakoso, Widjojo A., Mazaya, Dheyaini & Kartika, Rummaisha A. (2022). Pore Pressure Responses of Liquefied Numerical Sand Columns. Journal of the Civil Engineering Forum.
- Prasojo, Danang & Hendriyawan. (2018). Desain Stone Column untuk Mitigasi Potensi Likuefaksi Di Kepulauan Tidore, Maluku Utara. Program Studi Teknik Kelautan Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung
- Rayamajhi, Deepak., Ashford, Scott A., Boulanger, Ross W. & Elgamal, Ahmed. (2016). Dende Grabular Columns in Liquefiable Ground. I: Shear Reinforcement and Cyclic Stress Ratio Reduction. J. Geotech. Geoenviron.
- Rayamajhi, Deepak., Nguyen, Thang V., Ashford, Scott A., Boulanger, Ross W., Lu, Jinchi Elgamal, Ahmed & Shao Lisheng. (2013). Numerical Study of Shear Stress for Discrete Columns in Liquefiable Soils. J. Geotech. Geoenviron.
- Salem, Z. Ben., Frikha, W. & Bouassida M. (2015). *Effect of Granular-Column Installation on Excess Pore Pressure Variation during Soil Liquefaction*. International Journal of Geomechanics.
- Sarimurat, Sacit., Isik, Nihat Sinan & Firat, Seyhan. (2022). Numerical Investigation of Stone Columns in Liquefiable Soils. Saudi Society Geosciences.
- Voyagaki, Elia., Kishida, Tadahiro., Aldulaimi, Rusul Falah & Mylonakis George. (2023). Integration and Calibration of UBCSAND model for drained monotonic and Cyclic Triaxial Compression of Aggregates.
- Youd, T.L., et al., 2001. Liquefaction Resistance of Soils: Summary Report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER Workshops on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 127(10): 817–833 (DOI: 10.1061/(ASCE)1090 0241(2001)127:10(817).
- Youd, T.L., Chair, Member, ASCE, Idriss., I.M., Co-Chair, fellow, ASCE, Andrus, Ronald. D., Arango, Ignacio., Castro, Gonzalo., Christian, John T., Dobry, Richardo., Finn, W.D. Liam., Harder Jr, Leslie F., Hynes, Mary Ellem., Ishihara, Kenji.m Koester, Joseph P., Liiao, Sam S.C., Marcuson III, William F., Martin, Geoffrey R., Mitchell, James. K., Moriwaki, Yoshiharu., Power, Maurice S., Robertson, Peter K., Seed, Raymond B. & Stokoe II,
- Kenneth H. (2001). *Liquefaction Resistance Of Soils: S Ummary Report From The 1996 Nceer And 1998 Nceer/Nsf Workshops On E*

Valuation Of Liquefaction R Esistance Of Soil

Youd, T.L., Hansen, Corbett M. & Bartlett, Steven F. (2001). Revised Multilinear Regression Equations for Prediction of Lateral Spread Displacement. Journal of Geotechnical and Geonviromental Engineer.