Pasak : Jurnal Teknik Sipil dan Bangunan
e- ISSN: 3026-6998, DOI : 10.32699
Vol. 3, No. 1, September 2025 : 23-29
https://ojs.unsiq.ac.id/index.php/pasak/index

ANALISIS PENGARUH LENSA LAPISAN PASIR TERHADAP EFEKTIFITAS BEBAN VAKUM KONSOLIDASI DI JAKARTA UTARA

Wahyu Rizal[1*], Paulus Pramono Rahardjo[2] dan Rinda Karlinasari[3]

[1,2,3]Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Katolik Parahyangan, Kota Bandung, Indonesia

[1]*rizalwahyu4@gmail.com, [2]paulus.rahardjo@unpar.ac.id, [3]rkarlinasari@gmail.com

Artikel dimasukkan: 23-9-2025, Artikel direvisi: 28-9-2025, Artikel diterbitkan: 30-9-2025

Abstrak

The PVD Vacuum Consolidation treatment option is carried out to meet construction safety criteria, especially regarding residual settlement. Often after carrying out treatment in the field using the PVD Vacuum Consolidation method, the results of pre-consolidation stress and shear strength values achieved are less than expected, so that after the PVD Vacuum Consolidation work period is completed, relatively large settlements still occur. This research wants to look for factors that cause discrepancies in the pre-consolidation stress and shear strength achieved after soil improvement with PVD vacuum consolidation. The layer of sand soil between the compressible layers that is given PVD vacuum treatment causes the load distribution from the surface to the base of the PVD to be less than optimal. This is proven by the increase in load distributed through observations of the vacuum gauge and piezometer which shows an increase in the load given to the soil layer after the presence of a slurry wall around the vacuum area to close the air cavity of the sand layer. The results of CPTu test data interpretation can be used to determine the effectiveness of PVD Vacuum Consolidation method. From the CPTu test using the Bq* parameter it can be interpreted to find out the OCR value and then proceed to calculate the Pc' value or according to Mayne, 2005, it is called yield stress (σp'). It can be interpreted from the CPTu test results with the parameters qnet, Δu2 and qE. Although there is a clay layer that has received the load according to the application, it is not certain that the soil has experienced a fairly good increase in shear strength.

Kata kunci: Vacuum Consolidation, Sand Layer, Preconsolidation Stress, Shear Strength

Pendahuluan

Salah satu penanganan untuk tanah lunak adalah menggunakan PVD dengan tekanan vakum sebagai pembebanan awal untuk mempercepat konsolidasi. Pada daerah yang hanya memiliki lapisan tanah lempung akan berbeda hasil perbaikannya jika pada lapisan yang bervariasi antara lempung dan pasir. Berdasarkan penelitian yang pernah dilakukan sebelumnya, terdapat potensi kehilangan tekanan vakum yang menyebabkan berkurangnya efektifitas vacuum preloading. Besar tekanan vakum yang didistribusikan tidak 80 kPa sepanjang PVD. Dengan keberadaan lensa pasir akan berpengaruh terhadap besarnya tekanan vakum sehingga tekanan prakonsolidasi dan nilai shear strength yang dicapai kurang dari yang diharapkan. Penelitian ini bertujuan mengetahui faktor - faktor yang mungkin mempengaruhi efektifitas PVD vakum konsolidasi dengan perhitungan empiris berdasarkan penyelidikan tanah CPTu dan data pengamatan terhadap kondisi lapangan.

Metode

Dengan menggunakan uji CPTu, didapatkan nilai tahanan konus (qc) dan juga tekanan air pori (u2). Pada kenyataannya, tekanan yang menahan beban di lapisan tanah merupakan kombinasi dari qc dan u2. Untuk mengetahui porsi tahanan konus yang sebenarnya maka diperlukan parameter tahanan konus terkoreksi (qt). Nilai qt merupakan parameter koreksi tahanan ujung konus terhadap tekanan air pori.

$$q_t = q_c + u_2(1 - a) \tag{1}$$

Dimana a adalah rasio luas bersih ujung kerucut dengan nilai rentang $0{,}35 \leq a \leq 0{,}85$.

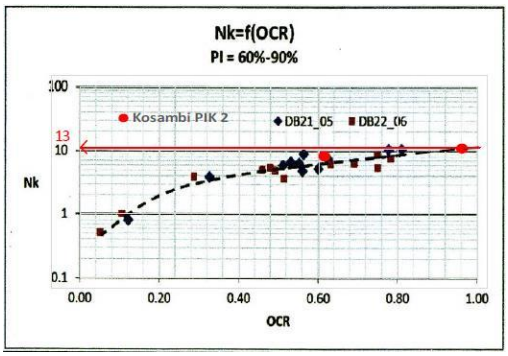
Setelah adanya konsolidasi, tanah akan mengalami peningkatan nilai qt dari kondisi sebelumnya. Maka dengan beban yang diketahui dan diaplikasikan, qt target dapat dihitung untuk mengetahui efektifitas pekerjaan konsolidasi dengan persamaan berikut:

$$Su = \frac{q_t - \sigma_v}{N_{kt}} \tag{2}$$

$$\boldsymbol{q_t = Su\, N_{kt} + \sigma_v} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{q_t\, target = [0.22(\sigma'_v + \Delta\sigma)]N_{kt} + \sigma_v} \tag{4}$$

Apabila beban yang diberikan merupakan beban timbunan dan vakum, seharusnya untuk nilai Δσ = beban fill + 80 kPa. Dalam penelitian ini nilai Nkt yang digunakan untuk lempung Underconsolidating Nkt = 10.



Gambar 3 . Hubungan OCR dengan Nk (Nurindahsih et al, 2013)

Parameter pore water pressure ratio (Bq) merupakan parameter yang dipublikasikan dalam melakukan interpretasi hasil uji CPTu. Bq adalah perbandingan antara tekanan air pori ekses (u_2-u_0) dengan tahanan ujung konus yang telah dikoreksi (q_t) dan tekanan vertikal (σ_{v0}).

$$Bq = \frac{u2 - u0}{qt - \sigma v0} \tag{5}$$

Jika mempertimbangkan kondisi dimana tanah telah diberikan beban vakum (Δσ), maka persamaan Bq dapat disesuaikan seperti pada persamaan berikut:

$$Bq = \frac{\Delta u}{qt - (\sigma v' + \Delta\sigma)} \tag{6}$$

Rahardjo, 2016 mengusulkan parameter Bq* yang merupakan normalisasi Bq yang tidak dipengaruhi parameter yang tidak dapat diukur secara pasti yaitu tekanan hidrostatik (u_0) dan tekanan vertikal tanah (σ_{v0}).

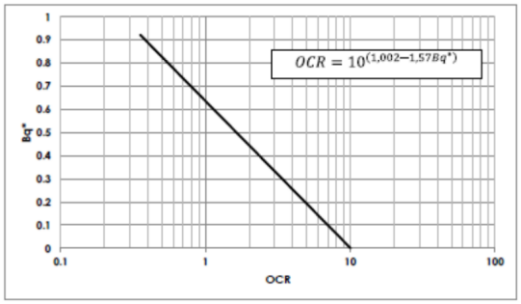
$$Bq^* = \frac{u2}{qt} \tag{7}$$

Dari dua unsur parameter yaitu u_2 dan q_t yang dapat dinterpretasikan terhadap nilai OCR, dapat diketahui kondisi lapisan tanah dalam fase UC, NC maupun sudah OC. OCR didefinisikan sebagai rasio antara tekanan konsolidasi maksimum yang pernah dialami tanah (P_c') terhadap tekanan efektif vertikal P_0' saat ini. OCR dapat dikorelasikan dengan nilai Bq* dengan persamaan 8

$$OCR = \frac{p_c{}'}{p_0{}'} \tag{8}$$

$$OCR = 10^{(1.002 - 1.57Bq^*)} \tag{9}$$

Dapat dilihat dari grafik hubungan OCR dengan Bq* oleh Setiawan et al, 2017, semakin kecil nilai Bq* maka semakin besar nilai OCR pada lapisan tanah. Atau sama juga artinya jika semakin kecil nilai u_2 pada lapisan tanah maka semakin kecil settlement tanah yang berkonsolidasi.



Gambar 4 . Hubungan OCR dan Bq* (Setiawan et al, 2017)

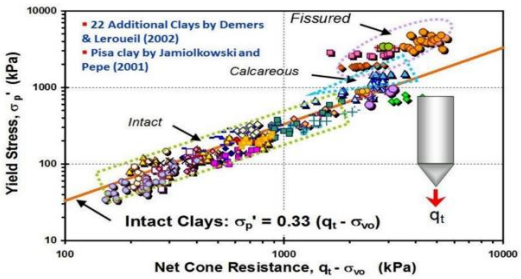
Dapat dilihat dari grafik hubungan OCR dengan Bq* oleh Setiawan et al, 2017, semakin kecil nilai Bq* maka semakin besar nilai OCR pada lapisan tanah. Atau sama juga artinya jika semakin kecil nilai u_2 pada lapisan tanah maka semakin kecil settlement tanah yang berkonsolidasi.

Untuk mengetahui tekanan konsolidasi maksimum yang pernah dialami tanah, sering disebut juga tegangan prakonsolidasi atau menurut Mayne, 2005 disebut dengan yield stress (s_p') dapat diinterpretasikan dari hasil uji CPTu dengan persamaan berikut:

$$\sigma_p' = 0.33(q_t - \sigma_{v0}) \quad (10)$$

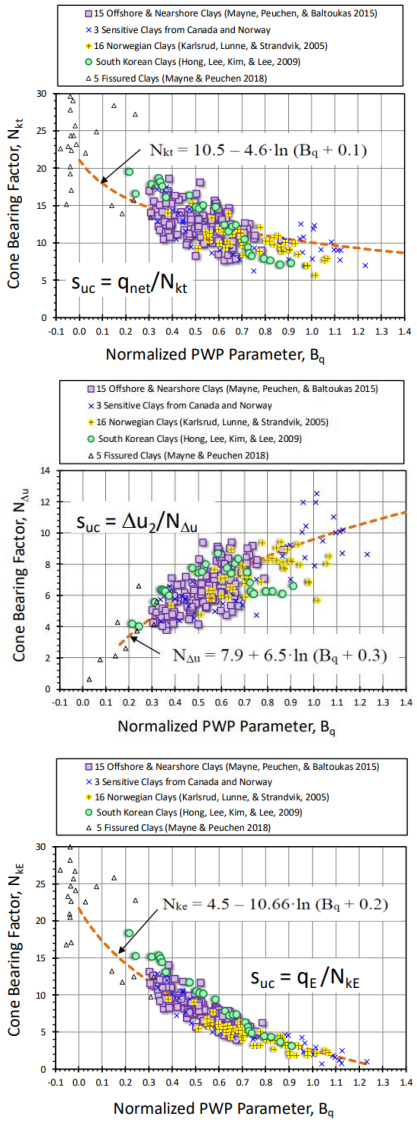
$$\sigma_p' = 0.54(u_2 - u_0) \quad (11)$$

$$\sigma_p' = 0.60(q_t - u_2) \quad (12)$$



Gambar 5 . Evaluasi tegangan prakonsolidasi dari ketahanan kerucut pada tanah clay (Mayne, 2005)

Secara teori, setelah selesai konsolidasi, nilai kuat geser tanah akan meningkat sebesar 0,22 Δσ (Mesri, 1988). Dari hasil uji CPTu, Mayne et al, 2023 memberikan persamaan untuk menghitung Su dengan menggunakan parameter q_{net}, Du_2 dan q_E dan korelasi Cone Bearing Factor dari nilai Bq. Pada penelitian ini akan dicoba mengganti nilai Bq dengan Bq*.

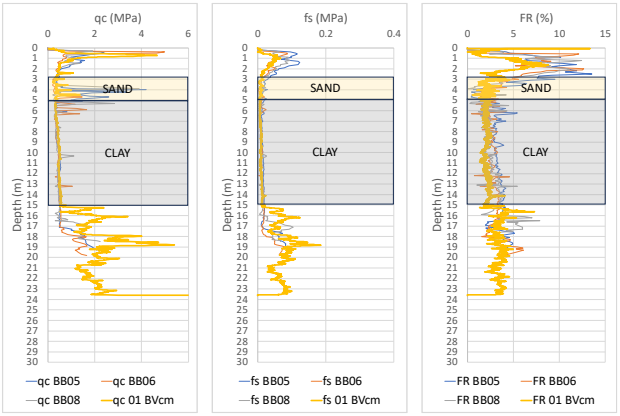


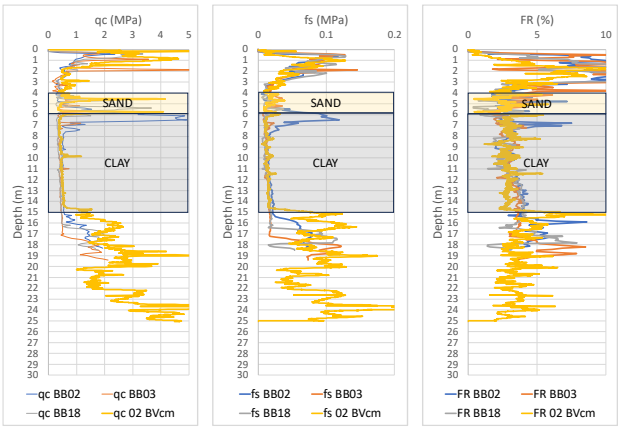
Gambar 6 . Hubungan N_{kt}, $N_{\Delta u}$, N_{kE} vs B_q

Hasil dan Pembahasan

1. Analisis Perilaku Tanah Sebelum Vakum Konsolidasi

Penyelidikan tanah sebelum pekerjaan vakum dilaksanakan berupa CPTe dan CPTu yang digunakan untuk mengetahui jenis tanah dan kedalaman tanah lunak yang akan mengalami konsolidasi.



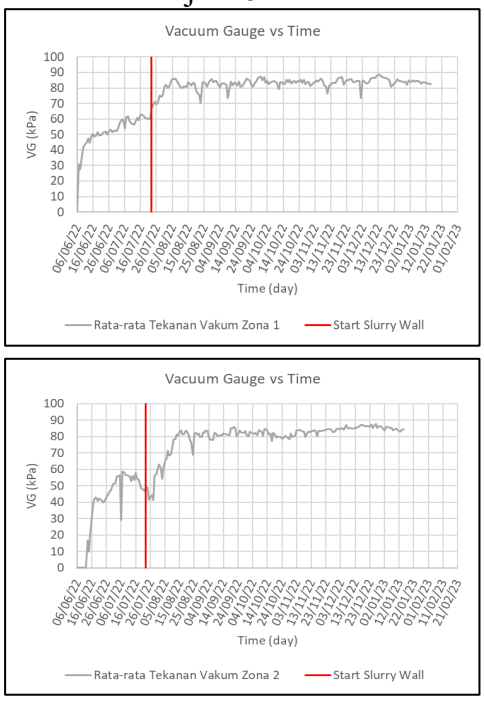


Gambar 9 . Lapisan tanah berdasarkan CPTe dan CPTu sebelum vakum

Ditemukan adanya lapisan sand yang bervariasi pada kedalaman 3 – 7 m dan lapisan tanah lunak clay pada kedalaman 5 – 15 m.

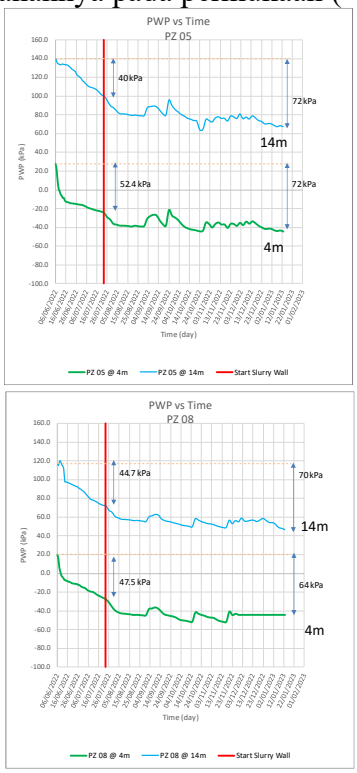
2. Analisis Data Monitoring Saat Pelaksanaan Vakum Konsolidasi

Kondisi lapangan dengan lapisan tanah lunak dalam yang memiliki lensa pasir, menyebabkan terjadinya kebocoran sehingga tekanan vakum yang terbaca oleh vacuum gauge dipermukaan hanya mencapai 50 kPa. Demikian pula dengan bacaan piezometer yang terpasang hanya mencapai nilai 39.6 kPa dan 47.3 kPa. Setelah dilakukan slurry wall untuk membuat lapisan sand menjadi kedap maka tekanan vakum di permukaan naik menjadi 82 kPa.



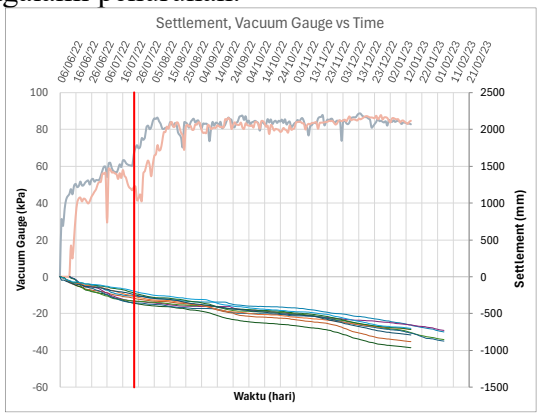
Gambar 9 . Lapisan tanah berdasarkan CPTe dan CPTu sebelum vakum

Dari monitoring piezometer pada kedalaman 6 m terbaca tekanan vakum sebesar 68 kPa dan pada kedalaman 16 m sebesar 71 kPa. Dapat disimpulkan tekanan vakum tidak terdistribusi sebesar tekanannya pada permukaan (< 82 kPa).



Gambar 10 . *Monitoring piezometer*

Settlement total di akhir konstruksi pada zona 1 dan 2 sebesar 726 – 961 mm. Berdasarkan grafik tersebut menunjukan belum adanya perlambatan penurunan atau tanah masih akan mengalami penurunan.



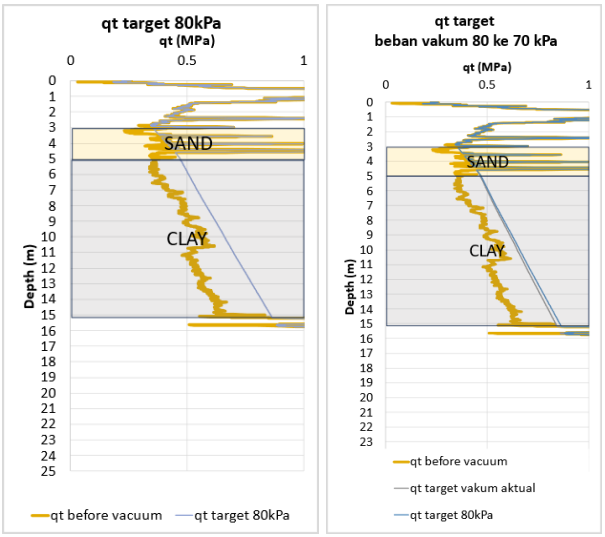
Gambar 10 . Settlement aktual lapangan

3. Analisis Data CPTu Setelah Vakum Konsolidasi

3.1 Analisis q_t target

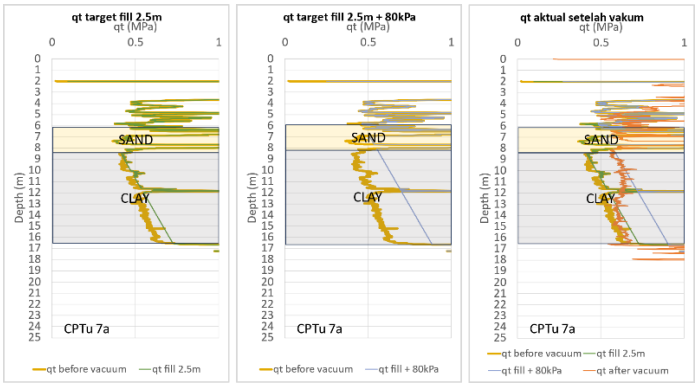
Pada analisis q_t target, dicoba simulasi jika setelah pekerjaan vakum konsolidasi idealnya

tekanan yang didistribusikan sebesar 80 kPa dimana seluruh lapisan tanah clay akan mengalami peningkatan sesuai nilai qt target. Selain menggunakan beban vakum yang dianggap konstan 80 kPa sepanjang PVD, dilakukan juga simulasi apabila beban yang didistribusikan sesuai dengan bacaan monitoring vacuum gauge dan piezometer dimana nilai tekanan vakum menurun dari permukaan 80 kPa menjadi 70 kPa di dasar PVD. Setelah pekerjaan vakum konsolidasi selesai dilakukan uji CPTu untuk mengetahui peningkatan parameter tanah. Berdasarkan analisis nilai qt target dan qt yang diperoleh dari pengujian CPTu setelah pekerjaan konsolidasi (Gambar 11 (c)) terlihat bahwa tidak semua lapisan tanah mencapai qt target sesuai beban yang tercatat dari monitoring di lapangan. Hasil peningkatan cukup beragam pada setiap kedalaman. Kondisi ini disebabkan karena tekanan vakum yang diberikan tidak diterima oleh tanah secara seragam pada setiap kedalaman, atau karena pemberian beban vakum pada lapisan tanah berpasir yang memiliki rongga udara (kurang kedap) menjadi kurang maksimal.



(a) **(b)**

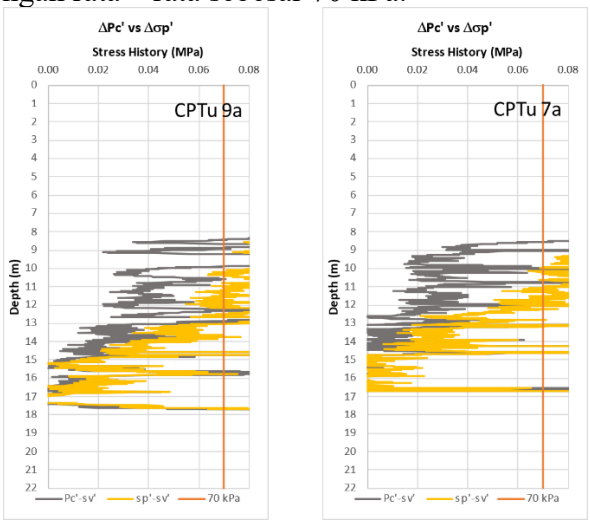
Gambar 11 . Grafik q_t target 80 kPa, q_t target beban vakum 80 ke 70 kPa



(a) **(b)** **(c)**

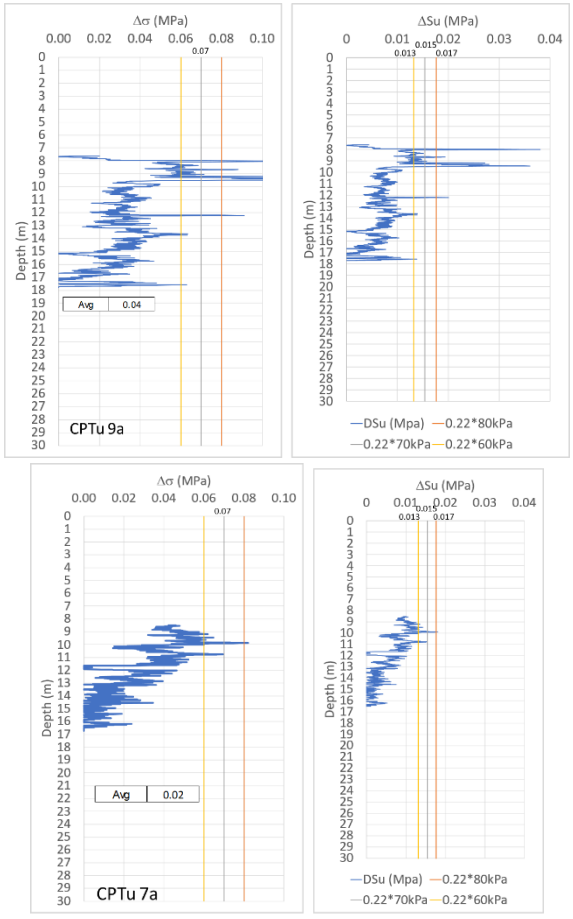
Gambar 12 . Grafik q_t sebelum, q_t target dan q_t setelah vakum CPTu 7a

Parameter Bq* merupakan rasio antara besarnya bagian tahanan tanah terhadap bagian tekanan air. Bq* dapat dikorelasikan dengan nilai OCR dimana tanah *normally consolidating* (OCR = 1) memiliki nilai Bq* = 0.638. Jika Bq* ≥ 0.638 maka tanah masih akan berkonsolidasi. Berdasarkan hasil nilai Bq* dari uji CPTu setelah vakum konsolidasi nilai OCR didapatkan. Berdasarkan nilai OCR, tegangan prakonsolidasi dapat dihitung. Hasil peningkatan Pc' menunjukan tanah *clay* belum mengalami distribusi beban dari permukaan dimana tanah seharusnya sudah mengalami peningkatan beban akibat *fill* + 80 kPa (125 kPa). Tegangan prakonsolidasi juga dapat dihitung dengan persamaan yang diusulkan Mayne, 2005 dengan mempertimbangkan parameter q_{net}, Δu_2 dan q_E. Data σ_p' berdasarkan q_E lebih relevan dibandingkan menggunakan data q_{net} dan Δu_2 karena rata – rata pada kedalaman 7.5 – 12 m, $\Delta\sigma_p$' sudah mengalami peningkatan tegangan dengan rata – rata sebesar 70 kPa.



Gambar 13 . Grafik perbandingan ΔPc'dan $\Delta\sigma_p$'

Besar peningkatan kuat geser tanah (ΔSu) digunakan sebagai parameter analisis besar tekanan vakum (Δσ) yang diterima oleh tanah. Secara teori, setelah selesai konsolidasi, nilai kuat geser tanah akan meningkat sebesar 0,22 Δσ (Mesri, 1989). Besar peningkatan kuat geser tanah (ΔSu) merupakan selisih nilai Su yang diperoleh dari uji CPTu sebelum konsolidasi dengan nilai Su yang diperoleh dari uji CPTu setelah pekerjaan konsolidasi. Dengan beban sesuai kondisi lapangan (125 kPa) besar nilai ΔSu seharusnya sebesar 0.22 Δσ yaitu sebesar 27.5 kPa, sedangkan rata-rata pada lokasi studi ΔSu = 6.2 kPa atau 23% dari ΔSu seharusnya.



Gambar 13 . Grafik peningkatan σ_v' dan Su

Kesimpulan

Faktor – faktor yang mempengaruhi efektifitas PVD vakum konsolidasi yaitu:

1. Adanya lapisan tanah *sand* diantara lapisan tanah *clay* pada penanganan PVD vakum. Hal ini terlihat dari distribusi beban yang terbaca dari *monitoring piezometer* rata – rata hanya mencapai 43 kPa.
2. Adanya penurunan beban vakum yang terbaca dari *monitoring vacuum gauge* pada elevasi permukaan dengan *monitoring piezometer* pada kedalaman 6 m dan 16 m.

Dengan dilakukan pekerjaan *slurry wall* efektifitas perbaikan tanah dengan PVD vakum konsolidasi terjadi peningkatan beban yang terbaca dari *monitoring piezometer* yaitu dari 43 kPa menjadi 70 kPa. Besarnya tegangan efektif yang tercapai dari pekerjaan vakum konsolidasi dapat dievaluasi dengan hasil uji CPTu dan disesuaikan dengan beban vakum yang diberikan sepanjang kedalaman PVD (*monitoring piezometer*).

Berdasarkan nilai q_t target lapisan tanah *clay* pada kedalaman PVD 7.5 m – 12 m telah mencapai peningkatan tegangan > 0.22 Δσ dan pada kedalaman 12 m – 17 m belum mencapai 0.22 Δσ. Pada kedalaman PVD 12 m – 17 m, menunjukan beban yang didistribusikan belum sesuai beban kondisi lapangan (125 kPa) yang artinya tanah masih akan berkonsolidasi.

Efektifitas dari pekerjaan vakum konsolidasi dapat dievaluasi dengan hasil uji CPTu. Melalui interpretasi Bq* dapat diketahui nilai OCR dan dilanjutkan untuk mengetahui tegangan prakonsolidasi (Pc'). Hasil menujukan lapisan tanah *clay* tidak menerima beban secara merata dari beban sesuai kondisi lapangan saat vakum konsolidasi.

Dengan uji CPTu interpretasi data terhadap *yield stress* (σp') dari Mayne, 2005 dapat dilakukan untuk mengetahui besarnya beban yang telah dialami semasa pekerjaan vakum dilakukan dari data CPTu. Data σ_p' berdasarkan q_E lebih relevan dibandingkan menggunakan data q_{net} dan Δu_2 karena rata – rata pada kedalaman 7.5 – 12 m, $\Delta\sigma_p$' sudah mengalami peningkatan tegangan dengan rata – rata sebesar 70 kPa. Dimana seharusnya $\Delta\sigma_p' = (\sigma_v'$ + beban vakum 80kPa) dari permukaan hingga dasar PVD.

Nilai σ_p' berdasarkan nilai q_E menunjukan hasil beban rata-rata yang sudah diterima lebih besar dari hasil interpretasi Pc'. Sedangkan nilai σ_p' berdasarkan nilai q_{net} dan Δu_2 menunjukan hasil beban rata-rata yang sudah diterima lebih kecil dari hasil interpretasi Pc'.

Besarnya peningkatan Su dari hasil CPTu menggunakan rumus Mayne et al, 2023 dengan 3 referensi rumus interpretasi yaitu q_{net}, Δu_2 dan q_E menunjukan hasil yang cukup mirip pada lapisan *clay*. Dengan beban sesuai kondisi lapangan (125 kPa) besar nilai ΔSu seharusnya sebesar 0.22 Δσ

yaitu sebesar 27.5 kPa, sedangkan rata-rata pada lokasi studi ΔSu = 6.2 kPa atau 23% dari ΔSu seharusnya.

Review efektifitas pekerjaan konsolidasi di lapangan memerlukan informasi dari dua parameter yaitu q_t dan u_2. Tidak terdisipasinya tekanan air pori pada tanah lunak akibat dari distribusi beban yang kurang maksimal menjadi penyebab utama tidak tercapainya peningkatan daya dukung tanah dan tanah lunak masih akan berkonsolidasi.

Referensi

Chai, J. C., Carter, J. P., & Hayashi, S. 2005. Ground Deformation Induced by Vacuum Consolidation. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering ASCE.* 131(12): 1552–1561.

Chen, B. S-Y., and Mayne, P. W. 1996. Statistical relationships between piezocone measurements and stress history of clays. *Canadian Geotechnical Journal*. 33 (3): 488-498.

Chu, J. and Yan, S.W. 2005. Application of the Vacuum Preloading Method in Soil Improvement Projects. *Ground Improvement Case Histories, Elsevier Geo-Engineering Book Series*.

Karlsrud, K., Lunne, T. & Brattlieu, K. 1996. Improved CPTu correlations based on block samples. *Nordisk Geoteknikermote.* Reykjavik.

Lau, K. W. K. & Cowland, J. W. 2000. Geosynthetically enhanced embankments for the Shenzhen river. *Adv. Transport. and Geoenviron. Systems Geosynth., Geotechnical Special Publication* no. 103, 140-- 161 pp.

Mesri, G. 1989. A Reevaluation of Su(mob) = 0.22 σ' Using Laboratory Shear Tests. *Canadian Geotechnical Journal*. Vol. 26,No,l,pp.l62-164.

Mayne, P. W., Cargill, E., & Greig, J. 2023. *The Cone Penetration Test: Better Information, Better Decisions*. ConeTec Group.

Mayne, P. W. 2005. *Keynote: Integrated Ground Behavior: In-Situ and Lab Tests.* Deformation Characteristics of Geomaterials, (Proc. IS-Lyon 2003), Tavlor & Francis Group, London: 154-176.

Mayne, P. W. 2001. Stress-strain-strength-flow parameters from enhanced in-situ tests. *Proceedings, International Conference on In-Situ Measurement of Soil Properties & Case Histories (In-Situ 2001), Bali, Indonesia*, 27-47. Download from: www.usucger.org.

Mayne, P. W., Peuchen, I. & Baltoukas, D. 2015. *Piezocone evaluation of undrained strength in soft to firm offshore clays*. Frontiers in Offshore Geotechnics III, Vol. 2 (Proc. ISFOG, Oslo), Taylor & Francis Group, London: 1091-1096.

Rahardjo, P. P. 2016. *CPTu in Consolidating Soils*. Proceeding International Conference for Site Characterization ISC 5th, Gold coast Australia.

Rongsadi, Kirana. 2017. *Evaluasi Performa/Perilaku Tanah Lunak Setelah Vacuum Preloading dengan Menggunakan CPT*u. Thesis, Universitas Katolik Parahyangan Bandung, Indonesia.

Seah, T. H. 2006. Design and Construction of Ground Improvement Works at Suvarnabhumi Airport. *Geotechnical Engineering Journal of the Southeast Asian Geotechnical Society*, 37: 171-188.

Schmertmann. 1978. *Cone Penetration Test.* US Department.

Setiawan, Ricky. 2017. *Interpretasi Uji CPTu pada Tanah Dasar dan Endapan Erupsi Lumpur di Sidoarjo, Jawa Timur.* Thesis, Universitas Katolik Parahyangan Bandung, Indonesia.

Setionegoro, Nurindahsih. 2013. *Studi Karakterisasi Lapangan Lapisan Tanah Lempung Lunak Under-Consolidating Menggunakan Hasil Uji Piezocone*. Disertasi, Universitas Katolik Parahyangan Bandung, Indonesia.

Wang, J., Cai, Y., Ni, J., Geng, X., & Xu, F. 2017. Effect of Sand on the Vacuum Consolidation of Dredged Slurry. *Marine Georesources & Geotechnology.*