

PERBANDINGAN DAYA DUKUNG TIANG PANCANG BERDASARKAN DATA CPTE SEBELUM DAN SESUDAH *VACUUM CONSOLIDATION* PADA PROYEK X

Mikael Dylan Gunawan^{1*} dan Ali Iskandar¹

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
*mikael.325210018@untar.ac.id

Masuk: 07-10-2024, revisi: 10-02-2025, diterima untuk diterbitkan: 13-02-2025

ABSTRACT

Soft clay soil is often a problem in the construction of deep foundation construction in the North Jakarta area, especially discussed in this research is piles. The problems most often found in clay soils in particular are soil shear strength and low bearing capacity and large settlement, the solution to increase the bearing capacity and shear strength and minimize the settlement that occurs is soil improvement. In this research, the soil improvement carried out is vacuum consolidation where vacuum consolidation is a method that combines PVD (Prefabricated Vertical Drain) with a pump whose function is to reduce excess pore water pressure. This research also discusses the comparison of bearing capacity on square driven piles with a size of 300 mm x 300 mm using CPTe testing before and after vacuum consolidation with a planned depth of 12 m. The calculation method in this study uses a correlation with S_u (undrained shear strength), in the results of this study it can be seen that the comparison of ultimate bearing capacity of the piles increased significantly after soil improvement with vacuum consolidation. From this comparison, it can be seen that the problem of low pile bearing capacity or soil shear strength and large settlement can be solved by soil improvement.

Keywords: Soft clay; driven pile; CPTe; vacuum consolidation; bearing capacity

ABSTRAK

Tanah lempung lunak sering menjadi masalah pada saat pembangunan konstruksi fondasi dalam pada daerah Jakarta Utara, khususnya yang dibahas pada penelitian ini adalah tiang pancang. Masalah-masalah yang paling sering ditemukan pada tanah lempung khususnya adalah kuat geser tanah dan daya dukung yang rendah serta penurunan yang besar, solusi agar daya dukung dan kuat geser meningkat serta memperkecil penurunan yang terjadi adalah perbaikan tanah. Pada penelitian ini perbaikan tanah yang dilakukan adalah *vacuum consolidation* dimana *vacuum consolidation* merupakan metode yang menggabungkan antara PVD (*Prefabricated Vertical Drain*) dengan pompa dimana fungsinya untuk mengurangi tekanan air pori eksese. Penelitian ini sekaligus membahas perbandingan daya dukung pada tiang pancang persegi dengan ukuran 300 mm x 300 mm menggunakan pengujian CPTe sebelum dan sesudah *vacuum consolidation* dengan kedalaman rencana adalah 12 m. Metode perhitungan pada penelitian ini memakai korelasi dengan S_u (kuat geser tak teralir), pada hasil penelitian ini dapat terlihat perbandingan daya dukung ultimate pada tiang pancang meningkat secara signifikan setelah dilakukan perbaikan tanah dengan *vacuum consolidation*. Dari perbandingan tersebut, dapat terlihat bahwa masalah mengenai daya dukung tiang ataupun kuat geser tanah yang rendah serta penurunan yang besar dapat teratasi dengan melakukan perbaikan tanah.

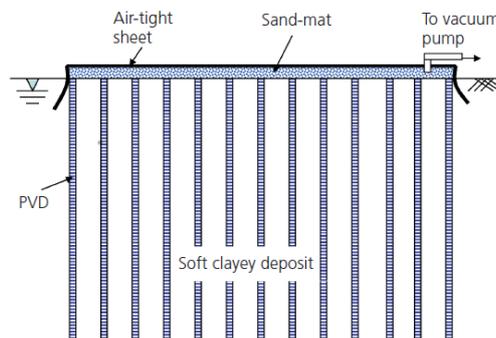
Kata kunci: Lempung lunak; tiang pancang; CPTe; *vacuum consolidation*; daya dukung

1. PENDAHULUAN

Pada konstruksi fondasi dalam, tiang pancang merupakan salah satu elemen struktural penting untuk memindahkan beban dari struktur di atas tanah ke lapisan tanah yang lebih dalam dengan daya dukung yang cukup. Tiang pancang yang dirancang harus memiliki ketahanan yang kuat sehingga keamanan bangunan yang berada diatas fondasi tiang pancang tersebut dapat terjamin, selain itu tiang pancang memiliki keunggulan pada waktu instalasi karena tiang pancang merupakan suatu fondasi dalam yang dicetak di pabrik sehingga dapat diinstalasi kapan pun sesuai dengan waktu instalasi yang diinginkan (Divani & Prihatiningsih, 2024). Salah satu faktor yang diperlukan agar fondasi tiang pancang memiliki ketahanan yang kuat adalah daya dukung yang tinggi, daya dukung yang tinggi akan berdampak pula pada jumlah kebutuhan tiang dalam menahan beban yang disalurkan (Santoso & Hartono, 2020). Sehingga jika suatu fondasi tiang pancang membutuhkan jumlah tiang yang lebih sedikit maka biaya yang diperlukan untuk konstruksi fondasi tiang pancang tersebut akan lebih murah dibandingkan dengan kebutuhan tiang yang lebih banyak akibat daya dukung yang rendah (Wismantarahrjo & Sarie, 2020).

Pada analisis ini digunakan penetesasan pada lapangan menggunakan alat CPTe dengan konsep penetrasi konus listrik. CPT (*Cone Penetration Test*) merupakan pengujian yang paling sering digunakan pada bidang geoteknik karena pengujian yang dilakukan oleh CPT lebih baik dibandingkan dengan tes lapangan yang lainnya, pengujian pada CPT ini mendapatkan 2 parameter penting yaitu resistensi kerucut (q_c) dan tahanan selimut (f_s) (Basoka, 2020). CPTe atau Penetrasi konus Listrik kemungkinan dikembangkan selama perang dunia ke-2 di Berlin dimana sinyal disalurkan ke dalam permukaan tanah melalui kabel yang berada di dalam batang penetrometer (Lunne & Robertson, 2002). Beberapa kelebihan yang terdapat pada penetrasi konus listrik dibandingkan dengan penetrasi konus mekanik diantaranya yaitu: dapat menghindari adanya hasil uji yang salah akibat gesekan antara batang bagian dalam dan tabung luar, dapat menghindari kemungkinan tahanan konus terganggu akibat pergerakan tanah yang tidak diinginkan, dan pembacaan hasil serta pencatatan yang lebih mudah (Lunne & Robertson, 2002).

Tanah yang berada pada Proyek X yang terletak di daerah Jakarta Utara merupakan tanah yang termasuk ke dalam kategori tanah lempung lunak yang memiliki permeabilitas yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi sehingga membutuhkan perbaikan tanah. Salah satu perbaikan tanah yang digunakan dalam penelitian ini adalah *vacuum consolidation*, *vacuum consolidation* merupakan perbaikan tanah dengan metode gabungan antara PVD (*Prefabricated Vertical Drain*) dengan vakum (pompa) yang memiliki konsep kerja untuk mengurangi tekanan air pori eksese pada tanah menggunakan tekanan dari pompa (vakum) (Cheryl & Lim, 2024), tekanan vakum umumnya berkisar antara 60-80 kPa (Han, 2015). *vacuum consolidation* dapat mempercepat proses konsolidasi tanah (khususnya tanah yang masih mengalami konsolidasi atau *Under Consolidated*), meningkatkan daya dukung dan kuat geser tanah, serta dapat memperkecil penurunan pasca konstruksi (Puspita & Saggaf, 2018).



Gambar 1. Skema perbaikan tanah dengan metode *vacuum consolidation* (Chai et al., 2014).

Konstruksi fondasi dalam seperti tiang pancang yang digunakan pada keadaan tanah lunak seperti ini sering mengalami masalah seperti daya dukung yang rendah sehingga jumlah keperluan tiang yang dibutuhkan untuk menahan beban akan semakin banyak, maka dari itu penulis membuat perbandingan daya dukung tiang pancang pada tanah sebelum dan sesudah dilakukan *vacuum consolidation* dengan tujuan akhir penelitian adalah mendapatkan nilai daya dukung lebih baik saat setelah dilakukan *vacuum consolidation* dibandingkan tanpa *vacuum consolidation*.

Metode deRuiter & Berigen (1975)

Metode deRuiter & Berigen menggunakan korelasi dengan nilai kuat geser tanah tak teralir (S_u) untuk mendapatkan daya dukung ujung tiang dan daya dukung selimut pada tanah lempung (Rahardjo, 2017). Daya dukung ujung tiang menurut DeRuiter & Berigen dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$q_p = 5 \cdot S_u \quad (1)$$

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

Dengan q_p = tahanan ujung yang tidak melebihi dari 150 kg/cm² (kPa), S_u = Kuat geser tanah tak teralir (kPa), q_c = tahanan konus (kPa), dan N_k = Faktor penetrasi konus (digunakan 20).

Daya dukung selimut menurut deRuiter & Berigen dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$f_s = \alpha \cdot S_u \quad (3)$$

Dengan f_s = tahanan selimut yang memiliki batas 1,2 kg/cm² (kPa), α = faktor adhesi, untuk lempung *Normally Consolidated* = 1 dan untuk lempung *Over Consolidated* = 0,5.

Daya Dukung Ultimate

Daya dukung *ultimate* pada tanah dapat diformulasikan pada persamaan sebagai berikut:

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (4)$$

$$Q_p = A_p \cdot q_p \quad (5)$$

$$Q_s = A_s \cdot f_s \quad (6)$$

Dengan Q_u = daya dukung *ultimate* (kN), Q_p = daya dukung ujung tiang (kN), Q_s = daya dukung selimut tiang (kN), A_p = luas penampang tiang (m^2), dan A_s = luas selimut tiang (m^2).

Penurunan Konsolidasi Tanah

Perhitungan Penurunan tanah terbagi menjadi 3 yaitu penurunan *immediate* (Penurunan Seketika), penurunan konsolidasi primer, dan penurunan konsolidasi sekunder tetapi yang akan digunakan pada penelitian ini adalah penurunan konsolidasi primer. Penurunan konsolidasi primer pada tanah lempung dapat diformulasikan sebagai berikut:

Kondisi *Normally Consolidated* :

$$S_c = \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \text{Log} \left(\frac{P'_o + \Delta\sigma}{P'_o} \right) \quad (7)$$

Kondisi *Over Consolidated* ($P'_o + \Delta\sigma < P'_c$) :

$$S_c = \frac{C_r \cdot H}{1 + e_0} \text{Log} \left(\frac{P'_o + \Delta\sigma}{P'_o} \right) \quad (8)$$

Kondisi *Over Consolidated* ($P'_o + \Delta\sigma > P'_c$) :

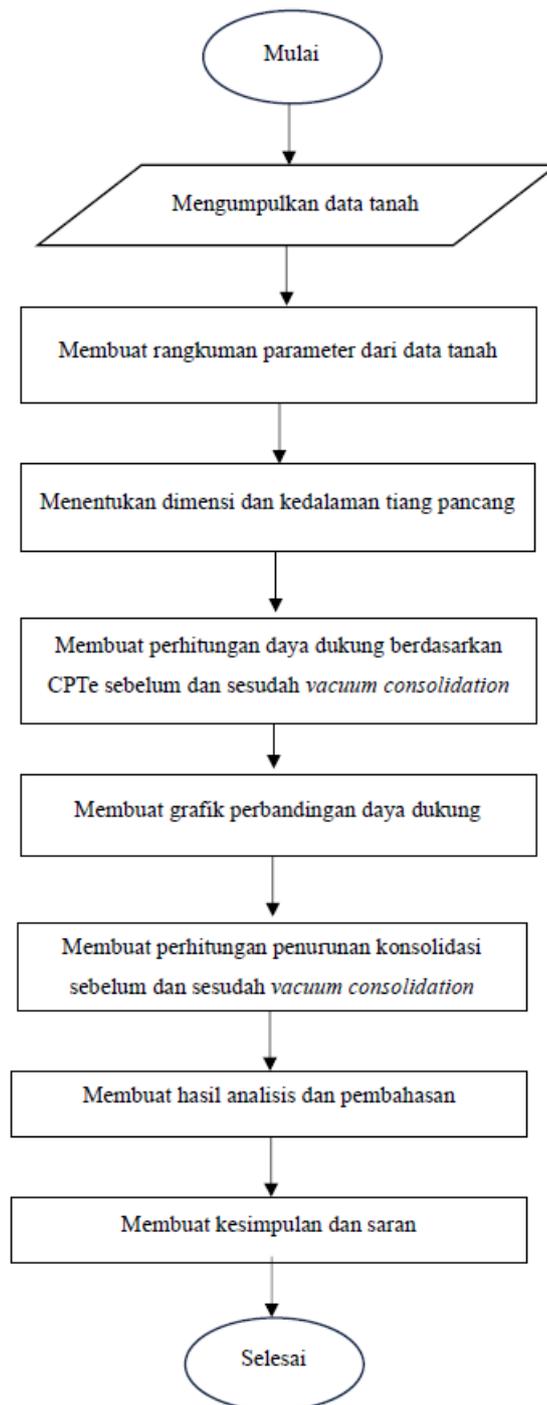
$$S_c = \frac{C_r \cdot H}{1 + e_0} \text{Log} \left(\frac{P'_c}{P'_o} \right) + \frac{C_c \cdot H}{1 + e_0} \text{Log} \left(\frac{P'_o + \Delta\sigma}{P'_c} \right) \quad (9)$$

Dengan C_c = *Compression Index* (indeks kompresibilitas), C_r = *Rebound Compression Index*, e_0 = angka pori awal, H = tebal lapisan tanah (m), P'_o = tegangan efektif tanah (kN/m^2), P'_c = tegangan prakonsolidasi (kN/m^2), $\Delta\sigma$ = perubahan tekanan (kN/m^2).

2. METODE PENELITIAN

Pada bagian ini menjelaskan mengenai tahap-tahap atau proses dari awal penelitian hingga diperoleh hasil serta kesimpulan yang didapatkan. Untuk penjelasan proses atau alur penelitian diantaranya:

1. Pengumpulan data tanah, data tanah didapatkan dari proyek berdasarkan pengujian CPTe sebelum dan sesudah perbaikan tanah dengan *vacuum consolidation* yang merupakan parameter yang penting dalam analisis daya dukung.
2. Analisis daya dukung, pada tahap ini akan dilakukan analisis dengan metode perhitungan deRuiter & Berigen sehingga didapatkan daya dukung tiang kemudian dibandingkan antara sebelum *vacuum consolidation* dan sesudah *vacuum consolidation*.
3. Kesimpulan dan Saran, pada tahap ini diperoleh simpulan mengenai daya dukung sebelum dan sesudah *vacuum consolidation* dan juga saran atau rekomendasi yang dapat diberikan.

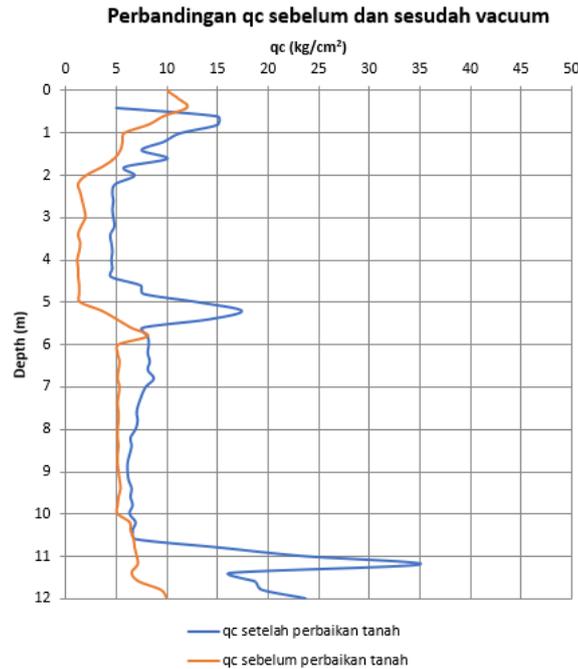


Gambar 2. Bagan alur penelitian.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengumpulan data tanah

Data-data yang digunakan dalam penelitian diperoleh berdasarkan hasil pengujian pada lapangan menggunakan data CPTe sebelum dan sesudah tanah tersebut diperbaiki menggunakan metode *Vacuum Consolidation*. Kedalaman PVD (*Prefabricated Vertical Drain*) berdasarkan proyek tersebut sampai dengan kedalaman 12 m.



Gambar 3. Perbandingan data proyek CPTe sebelum dan sesudah vacuum consolidation

Rangkuman parameter tanah

Dari grafik data dari pengujian CPTe sebelum dan sesudah *vacuum consolidation*, lalu diperoleh data q_c setiap kedalaman dan dari q_c tersebut dapat diketahui jenis tanah dan konsistensinya. Pada analisis parameter penting lainnya adalah S_u (kuat geser tak teralir), (Sadewa, 2023) nilai S_u merupakan parameter yang mempengaruhi kestabilan tanah tersebut sehingga semakin besar nilai S_u maka tanah tersebut akan semakin kuat untuk menahan beban yang lebih besar dan semakin stabil. Pada rangkuman parameter tanah sebelum dan sesudah *vacuum consolidation* terjadi peningkatan nilai S_u pada setiap 1 m kedalaman yang dapat terlihat pada tabel 3.

Tabel 1. Rangkuman parameter tanah sebelum *vacuum consolidation*

Kedalaman (m)	Rata-rata q_c (kg/cm ²)	Jenis Tanah	Konsistensi	γ_{sat} (kN/m ³)	C_c	C_r	e_0	P'_c (kN/m ²)	OCR
0	2	Silty Clay	Stiff	16,5	0,1	0,01	0,65	13,38	
2	5	Silty Clay	Very Soft	14,5	0,42	0,042	1,8	27,45	1
5	12	Silty Clay	Medium Stiff	16	0,3	0,03	1,3	70,78	

Tabel 2. Rangkuman parameter tanah setelah *vacuum consolidation*

Kedalaman (m)	Rata-rata q_c (kg/cm ²)	Jenis Tanah	Konsistensi	γ_{sat} (kN/m ³)	C_c	C_r	e_0	P'_c (kN/m ²)	OCR
0	2	Silty Clay	Stiff	16,5	0,1	0,01	0,65	18,73	
2	5	Silty Clay	Medium Stiff	16	0,42	0,042	1,8	44,73	1,4
5	12	Silty Clay	Stiff	16	0,3	0,03	1,3	99,09	

Tabel 3. Persentase kenaikan nilai S_u setelah *vacuum consolidation*

Kedalaman (m)	S_u sebelum <i>vacuum consolidation</i> (kPa)	S_u setelah <i>vacuum consolidation</i> (kPa)	Persentase kenaikan (%)	Rata-rata persentase (%)
0	0	0	0	
1	29	56,5	95	
2	10	34	240	
3	9,5	23,5	147	
4	5,5	23	318	

Tabel 4 (Lanjutan). Persentase kenaikan nilai S_u setelah *vacuum consolidation*

Kedalaman (m)	S_u sebelum <i>vacuum consolidation</i> (kPa)	S_u setelah <i>vacuum consolidation</i> (kPa)	Persentase kenaikan (%)	Rata-rata persentase (%)
5	7	22,5	221	
6	26	41	58	
7	26,5	39,5	49	
8	25,5	34,5	35	131
9	26	30,5	17	
10	25,5	31,5	24	
11	35	117	234	
12	50	118,5	137	

Spesifikasi tiang pancang

Tiang pancang persegi yang digunakan diambil berdasarkan katalog dari PT. Wijaya Karya Beton dengan ukuran tiang pancang persegi adalah 300 mm x 300 mm (*Class C*) dengan luas area penampang 90.000 mm², momen inersia penampang sebesar 675.000.000 mm⁴, berat tiang sebesar 225 kg/m, dan memiliki kuat tekan beton sebesar 42 MPa yang dipasang dengan kedalaman sampai dengan 12 m.

Perhitungan daya dukung tiang

Pada bab sebelumnya telah dilampirkan data proyek berdasarkan CPTe dimana menggunakan nilai resistensi kerucut (q_c) maka dari itu metode perhitungan yang akan digunakan adalah metode deRuijter & Berigen seperti yang sudah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Metode ini juga menggunakan korelasi antara resistensi kerucut (q_c) dengan nilai S_u (Kuat geser tak teralir) dan dapat terlihat juga pada penjelasan pada rangkuman parameter sebelumnya, bahwa nilai S_u (Kuat geser tak teralir) mendapatkan peningkatan yang signifikan setelah dilakukan *vacuum consolidation* sehingga akan mempengaruhi nilai daya dukung yang diperoleh. Dari hasil perhitungan dapat terlihat peningkatan daya dukung *Ultimate* (Q_u) setelah dilakukan *vacuum consolidation* pada tabel 8.

Tabel 5. Perhitungan daya dukung ujung tiang pancang sebelum *vacuum consolidation*

Parameter	Nilai Perhitungan
Kedalaman (m)	12
q_c (kg/cm ²)	10
N_k	20
S_u (kPa)	50
q_p (kN/m ²)	250
A_p (m ²)	0,09
Q_p (kN)	22.5

Tabel 6. Perhitungan daya dukung selimut tiang pancang sebelum *vacuum consolidation*

Parameter	Nilai Perhitungan
Kedalaman (m)	12
q_c (kg/cm ²)	10
S_u (kPa)	50
α	1
f_s (kN/m ²)	50
A_s (m ²)	14,4
Q_s (kN)	2584,8

Tabel 7. Perhitungan daya dukung ujung tiang pancang setelah *vacuum consolidation*

Parameter	Nilai Perhitungan
Kedalaman (m)	12
q_c (kg/cm ²)	23,7
N_k	20
S_u (kPa)	118,5
q_p (kN/m ²)	592,5

Tabel 8 (Lanjutan). Perhitungan daya dukung ujung tiang pancang setelah vacuum consolidation

Parameter	Nilai Perhitungan
A_p (m ²)	0,09
Q_p (kN)	53,325

Tabel 9. Perhitungan daya dukung selimut tiang pancang setelah vacuum consolidation

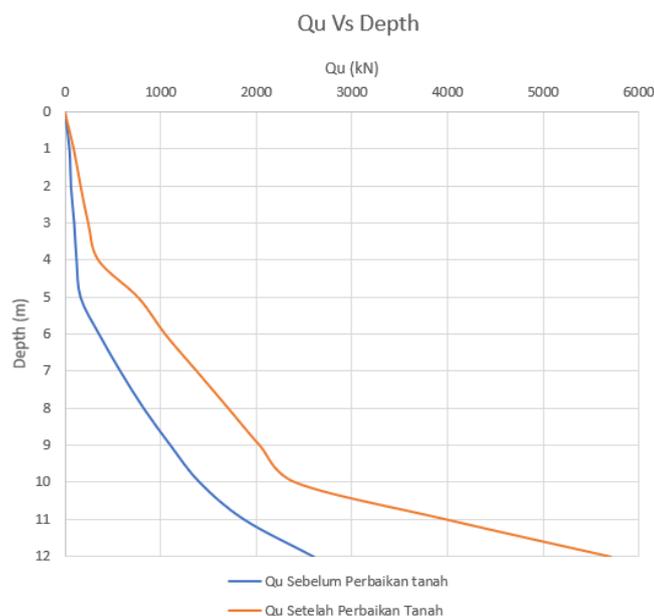
Parameter	Nilai Perhitungan
Kedalaman (m)	12
q_c (kg/cm ²)	23,7
S_u (kPa)	118,5
α	1
f_s (kN/m ²)	118,5
A_s (m ²)	14,4
Q_s (kN)	5654,4

Tabel 10. Perhitungan daya dukung ultimate tiang pancang

	Q_p (kN)	Q_s (kN)	Q_u (kN)
Sebelum <i>vacuum consolidation</i>	50	2584,8	2607,3
Sesudah <i>vacuum consolidation</i>	53,325	5654,4	5707,725

Grafik daya dukung ultimate

Pada bab ini akan dilampirkan grafik perbandingan dari daya dukung ultimate (Q_u) sebelum dan sesudah *vacuum consolidation* berdasarkan dari perhitungan daya dukung ultimate (Q_u) tiang pancang yang telah dibahas pada perhitungan sebelumnya agar hasil perbedaan daya dukung ultimate (Q_u) sebelum dan sesudah *vacuum consolidation* dapat terlihat secara detail. Daya dukung yang didapatkan pada perhitungan sebelumnya diplot dalam grafik pada sumbu x dan pada sumbu y terdapat kedalaman tiang tersebut. Dapat terlihat pada grafik perbandingan daya dukung terdapat perbedaan daya dukung ultimate (Q_u) yang signifikan setelah dilakukan *vacuum consolidation* pada kedalaman 12 m. Selain itu dapat terlihat pula sebelum kedalaman 12 m daya dukung ultimate tiang (Q_u) yang diperoleh sudah meningkat setelah dilakukan *vacuum consolidation*. Grafik perbandingan daya dukung ultimate (Q_u) sebelum dan sesudah *vacuum consolidation* dapat terlihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Grafik perbandingan daya dukung ultimate sebelum dan sesudah vacuum consolidation

Perhitungan penurunan konsolidasi tanah

Pada bab sebelumnya telah dijelaskan untuk perhitungan penurunan pada tanah akan digunakan penurunan konsolidasi karena *vacuum consolidation* merupakan metode perbaikan tanah yang menggunakan prinsip konsolidasi tanah sehingga pada bab ini akan dihitung untuk penurunan konsolidasi sebelum dilakukan *vacuum consolidation* dan sesudah dilakukan *vacuum consolidation*. Untuk perhitungan penurunan tanah ini, asumsi *raft* ekuivalen yang digunakan adalah $2/3 L$ dari atas kepala tiang dimana L adalah panjang tiang sehingga penurunan yang dihitung adalah lapisan tanah yang berada dibawah $2/3 L$. Parameter konsolidasi yang digunakan seperti C_c , C_r , e_0 , dan P'_o pada perhitungan penurunan tanah ini didapatkan dari rangkuman parameter tanah pada pembahasan sebelumnya. Pada perhitungan penurunan tanah sebelum *vacuum consolidation* kondisi tanah tersebut adalah *normally consolidated* dan sesudah *vacuum consolidation* kondisi tanah tersebut adalah *over consolidated* dengan $P'_o + \Delta\sigma < P'_c$. Perhitungan penurunan konsolidasi tanah sebelum dan sesudah *vacuum consolidation* dapat terlihat pada tabel 9.

Tabel 11. Perhitungan penurunan konsolidasi sebelum dan sesudah *vacuum consolidation*

	S_c (cm)
Sebelum <i>vacuum consolidation</i>	39,88
Sesudah <i>vacuum consolidation</i>	8,29

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan pembahasan pada bagian-bagian sebelumnya, diperoleh beberapa kesimpulan diantaranya:

1. Berdasarkan hasil perhitungan S_u (kuat geser tak teralir) pada setiap kedalaman, terjadi peningkatan nilai S_u (kuat geser tak teralir) setelah dilakukan perbaikan tanah dengan *vacuum consolidation* dengan rata-rata persentase kenaikan sebesar 131 % sampai dengan kedalaman 12 m yang berarti tanah tersebut mendapatkan kekuatan (*gained strength*) dengan rata-rata sebesar 131 % sampai kedalaman 12 m dibandingkan dengan sebelumnya.
2. Berdasarkan hasil perhitungan daya dukung *ultimate*, diperoleh daya dukung *ultimate* (Q_u) tiang pancang pada kedalaman 12 m sebelum adanya perbaikan tanah dengan *vacuum consolidation* sebesar 2607,3 kN dan diperoleh daya dukung tiang pancang pada kedalaman 12 m sesudah adanya perbaikan tanah dengan *vacuum consolidation* sebesar 5707,725 kN. Dari hasil ini dapat terlihat bahwa daya dukung tiang mendapatkan peningkatan nilai daya dukung yang lebih besar dari yang sebelumnya yang berarti jumlah tiang yang diperlukan untuk menahan beban yang diterima akan berkurang dibandingkan yang sebelumnya.
3. Berdasarkan hasil perhitungan penurunan, diperoleh penurunan konsolidasi tanah sebelum dilakukan *vacuum consolidation* sebesar 39,88 cm dan penurunan konsolidasi tanah sesudah dilakukan *vacuum consolidation* sebesar 8,29 cm. Dari hasil ini dapat disimpulkan bahwa *vacuum consolidation* dapat mengurangi penurunan tanah akibat konsolidasi secara signifikan. Sehingga selain memiliki daya dukung yang tinggi, *vacuum consolidation* juga terbukti dapat mengatasi masalah akibat penurunan yang besar yang terjadi pada tanah lempung lunak.
4. Berdasarkan dari dasar teori yang telah disampaikan pada pendahuluan sebelumnya bahwa perbaikan tanah dengan *vacuum consolidation* dapat meningkatkan kuat geser dan daya dukung serta memperkecil penurunan pada tanah lempung lunak terbukti dari perhitungan daya dukung dan grafik daya dukung serta perhitungan penurunan konsolidasi tanah yang terdapat pada bagian pembahasan.

Saran

Berdasarkan pembahasan pada bagian-bagian sebelumnya, saran yang dapat diberikan yaitu Sebelum melakukan *design* pada suatu konstruksi fondasi dalam seperti tiang pancang atau tiang bor pada tanah lempung lunak yang sering mengalami masalah pada daya dukung, kuat geser tanah yang rendah, penurunan yang besar sebaiknya dilakukan perbaikan tanah seperti *vacuum consolidation* ataupun perbaikan tanah lain sebab dapat terlihat pada pembahasan sebelumnya adanya peningkatan kuat geser dan daya dukung serta dapat memperkecil penurunan yang terjadi akibat dari metode *vacuum consolidation* tersebut.

DAFTAR PUSTAKA

- Basoka, I. W. A. (2020). Perbandingan Daya Dukung Tiang Pancang Berdasarkan Pengujian Cone Penetration Test (CPT) Dan Standard Penetration Test (SPT) Pada Tanah Berpasir. *Jurnal Kadiri Riset Teknik Sipil*, 4, 109-123. <https://doi.org/10.30737/ukarst.v4i1.793>
- Chai, J., Carter, J. P., & Liu, M. D. (2014). Methods of vacuum consolidation and their deformation analyses. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement*, 167(1), 35-46. <https://doi.org/10.1680/grim.13.00017>
- Cheryl, M. F., & Lim, A. (2024). Studi Kasus Pemodelan Vacuum Consolidation dan Prefabricated Vertical Drain. *Jurnal Komposit: Jurnal Ilmu-ilmu Teknik Sipil*, 8 (2), 411- 420. <http://dx.doi.org/10.32832/komposit.v8i2.16500>
- Divani, L. J., & Prihatiningsih, A. (2024). Analisis daya dukung tiang pancang spun dan persegi pada tanah berbutir halus dan kasar. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 381-392. <https://doi.org/10.24912/jmts.v7i2.28044>
- Han, J. (2015). *Principles and practice of ground improvement*. John Wiley & Sons.
- Lunne, T., Powell, J. J., & Robertson, P. K. (2002). *Cone penetration testing in geotechnical practice*. CRC press. <https://doi.org/10.1201/9781482295047>
- PT Wijaya Karya Beton Tbk. (2019). Download brosur. Diperoleh dari <https://wika-beton.co.id/download-brosur/ind>
- Puspita, Norma & Saggaf, Anis. (2018). Pengaruh VCM (Vacuum Consolidation Method) Pada Tanah Gambut: Review. https://www.researchgate.net/publication/342609983_Pengaruh_VCM_Vacuum_Consolidation_Method_Pada_Tanah_Gambut_Review
- Rahardjo, P. P. (2017). Manual Pondasi Tiang Edisi 5. *Parahyangan Catholic University, Bandung*.
- Sadewa, M. I. I (2023). Tugas Akhir Kinerja Vacuum Consolidation Method Pada Perbaikan Tanah Gambut Terhadap Nilai Kuat Geser Tanah.
- Santoso, H. T., & Hartono, J. (2020). Analisis perbandingan daya dukung pondasi tiang pancang berdasar hasil uji SPT dan pengujian dinamis. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil Universitas Sebelas Maret*, 4(1), 31-38. <https://doi.org/10.20961/jrrs.v4i1.44635>
- Wismantarharjo, M. T., Gandi, S., & Sarie, F. (2020). Analisis Daya Dukung Dan Penurunan Tiang Pancang Kelompok Proyek Pembangunan Gedung DPRD Kota Palangka Raya. *Jurnal Teknik: Jurnal Teoritis dan Terapan Bidang Keteknikan*, 3(2), 198-207. <https://doi.org/10.52868/jt.v3i2.2640>

