

Efektivitas Perbaikan Tanah dengan Metode *Vacuum Preloading* terhadap Daya Dukung Lateral

Helen Fransisca, Putri S. Gandina, Evelyn Jogiadinata, Dolok H. Panjaitan
PT DavySukamta Konsultan

Widjojo A. Prakoso
Universitas Indonesia

ABSTRAK: Kondisi tanah di kawasan pesisir Teluk Jakarta pada umumnya berupa lempung *marine* sangat lunak dengan muka air tanah tinggi yang dapat menyebabkan penurunan tanah dan berkurangnya kapasitas fondasi yang rendah secara signifikan terutama kapasitas lateral. Perbaikan tanah sebelum konstruksi perlu dilaksanakan untuk memitigasi risiko tersebut. *Vacuum preloading* merupakan metode perbaikan tanah yang dinilai efektif pada kasus ini dengan pertimbangan faktor kondisi tanah, posisi muka air, akses ke lokasi, luasan lahan yang akan diperbaiki, waktu, dan biaya. *Vacuum preloading* dilakukan dengan memasang *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) dan pompa *vacuum*. Setelah perbaikan tanah selesai, tanah di lokasi menunjukkan peningkatan kuat geser sehingga kebutuhan jumlah tiang yang semula ditentukan oleh kapasitas lateral dapat berkurang. Berdasarkan hasil uji lateral, defleksi di kepala tiang pada beban rencana 100% dan 200% telah memenuhi persyaratan dan tidak terjadi kegagalan struktural sama sekali.

Kata Kunci: lempung *marine* sangat lunak, penurunan, perbaikan tanah, *vacuum preloading*, *Prefabricated Vertical Drain* (PVD), kuat geser, kapasitas lateral

ABSTRACT: Soil condition in coastal of Jakarta Bay generally consists of very soft marine clay with high ground water level that will cause excessive settlement and lack of soil capacity for foundation especially lateral capacity. Ground improvement shall be applied prior to construction to mitigate the risks. Vacuum preloading is ground improvement method that is considered effective in this case by considering the factors of soil condition, water level, access to location, the size of repaired area, time, and cost. Vacuum Preloading method is made by installing *Prefabricated Vertical Drain* (PVD) and vacuum pumps. After completing the process, soil at the site shows an increase in shear capacity, leading to reduction of pile numbers that previously governed by lateral capacity. Based on the results of lateral test piles, deflection on pile head at 100% and 200% of design loads meet the requirements without any structural failure.

Keywords: very soft marine clay, settlement, ground improvement, *vacuum preloading*, *Prefabricated Vertical Drain* (PVD), shear strength, lateral capacity

1 PENDAHULUAN

Banyak wilayah pesisir Teluk Jakarta memiliki lapisan tanah lempung *marine* sangat lunak dengan muka air tanah yang tinggi. Tanah lempung sangat lunak memiliki sifat geoteknik seperti daya dukung rendah dan kompresibilitas tinggi, Indraratna et al. (2011). Untuk memitigasi risiko tersebut, perlu dilakukan perbaikan tanah sebelum konstruksi infrastruktur maupun bangunan dilakukan.

Permasalahan tanah lempung sangat lunak dengan muka air tanah yang tinggi umumnya

dapat diatasi menggunakan metode perbaikan tanah *Prefabricated Vertical Drain* (PVD), namun metode ini seringkali terkendala oleh waktu konstruksi karena membutuhkan waktu konsolidasi yang cukup lama. Untuk mempercepat proses konsolidasi, PVD dikombinasikan dengan *preloading* atau *vacuum preloading*.

Preloading adalah metode umum yang digunakan untuk mempercepat proses konsolidasi pada tanah lempung sangat lunak. Beban untuk *preloading* dapat diperoleh dari berat beban tanah timbunan dan/atau penerapan

tekanan *vacuum* pada tanah jenuh, Chai et al. (2005). *Vacuum preloading* merupakan suatu bentuk *preloading* dengan menggunakan tekanan *vacuum* sebagai pengganti beban timbunan. Besar tekanan maksimum yang dapat tercapai sekitar 80 kPa, Bergado et al. (1998); Tang and Shang (2000).

Menurut Gouw & Gunawan (2020) *vacuum preloading* merupakan skema perbaikan tanah yang ramah lingkungan jika dibandingkan dengan *preloading*, karena *preloading* membutuhkan material timbunan dalam jumlah besar, tekanan maksimum *vacuum* sebesar 80 kPa setara dengan tanah timbunan setinggi 4 sampai 5 m. Selain itu, tekanan air pori menjadi negatif sehingga durasi konstruksi dapat lebih cepat dan meminimalkan resiko kelongsoran.

2 VACUUM PRELOADING

Vacuum preloading pertama kali diperkenalkan oleh Kjellman pada tahun 1952 dimana pompa *vacuum* akan menghisap air dan udara di dalam tanah yang sudah di beri lembaran kedap udara diatasnya. Untuk mempercepat proses konsolidasi, tekanan *vacuum* biasanya dikombinasikan dengan PVD, Chai et al. (2010). Dari segi biaya, penggunaan *vacuum preloading* sebagai pengganti beban *preloading* biasa dapat mengurangi biaya perbaikan tanah sekitar 30%, Yan dan Chu (2003).

Dari segi stabilitas, *preloading* dengan beban cenderung menyebabkan pergerakan lateral ke luar yang berpotensi pada kegagalan geser. Sebaliknya *vacuum preloading* cenderung menyebabkan pergerakan lateral ke dalam. Retak permukaan dapat terjadi tetapi tanpa potensi kegagalan geser, Griffin dan O'Kelly (2014).

Dari segi penurunan, tidak ada perbedaan dalam besaran dan laju penurunan untuk *vacuum preloading* dan *preloading* dengan beban tanah, Mesri (2012), begitu pula dari segi kenaikan kuat geser. Baik *vacuum preloading* maupun *preloading* dengan beban tanah, kenaikan kuat geser dapat dihitung dengan menggunakan Pers. (1), Terzaghi (1996).

$$Su (mob) = 0.22 \sigma'_v \quad (1)$$

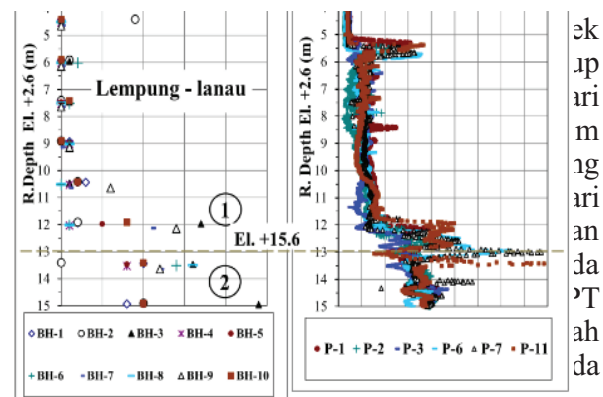
Berdasarkan SNI 8460:2017, daya dukung lateral izin tiang tunggal ditentukan berdasarkan besarnya defleksi yang terjadi. Defleksi merupakan fungsi dari kekakuan tiang yang dipengaruhi oleh properti tanah. Pada

tanah kohesif, kapasitas lateral tiang dipengaruhi oleh nilai kuat geser, yang menentukan nilai modulus tanah (k) serta faktor regangan (ϵ_{50}). Semakin tinggi nilai kuat geser, maka semakin tinggi pula kapasitas lateralnya.

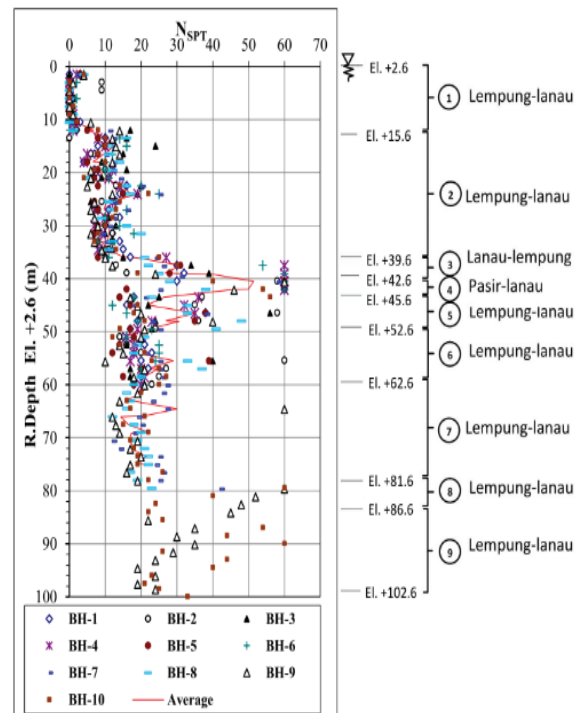
3 STUDI KASUS

Studi kasus dilakukan pada proyek yang berlokasi di kawasan pesisir Teluk Jakarta dengan luas lahan sekitar 14,520 m². Proyek ini merupakan gedung perkantoran yang terdiri dari 2 menara setinggi 30 lantai dengan 9 lantai podium dan berdiri di atas 1 lapis besmen.

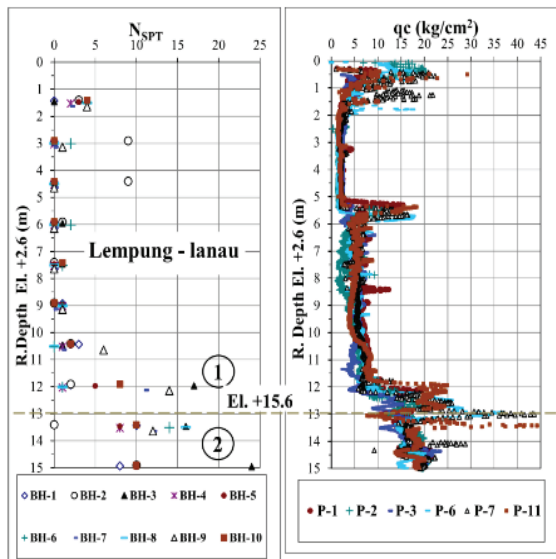
3.1 Kondisi Tanah



dan Gbr. 2.



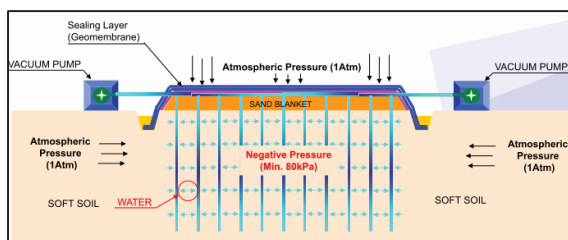
Gbr. 1. Profil N_{SPT} Sebelum Dilakukan Perbaikan Tanah.



Gbr. 2. Profil N_{SPT} dan $CPTu$ Sebelum Dilakukan Perbaikan Tanah pada Kedalaman 15m Teratas.

3.2 Perbaikan Tanah

Pada proyek ini dilakukan perbaikan tanah dengan metode *vacuum preloading* yang dikombinasi dengan pemasangan PVD dan PHD yang terhubung dengan pompa *vacuum* seperti yang ditunjukkan pada Gbr. 3 yang bertujuan untuk mempercepat penurunan permukaan yang terjadi dan meningkatkan daya dukung tanah asli yang sangat lunak.



Gbr. 3. Skematik Pekerjaan Perbaikan Tanah dengan Metode *Vacuum Preloading*, Djunaidy & Wijaya 2020).

Pemilihan metode *vacuum preloading* dengan pertimbangan berikut:

1. Jenis tanah yang akan diperbaiki merupakan lempung sangat lunak dengan posisi muka air tanah dekat permukaan.
2. Lokasi dan waktu pelaksanaan.
Meninjau lokasi proyek, menggunakan metode lain seperti *preloading* akan membutuhkan waktu pelaksanaan yang lebih lama (diperkirakan akan membutuhkan waktu 2 kali lebih lama daripada waktu pelaksanaan *vacuum preloading*). Hal ini

dikarenakan lokasi proyek yang jauh dari sumber tanah timbunan.

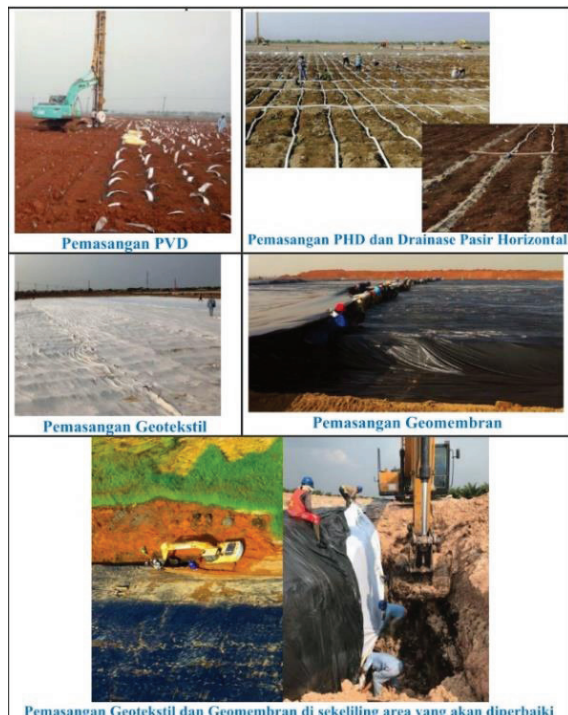
3. Biaya pengerjaan menggunakan *preloading* akan lebih mahal dikarenakan dibutuhkan mobilisasi tanah timbunan yang jauh dari lokasi proyek. Selain itu, keterbatasan lahan di proyek untuk melakukan penimbunan dan ketersediaan material timbunan juga menjadi faktor yang membuat metode *preloading* menjadi lebih mahal, walaupun sudah dipertimbangkan juga *preloading* secara bergantian (material timbunan dipindah-pindah).

4. Monitoring pelaksanaan.

Pengerjaan *vacuum preloading* tidak akan menimbulkan kelongsoran. Berbeda dengan *preloading* yang harus dijaga kemiringannya agar tidak terjadi kelongsoran.

Pada proyek ini kedalaman PVD yang terpasang adalah 12 m atau setebal lapisan tanah lunak yang akan diperbaiki dengan pola segiempat jarak 1 m, PVD tersebut disambungkan ke PHD. Setelah seluruh PVD dan PHD terpasang berikutnya dipasang geotekstil separator untuk memproteksi geomembran dari benda-benda tajam yang dapat mengakibatkan kebocoran. Setelah itu dilanjutkan dengan pemasangan geomembran yang membuat lahan menjadi kedap dari udara dan air sehingga dapat dilakukan proses *vacuum*. Geotekstil dan geomembran juga harus dipasang di sekeliling area yang akan diperbaiki, berupa dinding sedalam minimal 1 m untuk menjamin tekanan *vacuum* sesuai spesifikasi. Kondisi geomembran selama pemompaan harus selalu diperiksa karena ada kemungkinan terjadi kebocoran/kerusakan yang harus segera dilakukan perbaikan agar proses *vacuum* tidak terganggu. Setelah semua terpasang, pipa PHD disambungkan ke pompa khusus *vacuum*. Selama proses pemompaan, tekanan pompa harus dipastikan tidak kurang dari 80 kPa. Gbr. 4 menunjukkan proses pemasangan PVD, PHD, Geotekstil dan Geomembran. Setelah semua proses pemasangan selesai dilakukan maka proses *vacuum preloading* siap dilaksanakan seperti terlihat pada Gbr. 5.

Pada proyek ini, dengan area lahan yang diperbaiki seluas 14.5 ha, proses perbaikan tanah memakan waktu sekitar 4 bulan. Monitoring pelaksanaan dipasang 7 *settlement plate*, 2 *extensometer*, 2 *piezometer*, 1 *inclinometer* dan 7 *Vacuum gauge*.

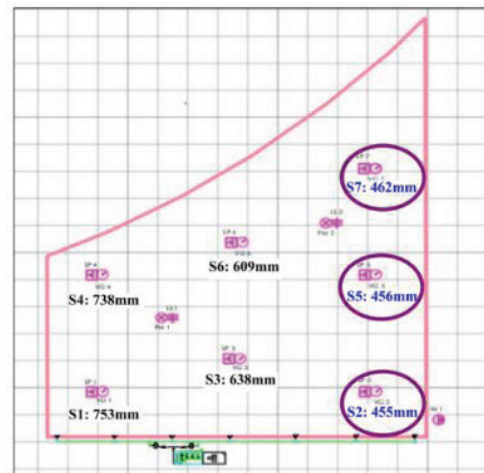
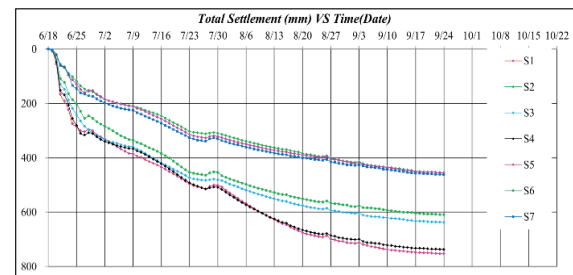


Gbr. 4. Proses Pemasangan PVD, PHD, Geotekstil dan Geomembran, Djunaidy & Wijaya (2020).

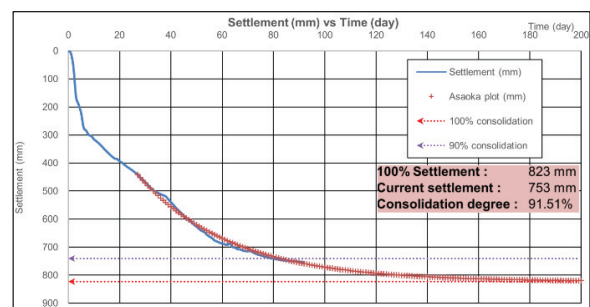


Gbr. 5. Perbaikan Tanah dengan Metode *Vacuum Preloading*.

Penurunan yang terjadi selama perbaikan tanah antara 455 mm hingga 753 mm setara dengan 3~6% dari total kedalaman perbaikan tanah atau 91~97% derajat konsolidasi. Penurunan pada area sisi Timur (S2, S5 dan S7) lebih kecil karena ditimbun lebih awal saat membuat *platform* infrastruktur kawasan dan pernah digunakan untuk akses jalan. Analisis penurunan dihitung berdasarkan metode Asaoka berdasarkan data penurunan aktual per hari yang diukur pada setiap *settlement plate* (S1 s.d S7). Penurunan selama perbaikan tanah pada setiap *settlement plate* ditunjukkan pada Gbr. 6 dan contoh grafik analisis Asaoka pada Gbr. 7.



Gbr. 6. Penurunan Selama Perbaikan Tanah pada Setiap *Settlement Plate*, Geotekindo (2019).



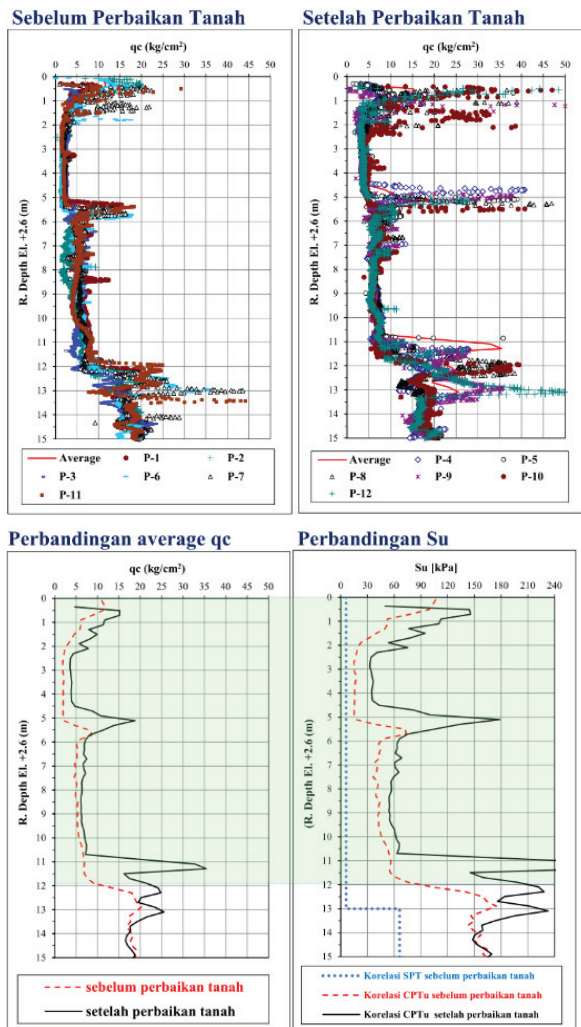
Gbr. 7. Analisa Asaoka pada S1, Geotekindo (2019).

Untuk memverifikasi hasil dari perbaikan tanah tersebut telah dilakukan 6 titik uji CPTu. Hasil uji CPTu yang dilakukan menghasilkan hambatan konus yang kemudian dikorelasikan menjadi kuat geser, menggunakan Pers. (2) menurut Begeman, Bowles (1997).

$$S_u = \frac{q_c - P_o}{N_k} \quad (2)$$

Dimana S_u merupakan kuat geser niralir, q_c hambatan konus, P_o tekanan *overburden* efektif dan N_k faktor *cone* (dipakai 11) berdasarkan indeks plastisitas.

Setelah perbaikan tanah terlihat adanya peningkatan kuat geser hingga lebih dari 30 kPa pada kedalaman 12 m teratas. Gbr. 8 menunjukkan perbandingan nilai q_c dan S_u sebelum dan sesudah perbaikan tanah.



Gbr. 8. Perbandingan Profil Tanah Sebelum dan Setelah Perbaikan Tanah pada Kedalaman 15 m Teratas.

3.3 Fondasi

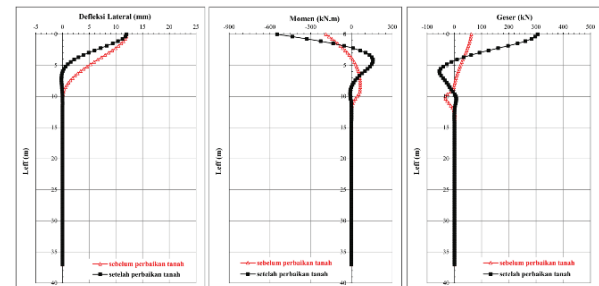
Proyek ini menggunakan sistem fondasi dalam berupa tiang pancang *spun* Ø 60 cm dengan desain panjang efektif tertanam 37 m. Tiang harus mampu menahan beban aksial bangunan dan beban lateral, baik pada kondisi gempa dengan maupun tanpa omega. Pembahasan akan lebih fokus pada tahanan lateral dari tiang.

Perhitungan kapasitas lateral tiang dilakukan dengan menggunakan program bantu LPILE berdasarkan metode p-y yang dikembangkan oleh Reese et al. (1974). Kondisi jepitan dan beban lateral yang bekerja pada kepala tiang dapat dimodelkan untuk memperoleh perilaku tiang, terutama berupa distribusi defleksi lateral, momen lentur dan geser sepanjang tiang.

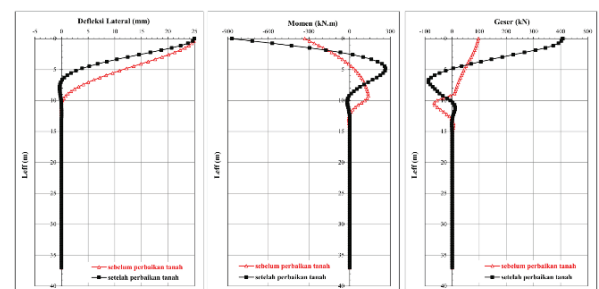
Kapasitas izin lateral tiang tunggal meningkat sekitar 4~5 kali setelah dilakukan perbaikan tanah. Perbandingan hasil analisis

tiang tunggal yang menerima beban lateral izin gempa dengan maupun tanpa Ω pada kondisi sebelum serta sesudah perbaikan tanah dapat dilihat pada Gbr. 9 dan Gbr. 10.

Sebelum dilakukan perbaikan tanah kebutuhan jumlah tiang yang diperlukan ditentukan berdasarkan kapasitas izin lateral, sedangkan setelah dilakukan perbaikan tanah jumlah tiang ditentukan oleh kapasitas izin aksial. Perbandingan kebutuhan tiang sebelum dan setelah perbaikan tanah dapat dilihat pada Tabel 1.



Gbr. 9. Perbandingan Hasil Analisis Tiang Tunggal Beban Lateral Izin (Gempa Tanpa Ω) Sebelum dan Sesudah Perbaikan Tanah.



Gbr. 10. Perbandingan Hasil Analisis Tiang Tunggal Beban Lateral Izin (Gempa Dengan Ω) Sebelum dan Sesudah Perbaikan Tanah.

Tabel 1 Perbandingan Kebutuhan Tiang Sebelum dan Setelah Perbaikan Tanah.

Kondisi Pembebanan	Sebelum Perbaikan Tanah		Setelah Perbaikan Tanah	
	Kapasitas Izin Tiang (kN)	Jumlah Tiang Diperlukan	Kapasitas Izin Tiang (kN)	Jumlah Tiang Diperlukan
Aksial Tekan	1.400		1.600	
Lateral (Gempa Tanpa Ω)	62	2.022	307	1.663
Lateral (Gempa dengan Ω)	97		408	

*Jumlah tiang yang diperlukan sudah mempertimbangkan reduksi kurva p-y sebesar 60%

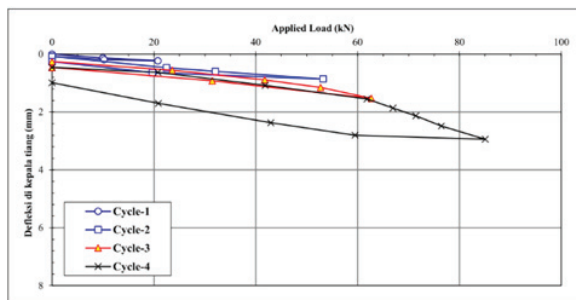
3.4 Uji Lateral Tiang

Untuk verifikasi kapasitas tiang dilakukan 16 (enam belas) buah uji pembebanan tiang yang mewakili total 1.663 tiang pancang, 3 (tiga) di antaranya merupakan uji pembebanan lateral. Tiang-tiang yang diuji adalah tiang pancang *spun* Ø 60 cm dengan panjang tertanam 33.1 m hingga 36.5 m, dimana beban lateral diaplikasikan pada *cut-off level* rencana di kedalaman sekitar 4 m dari permukaan tanah asli.

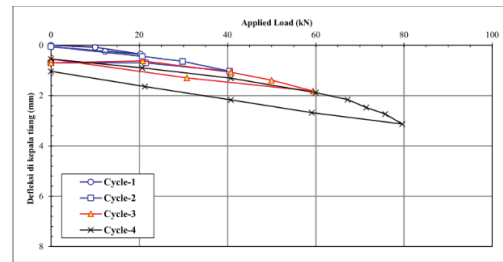
Uji pembebanan lateral menggunakan tiang lainnya sebagai tumpuan *hydraulic jack* yang dipasang mendatar. *Surface load cell* juga telah digunakan pada seluruh tiang uji untuk memastikan beban yang diberikan selama pengujian.

Beban lateral rencana per tiang berupa *base shear* pada kondisi tanpa Ω yang dibagi dengan jumlah total tiang, sehingga beban yang bekerja di setiap kepala tiang adalah sebesar 40 kN. Kurva defleksi lateral di kepala tiang terhadap beban lateral berdasarkan hasil uji pembebanan yang telah dilakukan pada setiap uji tiang ditunjukkan pada Gbr. 11 sampai Gbr. 13. Tabel 2 merangkum data faktual hasil uji pembebanan lateral berupa besarnya defleksi di kepala tiang untuk beban lateral rencana sebesar 40 kN (100%) dan beban lateral maksimum sebesar 80 kN (200%) serta hasil analisa LPILE.

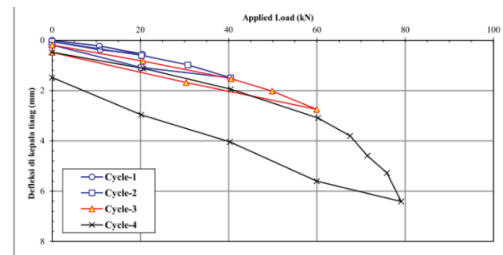
Berdasarkan hasil uji pembebanan lateral tiang yang telah dilakukan, diperoleh defleksi lateral di kepala tiang antara 0.86 mm sampai 1.49 mm saat beban uji 100% dan antara 2.94 mm sampai 6.41 mm saat beban uji maksimum 200%, serta tidak terjadi kegagalan struktural sama sekali pada tiang uji tersebut. Defleksi lateral yang kurang dari 10 mm dan 25 mm untuk beban lateral rencana 40 kN dan 80 kN ini menunjukkan bahwa kinerja lateral dari seluruh tiang yang diuji memenuhi syarat.



Gbr. 11. Kurva Beban Lateral vs. Defleksi Lateral Tiang No. 828 (Ø0.6m, L_{tertanam} 36.5 m).



Gbr. 12. Kurva Beban Lateral vs. Defleksi Lateral Tiang No. 1387 (Ø0.6m, L_{tertanam} 33.1m).



Gbr. 13. Kurva Beban Lateral vs. Defleksi Lateral Tiang No. 1459 (Ø0.6m, L_{tertanam} 33.4m).

Tabel 2. Rangkuman Defleksi Hasil Uji Pembebanan Lateral dan Analisa pada Tiang Spun Ø 60 cm

Keterangan	L_{tertanam} (m)	Defleksi lateral (mm) $H = 40 \text{ kN} = 80 \text{ kN}$	
		(100%)	(200%)
Tiang no.828	36.5	0.86	2.94
Tiang no.1387	33.1	1.03	3.13
Tiang no.1459	33.4	1.49	6.41
LPILE	36	2.02	4.62

4 KESIMPULAN

Berdasarkan studi kasus pada lapisan tanah lempung *marine* sangat lunak untuk proyek ini, daya dukung lateral tiang meningkat sekitar 4~5 kali setelah dilakukan perbaikan tanah. Hal ini disebabkan oleh peningkatan kuat geser hingga lebih dari 30 kPa pada kedalaman 12 m teratas. Jumlah kebutuhan tiang yang awalnya ditentukan oleh kapasitas lateral tiang menjadi kapasitas aksial tiang, sehingga jumlah tiang dapat berkurang sekitar 15%. Beban lateral rencana telah terverifikasi dengan uji pembebanan pada 3 tiang. Berdasarkan hasil uji lateral, defleksi di kepala tiang pada beban rencana 100% dan 200% telah memenuhi persyaratan dan tidak terjadi kegagalan struktural sama sekali. Hasil studi ini spesifik pada area proyek yang mungkin tidak dapat diterapkan pada lokasi lain yang ada di kawasan pesisir teluk Jakarta.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. 2017. *Standar Nasional Indonesia SNI 8460:2017 Tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.
- Bergado, D. T., Chai, J. C., Miura, N. & Balasubramaniam, A. S. .1998. PVD Improvement of Soft Bangkok Clay with Combined Vacuum and Reduced Sand Embankment Preloading. *Geotech. Eng (Southeast Asian Geotechnical Society)* 29 No. 1: 95–121.
- Bowles, Joseph E. 1997. *Foundation Analysis and Design* 5th Ed. McGraw Hill Inc.
- Chai JC, Carter JP and Hayahsi S. 2005. Ground Deformation Induced by Vacuum Consolidation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. ASCE 131(12): 1552–1561.
- Chai, J. C., Hong, Z. S. & Shen, S. L. 2010. Vacuum-Drain Method Induced Pressure Distribution and Ground Deformation. *Geotextiles and Geomembranes* 28 No. 6: 525–535.
- Djunaidy, M.W. & Wijaya, A.E. 2020. *Aplikasi Vacuum Consolidation Method pada Pengembangan Kawasan Perumahan di Utara Jakarta*. Presentasi Geotalk XI. Diakses dari <https://youtu.be/oyM-sJD3BWA>.
- Gouw, T. L., & Gunawan, A. 2020. Vacuum Preloading, an Alternative Soft Ground Improvement Technique for a Sustainable Development. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 426(1): 0–12. Diakses dari <https://doi.org/10.1088/1755-1315/426/1/012003>.
- Griffin, H., & O'Kelly, B. C. .2013. Ground Improvement by Vacuum Consolidation – a Review. *Institution of Civil Engineers* (167): 1-17.
- Ensoft, Inc. *Technical Manual for LPILE*.
- Indraratna, B., Rujikiatkamjorn, C., Ameratunga, J. & Boyle, P. 2011. Performance and Prediction of Vacuum Combined Surcharge Consolidation at Port of Brisbane. *J. Geotech. Geoenviron. Engng*. ASCE 137. No. 1 : 1009–1018.
- Mesri G. and Khan A.Q. .2012. Ground Improvement Using Vacuum Load Together with Vertical Drains. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 138:680-689.
- PT. Geotekindo. 2019. *Final Report for Unloading Vacuum System*.
- Tang M and Shang JQ .2000. Vacuum Preloading Consolidation of Yaogiang Airport Runway. *Geotechnique* 50(6): 613–623.
- Terzaghi, K., Peck, R. B., and Mesri, G. .1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd Ed. Wiley. Hoboken. NJ.
- Yan SW and Chu J .2003. Soil Improvement for a Road Using The Vacuum Preloading Method. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers – Ground Improvement* 7(4): 165–1.

