

Studi Perilaku Tiang Group Pada Lapisan Tanah Terlikuifaksi

Adolf Situmorang¹⁾, Anik Kustirini²⁾, Hani Purwanti³⁾

^{1, 2, 3)}Universitas Semarang, Jalan Soekarno Hatta, Semarang – Jawa Tengah

Email: situmorangadolf@usm.ac.id¹⁾, anikkustirini@usm.ac.id²⁾,
hanipurwanti@usm.ac.id³⁾

DOI: <http://dx.doi.org/10.29103/tj.v14i1.093>

(Received: 15 June 2023 / Revised: 21 November 2023 / Accepted: 22 January 2024)

Abstrak

Likuifaksi merupakan satu fenomena yang terjadi pada lapisan tanah akibat gempa bumi. Pada saat terjadi likuifaksi tanah mengalami peningkatan tekanan air pori yang menyebabkan tanah kehilangan kuat geser sehingga mengalami penurunan tegangan efektif dan secara linier mengakibatkan penurunan kuat geser. Penelitian ini dibuat untuk mengetahui perubahan perilaku tiang akibat lapisan tanah terlikuifaksi disepanjang tiang. Semua analisa perubahan perilaku tiang dibandingkan dengan kondisi atau kondisi tidak ada lapisan terlikuifaksi, sehingga dapat diketahui perubahan perilaku tiang ketika ada lapisan terlikuifaksi. Dari hasil analisa defleksi diketahui bahwa terjadi perubahan defleksi yang besar jika dibandingkan antara lapisan tidak terlikuifaksi dengan lapisan terlikuifaksi, yaitu dari 0,16 mm menjadi 4,32 mm atau meningkat sebesar 4.16 mm. Perubahan momen untuk lapisan tidak terlikuifaksi 23 kN menjadi 219 kN untuk kondisi lapisan terlikuifaksi atau meningkat sebesar 196 kN.m, hal yg sama pada perubahan daya dukung yang mengalami penurunan ketika terjadi likuifaksi, sehingga disimpulkan bahwa ada perubahan perilaku tiang jika terdapat lapisan terlikuifaksi.

Kata kunci: *likuifaksi, sondir, daya dukung tiang, defleksi*

Abstract

Liquefaction is a phenomenon that occurs in soil layers due to earthquakes. When liquefaction occurs, the water pressure of soil has increased which causes the soil to lose shear strength, resulting in a decrease in effective stress and linearly resulting in a decrease in shear strength. This research was conducted to determine changes of pile behavior due to liquefaction of the soil layer along the pile. All analyses of changes of pile behavior are compared with conditions where there is no liquefaction layer, so that changes of pile behavior can be seen when there is liquefaction layer of soil. The results of the deflection analysis, it is known that there is a large change in deflection when compared between the non-liquefaction layer and the liquefaction layer, namely from 0.16 mm to be 4.32 mm or increases 4.16 mm. The change in moment for the liquefaction layer is 23 kN to be 219 kN for the liquefaction layer condition or increases 196 kN.m, the same thing as the change in bearing capacity which decreases when liquefaction occurs, so it is concluded that there is a change of pile behavior if there is a liquefaction layer.

Keywords: *liquefaction, CPT, bearing capacity of pile, deflection*

1. Latar Belakang

Likuifaksi merupakan salah satu fenomena pada suatu lapisan tanah yang terjadi akibat getaran atau gempa bumi yang dapat menyebabkan rusaknya struktur akibat tanah kehilangan kekuatannya saat terjadi likuifaksi (Liliwarti dkk., 2020).

Pada saat terjadi likuifaksi tanah mengalami peningkatan tekanan air pori yang menyebabkan tanah kehilangan kuat geser sehingga tanah mengalami penurunan tegangan efektif dan secara linier mengakibatkan penurunan kuat geser tanah. Akibat beban siklik yang singkat tersebut, massa tanah dalam waktu yang singkat mengalami transisi dari keadaan padat menjadi keadaan cair, dan peristiwa ini dapat terjadi pada tanah granular jenuh. Peristiwa likuifaksi saat gempa dapat ditandai dengan adanya pergerakan tanah dalam arah horizontal, rembesan air keluar dari rekahan tanah, bergesernya bangunan miring atau turun, penurunan muka tanah, longsornya tanggul dan lereng (Sainuddin, 2022), sedangkan menurut (Mina, Kusuma dan Sudirman, 2018) lapisan tanah terlikuifaksi adalah lapisan yang mudah mengalami penurunan kekuatan ketika terjadi guncangan atau gempa bumi, hal tersebut terjadi karena meningkatnya tegangan air pori sebagai akibat terjadinya beban siklik (beban berulang) yang sangat cepat dan dalam waktu sesaat.

Pengaruh pondasi tiang pada lapisan tanah terlikuifaksi akan mengurangi daya dukung tiang (Xu dkk., 2021), sehingga perlu dilakukan penyesuaian parameter lapisan tanah terlikuifaksi pada setiap perhitungan daya dukung tiang. (Basavana Gowda dkk., 2021) menyatakan bahwa lapisan tanah yang mengalami likuifaksi akan mengakibatkan perubahan bending momen yang sangat besar pada tiang jika dibandingkan dengan lapisan tanah yang tidak terlikuifaksi.

Dari hasil beberapa penelitian sebelumnya maka perlu dilakukan penelitian yang bertujuan untuk mengetahui perilaku tiang terutama perubahan defleksi dan momen tiang pada kondisi lapisan tanah yang mengalami likuifaksi dan membandingkan jika lapisan tanah tersebut tidak terlikuifaksi sehingga dari penelitian ini dapat menjadi acuan dalam analisa daya dukung tiang ketika menemukan lapisan tanah yang berpotensi mengalami likuifaksi.

2. Metode Penelitian

Beberapa tahapan yang dilakukan dalam penelitian ini, diantaranya pengambilan data primer dengan *Cone Penetrometer Test* (CPT) yang digunakan untuk mengetahui ketebalan lapisan terlikuifaksi. Analisa perubahan perilaku tiang dilakukan dengan bantuan *software Group v2016* pada kondisi lapisan terlikuifaksi yang disebut dengan *Kondisi 1*, dan hasilnya akan dibandingkan jika lapisan tanah tersebut dianggap tidak mengalami likuifaksi yang disebut dengan *Kondisi 0*.

2.1 Pengambilan Data Primer

Pengambilan data primer berupa data *Cone Penetrometer Test* (CPT) atau sondir sampai kedalaman 15 meter yang berlokasi di Jalan Tol Probwangi. Data sondir sangat ideal digunakan untuk mengevaluasi adanya potensi lapisan terlikuifaksi dalam tanah berdasarkan nilai perlawanan konus (q_c). Menurut (Robertson, 2016) penggunaan *Cone Penetrometer Test* (CPT) dalam evaluasi potensi likuifaksi karena pengujian dilapangan lebih detail karena pengambilan

nilai perlawanan konus dilakukan setiap kedalaman jarak 20cm, sehingga lebih merepresentasikan kondisi actual lapisan tanah.

(Viana da Fonseca dkk., 2018) membandingkan analisa potensi likuifaksi dengan menggunakan data *Standart Penetration Test (SPT)* dan *Cone Penetrometer Test (CPT)* yang dilakukan secara bersamaan dengan pengukuran tekanan air pori tanah. Dari analisa tersebut disimpulkan bahwa penggunaan data *Cone Penetrometer Test (CPT)* dianggap lebih akurat jika dibandingkan dengan data *Standart Penetration Test (SPT)*.

Lapisan tanah yang berpotensi mengalami likuifaksi adalah lapisan dengan material berpasir atau lanau pasiran yang masuk dalam kategori non-plastis (Ntritsos dan Cubrinovski, 2020). Selain jenis lapisan berpasir, potensi gempa bumi dan muka air tanah sangat mempengaruhi terjadinya likuifaksi (Yao dkk., 2021) dan (Chang, 2022), dimana jika muka air tanah tinggi lebih cepat mengakibatkan terjadinya likuifaksi (Weaver dkk., 2020), dan dari hasil penyelidikan diketahui bahwa kedalaman muka air tanah 1m di bawah permukaan tanah. Analisa potensi likuifaksi menggunakan pendekatan deterministik dan probabilistik yang sudah banyak digunakan (Das, Parashar dan Dey, 2020), dengan rentang *PGA* 0.2 s/d 0.4, sesuai dengan lokasi penyelidikan tanah, dengan momen magnitud 6.9.

2.2 Pengaruh Lapisan Tanah Terlikuifaksi Terhadap Tiang

Defleksi tiang terjadi akibat adanya momen dan beban lateral yang mendorong tiang pada posisi tertentu yang tidak dapat ditahan oleh tiang dan lapisan tanah sepanjang tiang. Defleksi semakin besar ketika friksi antara tiang dan tanah tidak bekerja dengan baik, sehingga mengakibatkan deformasi yang besar pada tiang ketika menerima beban lateral. Likuifaksi lapisan tanah pada bagian atas tiang akan memberikan dampak signifikan terhadap deformasi tiang, terutama defleksi dan momen pada tiang akan semakin besar karena friksi pada ujung dianggap tidak berfungsi maksimal (Choudhury dkk., 2015).

Untuk kondisi lapisan tanah yang mudah mengalami likuifaksi, maka akan mengurangi daya dukung friksi tiang (Hussein dan El Naggat, 2021), sehingga untuk kondisi tiang yang mengandalkan friksi harus memperhitungkan daya dukung ketika lapisan tanah mengalami likuifaksi.

Lapisan tanah yang mengalami likuifaksi akan mempengaruhi momen dan geser tiang (Su dkk., 2016). Menurut (Kheradi dkk., 2019) menyebutkan bahwa tiang dapat kehilangan tahanan lateral dan bahkan tekuk akibat gempa yang mengakibatkan terjadinya likuifaksi pada lapisan tiang, sehingga dalam perhitungan perlu dilakukan secara baik pengaruh lapisan terlikuifaksi terhadap kekuatan tiang sehingga tidak mengalami kegagalan, selain pergerakan lateral tiang, likuifaksi juga menyebabkan penurunan tiang secara signifikan (Xu dkk., 2020).

2.3 Ketebalan Lapisan Terlikuifaksi

Evaluasi potensi lapisan terlikuifaksi dilakukan pada perhitungan perilaku seismik tanah atau *cyclic stress ratio (CSR)* yang merupakan tegangan siklik yang menyebabkan likuifaksi dan kemampuan tanah untuk menahan likuifaksi atau *cyclic resistance ratio (CRR)* dengan refrensi *M* sebesar 7.5 yang dituliskan dalam penelitian (Rahman dan Sitharam, 2020) sebagai berikut:

$$CSR = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_{vo}}{\sigma'_{vo}} \right) \cdot r_d \quad (1)$$

Sedangkan perhitungan CRR dengan referensi M sebesar 7.5 seperti pada rumusan (2) berikut:

$$CRR = 0,833 \left[\frac{(q_{c1N})_{CS}}{1000} \right] + 0,05 \quad (2)$$

Selanjutnya faktor keamanan (FS) terhadap likuifaksi dihitung dengan persamaan berikut

$$SF = CRR \left(\frac{MSFM}{CSR} \right) \quad (3)$$

dengan *MSF* adalah faktor pengali magnitudo gempa (*magnitude scaling factor*) dalam skala momen agar setara dengan CRR untuk gempa $M = 7,5$. Prediksi potensi likuifaksi berdasarkan nilai $SF > 1$ tidak berpotensi likuifaksi, sedangkan $SF < 1$ berpotensi likuifaksi (Johari dkk., 2020) dan (Du dkk., 2019).

Dengan rumusan di atas dan berdasarkan hasil penyelidikan tanah dengan sondir, maka diketahui pada lapisan atas sampai kedalaman 5 meter berpotensi mengalami likuifaksi, seperti pada Tabel 1.

Tabel 1 Analisa potensi likuifaksi

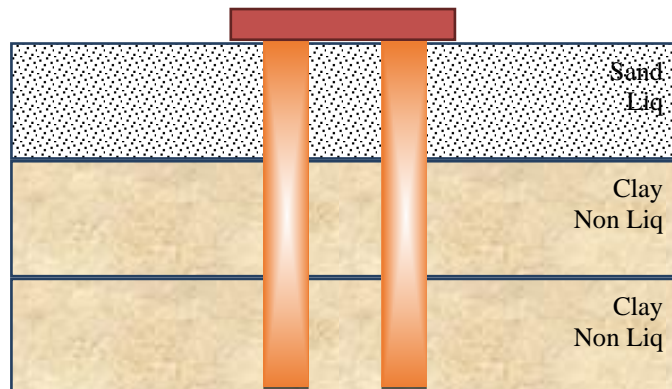
| Kedalaman | Jenis | qc (Mpa) | s_v (kN/m ²) | s_v' (kN/m ²) | r_d | CQ | qc1N | CSR | CRR | SF | Keterangan |
|-------------|-------|-------------|-------------------------------|--------------------------------|-------|-------|------|-------|-------|-------|------------|
| 0-1 | Sand | 3,60 | 0,00 | 0,00 | 0,99 | 0,00 | 0,00 | 0,000 | 0,061 | 0,00 | liq |
| 1.0-2.0 | Sand | 5,59 | 2,00 | 0,50 | 0,98 | 19,60 | 2,19 | 0,145 | 0,062 | 0,43 | liq |
| 2.0-3.0 | Sand | 6,33 | 5,20 | 0,70 | 0,98 | 14,00 | 1,77 | 0,218 | 0,062 | 0,28 | liq |
| 3.0-4.0 | Sand | 3,56 | 11,00 | 1,00 | 0,97 | 9,80 | 0,70 | 0,127 | 0,061 | 0,48 | liq |
| 4.0-5.0 | Sand | 3,55 | 19,87 | 1,78 | 0,96 | 5,51 | 0,39 | 0,072 | 0,061 | 0,84 | liq |
| 5.0-6.0 | silty | 4,67 | 23,00 | 4,32 | 0,95 | 2,27 | 0,21 | 0,019 | 0,061 | 3,26 | Non-liq |
| 6.0-7.0 | silty | 2,35 | 17,60 | 5,00 | 0,95 | 1,96 | 0,09 | 0,005 | 0,061 | 11,33 | Non-liq |
| 7.0-8.0 | silty | 8,55 | 16,12 | 11,12 | 0,94 | 0,88 | 0,15 | 0,004 | 0,061 | 16,83 | Non-liq |
| 8.0-9.0 | clay | 12,5 | 15,00 | 10,00 | 0,93 | 0,98 | 0,25 | 0,006 | 0,061 | 10,01 | Non-liq |
| 9.0-10.0 | clay | 11,3 | 16,00 | 11,00 | 0,91 | 0,89 | 0,20 | 0,005 | 0,061 | 12,56 | Non-liq |
| 10.0-11.0 | clay | 17,8 | 16,00 | 11,00 | 0,88 | 0,89 | 0,32 | 0,008 | 0,061 | 7,98 | Non-liq |
| 11.0 - 12.0 | clay | 16,76 | 16,66 | 11,66 | 0,85 | 0,84 | 0,28 | 0,007 | 0,061 | 9,14 | Non-liq |
| 12.0-13.0 | clay | 15,66 | 16,87 | 11,87 | 0,83 | 0,83 | 0,26 | 0,006 | 0,061 | 10,01 | Non-liq |
| 13.0-14.0 | clay | 19,7 | 16,98 | 11,98 | 0,80 | 0,82 | 0,32 | 0,008 | 0,061 | 8,06 | Non-liq |
| 14.0-15.0 | clay | 25,7 | 16,00 | 11,00 | 0,77 | 0,89 | 0,46 | 0,011 | 0,061 | 5,53 | Non-liq |

Untuk memudahkan dalam analisa berdasarkan hasil penyelidikan tanah, maka parameter tanah ditentukan berdasarkan ketebalan lapisan terlikuifaksi dan tidak terlikuifaksi seperti pada Tabel 2.

Tabel 2 Parameter tanah

| No | Parameter | Clay Non-Liq | Sand Liq |
|----|--|--------------|----------|
| 1 | Effective unit weight (kN/m ³) | 8 | 8 |
| 2 | Kohesi (kN/m ²) | 150 | - |
| 3 | Modulus (kN/m ³) | 271000 | - |
| 4 | E50 | 0.005 | - |

Gambar 1 menunjukkan lapisan tanah sesuai dengan kedalaman tiang yang akan di analisa



Gambar 1. Skematik lapisan tanah

Perhitungan defleksi dan momen yang terjadi pada tiang akibat lapisan terlikuifaksi dilakukan dengan beban vertikal dan momen pada kepala tiang (*pile cap*) seperti ditunjukkan pada tabel di bawah.

Tabel 3. Dimensi tiang dan beban pada tiang

| NO | URAIAN | NILAI | |
|----|------------------|-------|------|
| 1 | Panjang tiang | 15 | m |
| 2 | Diameter tiang | 0.6 | m |
| 3 | Beban vertikal | 3400 | kN |
| 4 | Beban horisontal | 200 | kN |
| 5 | Momen | 100 | kN.m |

3. Hasil dan Pembahasan

Dari hasil analisa perhitungan daya dukung tiang mengalami perubahan seiring dengan perubahan simulasi letak lapisan terlikuifaksi. Pada *Kondisi 0* atau kondisi dimana jika tidak terdapat lapisan terlikuifaksi daya dukung maksimum sebesar 1237 kN, sedangkan pada *Kondisi 1* atau kondisi dengan lapisan terlikuifaksi daya dukung tiang menjadi 1230 kN, atau mengalami penurunan sebesar 6%. Hasil ini menunjukkan bahwa jika terdapat lapisan terlikuifaksi maka sangat mempengaruhi daya dukung tiang.

Tabel 4 Daya dukung tiang

| Kondisi | Daya Dukung (kN) | | | |
|------------------|------------------|---------|---------|---------|
| | Tiang 1 | Tiang 2 | Tiang 3 | Tiang 4 |
| <i>Kondisi 0</i> | 916 | 1237 | 461 | 784 |
| <i>Kondisi 1</i> | 1195 | 1230 | 339 | 634 |

3.1 Defleksi Tiang

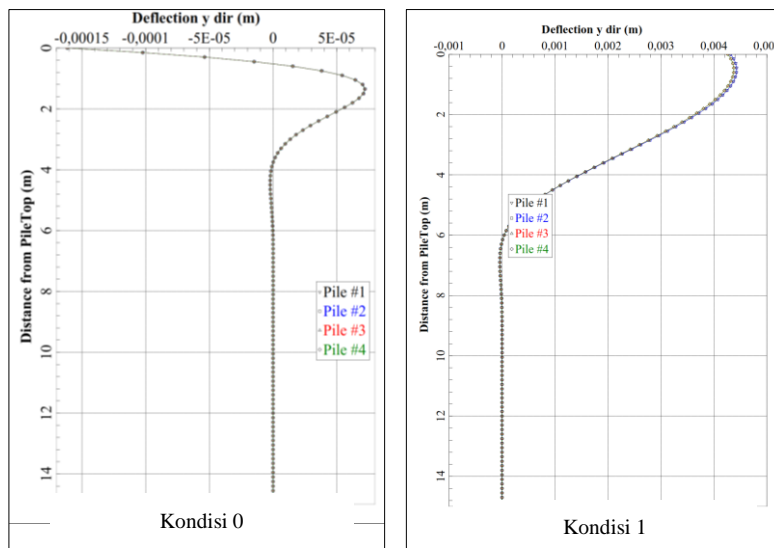
Dari hasil analisa defleksi berdasarkan lapisan tanah terlikuifaksi menunjukkan adanya perubahan defleksi jika dibandingkan dengan asumsi lapisan tanah tidak mengalami likuifaksi, ditunjukkan seperti pada Gambar 2, di mana

defleksi sangat besar terjadi pada tiang dengan lapisan tanah terlikuifaksi. Tabel 5 menunjukkan besaran likuifaksi untuk setiap tiang dengan kondisi 0 atau asumsi tidak terjadi likuifaksi dan dibandingkan dengan lapisan terlikuifaksi.

Tabel 5 Defleksi tiang sesuai lapisan terlikuifaksi

| Kondisi | Defleksi (mm) | | | |
|-----------|---------------|---------|---------|---------|
| | Tiang 1 | Tiang 2 | Tiang 3 | Tiang 4 |
| Kondisi 0 | 0.16 | 0.16 | 0.16 | 0.16 |
| Kondisi 1 | 4.32 | 4.32 | 4.26 | 4.26 |

Defleksi yang terjadi untuk setiap tiang mengalami peningkatan yang signifikan, dan terbesar terjadi pada tiang 1 dan tiang 2 yaitu sebesar 4,32 mm atau mengalami peningkatan defleksi jika dibandingkan dengan kondisi tanpa likuifaksi. Peningkatan defleksi ini sejalan dengan penelitian (Hussein dan El Nagggar, 2021), bahwa defleksi tiang sangat dipengaruhi ketebalan lapisan terlikuifaksi terutama pada bagian atas tiang, semakin tebal lapisan tanah terlikuifaksi semakin besar potensi defleksi yang terjadi.



Gambar 2. Defleksi tiang

3.2 Momen

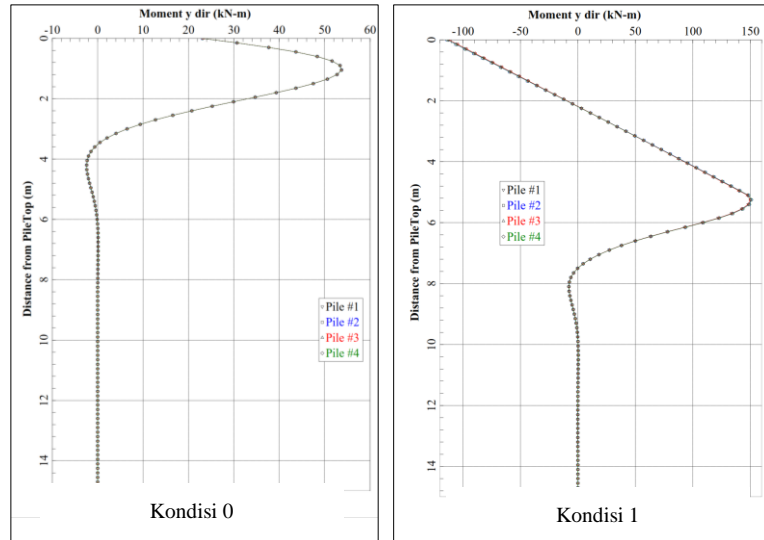
Momen yang terjadi berdasarkan lapisan tanah terlikuifaksi menunjukkan adanya perubahan antara kondisi 0 atau tanpa likuifaksi dengan kondisi lapisan terlikuifaksi. Grafik selengkapnya seperti pada Gambar 3.

Momen terbesar yang terjadi pada tiang 2 dan tiang 4 sebesar 113 kN.m, jika dibandingkan dengan momen pada kondisi 0 atau tidak terlikuifaksi, seperti ditunjukkan pada Tabel 6.

Peningkatan momen pada tiang sejalan dengan penelitian (Basavana Gowda dkk., 2021) dan (Choudhury dkk., 2015), yang menyatakan bahwa perubahan momen suatu tiang pondasi sangat dipengaruhi lapisan tanah yang terlikuifaksi, semakin tebal lapisan yang mengalami potensi likuifaksi akan semakin besar momen yang terjadi.

Tabel 6 Momen tiang

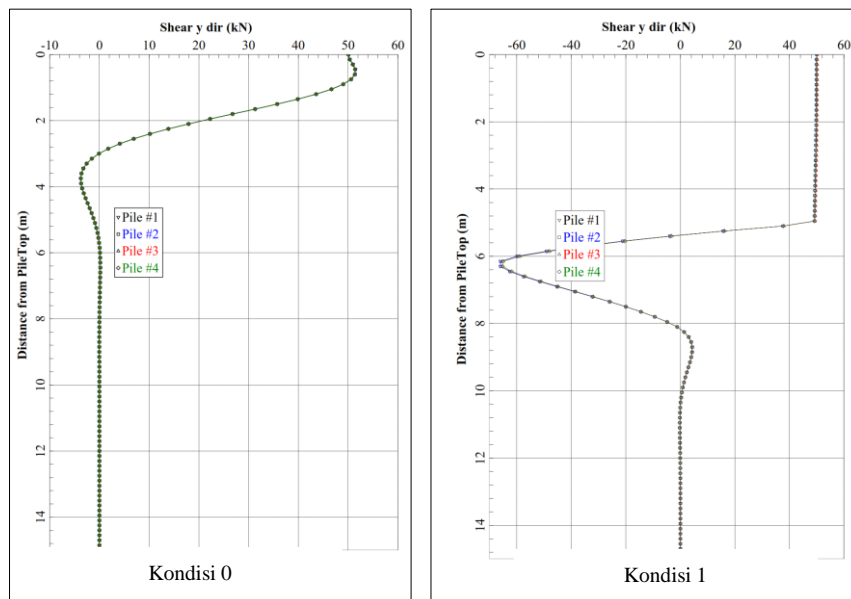
| Kondisi | Momen (kN.m) | | | |
|-----------|--------------|---------|---------|---------|
| | Tiang 1 | Tiang 2 | Tiang 3 | Tiang 4 |
| Kondisi 0 | 23 | 23 | 23 | 23 |
| Kondisi 1 | 112 | 113 | 112 | 113 |



Gambar 3. Momen tiang

3.3 Gaya Geser

Gaya geser merupakan nilai perlawanan tiang ketika menerima beban dengan tanah disekitarnya, dari hasil analisa gaya geser diketahui bahwa nilai gaya geser terbesar berada pada kedalaman 5 meter, dan diujung tiang tidak mengalami perubahan gaya geser pada kondisi tanah terlikuifaksi maupun tanah tidak terlikuifaksi, seperti ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4 Gaya geser tiang

3.4 Daya Dukung Tiang

Daya dukung tiang yang terjadi mengalami penurunan pada kondisi tanah mengalami likuifaksi, kecuali pada tiang 1 mengalami peningkatan daya dukung tiang sebesar 1195,34 kN, atau bertambah sebesar 797 kN, jika dibandingkan dengan daya dukung tiang kondisi tidak terlikuifaksi, sedangkan untuk tiang yang lain mengalami penurunan daya dukung pada lapisan tanah yang mengalami likuifaksi. Selengkapnya nilai daya dukung untuk setiap tiang ditunjukkan pada tabel di bawah.

Tabel 7. Daya dukung tiang

| Kondisi | Daya Dukung (kN) | | | |
|-----------|------------------|---------|---------|---------|
| | Tiang 1 | Tiang 2 | Tiang 3 | Tiang 4 |
| Kondisi 0 | 916,53 | 1237,23 | 461,45 | 784,75 |
| Kondisi 1 | 1195,34 | 1230,87 | 339,69 | 634,08 |

4. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan analisa di atas maka disimpulkan bahwa ada pengaruh yang signifikan pada perubahan perilaku tiang akibat lapisan tanah terlikuifaksi, perubahan perilaku ini terutama pada defleksi dan momen tiang. Defleksi tiang terbesar menjadi 4,32 mm dari 0,16 mm atau mengalami peningkatan terbesar 4,16 mm, sementara untuk momen terbesar menjadi 113 kN.m dari 23 kN.m atau mengalami peningkatan sebesar 90 kN.m.

Sementara untuk gaya geser dan daya dukung tiang tidak mengalami peningkatan yang berarti karena gaya geser pada ujung tiang relative sama pada kondisi tanah tidak terlikuifaksi kecuali pada kedalaman 5 m di bawah tiang, sementara daya dukung tiang mengalami penurunan kecuali pada tiang 1 yang mengalami peningkatan dari 916,53 kN menjadi 1195,34 kN.

4.1 Saran

Dalam mendesain pondasi perlu kiranya memperhitungkan potensi likuifaksi pada lapisan tanah, sehingga perubahan daya dukung dan defleksi tiang yang terjadi dapat diantisipasi dengan baik sehingga tidak terjadi kegagalan struktur pondasi.

Daftar Kepustakaan

- Basavana Gowda, G.M. *dkk.* (2021) "Effect of Liquefaction Induced Lateral Spreading on Seismic Performance of Pile Foundations," *Civil Engineering Journal (Iran)*, 7, hal. 58–70. <https://doi.org/10.28991/CEJ-SP2021-07-05>.
- Chang, M. (2022) "Influence of mis-assignment of groundwater level on liquefaction assessment of soils," (March 2023).
- Choudhury, D. *dkk.* (2015) "Seismic Liquefaction Hazard and Site Response for Design of Piles in Mumbai City," *Indian Geotechnical Journal*, 45(1), hal. 62–78. <https://doi.org/10.1007/s40098-014-0108-4>.

- Das, S., Parashar, T. dan Dey, Y. (2020) “Assessment of Liquefaction Potential for Seismic Risk Reduction in Northeast India,” *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology*, 5(8), hal. 219–228. <https://doi.org/10.33564/ijeast.2020.v05i08.033>.
- Du, G. dkk. (2019) “Evaluation method for the liquefaction potential using the standard penetration test value based on the CPTU soil behavior type index,” *Advances in Civil Engineering*, 2019. <https://doi.org/10.1155/2019/5612857>.
- Hussein, A.F. dan El Naggar, M.H. (2021) “Seismic axial behaviour of pile groups in non-liquefiable and liquefiable soils,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 149(June), hal. 106853. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106853>.
- Johari, A. dkk. (2020) “A comparative study in reliability analysis of liquefaction potential of layered soil,” (February), hal. 0–13.
- Kheradi, H. dkk. (2019) “Liquefaction-Induced Buckling Failure of Group-Pile Foundation and Countermeasure by Partial Ground Improvement,” *International Journal of Geomechanics*, 19(5), hal. 1–16. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gm.1943-5622.0001379](https://doi.org/10.1061/(asce)gm.1943-5622.0001379).
- Liliwanti dkk. (2020) “Liquefaction potential map based on coordinates in Padang city with google maps integration,” *International Journal on Informatics Visualization*, 4(1), hal. 32–34. <https://doi.org/10.30630/joiv.4.1.312>.
- Mina, E., Kusuma, R.I. dan Sudirman, S. (2018) “Analisa Potensi Likuifaksi Berdasarkan Data Spt (Studi Kasusproyek Pembangunan Gedung Baru Untirta Sindang Sari),” *Jurnal Fondasi*, 7(1), hal. 11–21. <https://doi.org/10.36055/jft.v7i1.3298>.
- Ntritsos, N. dan Cubrinovski, M. (2020) “A CPT-based effective stress analysis procedure for liquefaction assessment,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 131(October 2019), hal. 106063. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2020.106063>.
- Rahman, M.M. dan Sitharam, T.G. (2020) “Cyclic liquefaction screening of sand with non-plastic fines: Critical state approach,” *Geoscience Frontiers*, 11(2), hal. 429–438. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.09.009>.
- Robertson, P.K. (2016) “Evaluating Soil Liquefaction and Post-earthquake deformations using the,” (January 2004).
- Sainuddin, S. (2022) “Analisis Dampak Kerusakan Infrastruktur Akibat Likuifaksi Di Palu,” *Jurnal Azimut*, 4(2), hal. 78. <https://doi.org/10.31317/jaz.v4i2.839>.
- Su, L. dkk. (2016) “Pile response to liquefaction-induced lateral spreading: A shake-table investigation,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 82, hal. 196–204. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2015.12.013>.
- Viana da Fonseca, A. dkk. (2018) “Comparative analysis of liquefaction susceptibility assessment by CPTu and SPT tests,” *Cone Penetration Testing 2018 - Proceedings of the 4th International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT 2018*, hal. 669–675.
- Weaver, K.C. dkk. (2020) “A probabilistic model of aquifer susceptibility to earthquake-induced groundwater-level changes,” *Bulletin of the*

- Seismological Society of America*, 110(3), hal. 1046–1063.
<https://doi.org/10.1785/0120180278>.
- Xu, B. *dkk.* (2020) “Experimental study of wave loads on elevated pile cap of pile group foundation for sea-crossing bridges,” *Ocean Engineering*, 197(October 2019). <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106896>.
- Xu, L.Y. *dkk.* (2021) “Liquefaction-induced settlement of the pile group under vertical and horizontal ground motions,” *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 144(March), hal. 106709.
<https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2021.106709>.
- Yao, Y. *dkk.* (2021) “Evaluation of environmental engineering geology issues caused by rising groundwater levels in Xi’an, China,” *Engineering Geology*, 294(December 2020), hal. 106350.
<https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2021.106350>.