

PERBANDINGAN HASIL UJI KAPASITAS DUKUNG TIANG PANCANG PADA TANAH LEMPUNG JENUH SKALA LABORATORIUM DENGAN PERHITUNGAN ANALISIS STATIS

Gumbert Maylda Pratama

Program Studi Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta

Jln Babarsari 43 Yogyakarta

E-mail: gumbert.maylda@uajy.ac.id

Abstract: Pile bearing capacity, is an important parameter in infrastructure design. The pile driving process, especially in saturated clay soils, results in an increase in pore pressure which affects the bearing strength capacity of the pile foundation immediately after erection. By knowing the comparison of various ways to calculate the bearing capacity of a pile foundation, especially in clay soils, various influencing parameters can be studied and to be taken in determining the bearing capacity of a pile foundation. The test is carried out by comparing the value of the pile bearing capacity of a laboratory scale pile model with the results of the calculation of the pile bearing capacity using the static analysis method based on the results of the test parameters of the soil. The clay soil conditions in the test are limited to saturated conditions. The reading of the change in pore water pressure is carried out using a pressure transducer during the pile driving process. Based on the pile loading test results in the laboratory, the pile bearing capacity results were 0.31 kN, while the bearing capacity results based on the static analysis method were 0.75 kN. The difference in pile bearing carrying capacity is caused by excess pore water pressure that appears around the ground during the driving process.

Keywords: driven pile foundation, pile bearing capacity, saturated clay

Abstrak: Kapasitas dukung tiang, merupakan salah satu parameter yang penting dalam perancangan infrastruktur. Proses pemancangan tiang, khususnya pada tanah lempung jenuh, mengakibatkan kenaikan tekanan air pori yang berpengaruh pada kapasitas kuat dukung fondasi tiang sesaat setelah pemancangan. Dengan mengetahui perbandingan berbagai cara menghitung kapasitas dukung fondasi tiang, khususnya dalam tanah lempung, dapat dipelajari berbagai parameter yang berpengaruh dan pertimbangan yang perlu diambil dalam penentuan kapasitas dukung fondasi tiang. Pengujian dilakukan dengan membandingkan nilai kapasitas dukung ujung model tiang skala laboratorium dengan hasil perhitungan kapasitas kuat dukung tiang dengan menggunakan metode analisis statis berdasarkan hasil uji parameter tanah yang diuji. Kondisi tanah lempung dalam pengujian dibatasi dalam kondisi jenuh. Pembacaan perubahan tekanan air pori dilakukan menggunakan *pressure transducer* selama masa pemancangan tiang. Berdasarkan hasil uji pembebanan tiang di laboratorium, didapatkan hasil kuat dukung tiang sebesar 0,31 kN, sedangkan hasil kuat dukung berdasarkan metode analisis statis sebesar 0,75 kN. Perbedaan kapasitas dukung diakibatkan karena tekanan air pori berlebih yang muncul disekitar tanah saat proses pemancangan.

Kata kunci: fondasi tiang pancang, kapasitas dukung, tanah lempung jenuh

PENDAHULUAN

Kapasitas dukung tiang, merupakan salah satu parameter yang penting dalam perancangan infrastruktur. Pemahaman yang baik mengenai perilaku fondasi tiang dalam menahan beban yang bekerja dapat menghasilkan konstruksi struktur bawah yang efisien dan aman.

Berbagai cara dapat dilakukan untuk mendapatkan nilai kapasitas dukung tiang. Salah satu cara yang dapat dilakukan adalah melakukan

pengujian di laboratorium secara skalatis pada sampel fondasi tiang.

Metode analitis statis merupakan metode lain yang dapat digunakan dalam perhitungan kapasitas kuat dukung fondasi tiang. Melalui pengujian yang dilakukan untuk mengetahui parameter yang dibutuhkan, tersedia rumus statis yang dapat digunakan untuk menentukan kapasitas dukung tiang berdasarkan pengujian dan penjabaran dari rumus kapasitas dukung fondasi dangkal.

Proses pemancangan tiang, khususnya pada tanah lempung jenuh, mengakibatkan kenaikan tekanan air pori yang berpengaruh pada kapasitas kuat dukung fondasi tiang sesaat setelah pemancangan.

Akibat proses pemancangan, De Mello (1969), menggambarkan 4 tahap dampak pemancangan pada tanah lempung jenuh sebagai berikut:

1. Gangguan dan proses remolding di sekitar tanah sekitar tiang yang terpenetrasi selama pemancangan
2. Munculnya tekanan air pori berlebih dan perubahan kondisi tegangan dari tanah
3. Proses disipasi akibat tekanan air pori berlebih
4. Peningkatan kapasitas kuat geser tanah seiring dengan penambahan waktu

Dengan mengetahui perbandingan berbagai cara menghitung kapasitas dukung fondasi tiang, khususnya dalam tanah lempung, dapat dipelajari berbagai parameter yang berpengaruh dan pertimbangan yang perlu diambil dalam penentuan kapasitas dukung fondasi tiang. Dari berbagai parameter yang berpengaruh maka dapat dilakukan pendekatan analisis statis dalam rangka mendapatkan hasil kapasitas dukung, sehingga dapat dilakukan perhitungan secara sederhana untuk mendapatkan desain yang lebih efisien di lapangan.

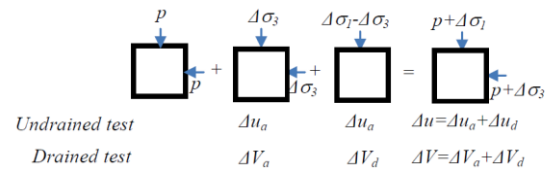
TINJAUAN PUSTAKA

Jenis tanah menentukan karakteristik tanah terutama dalam menahan beban. Dalam berbagai kasus yang terjadi, pembebanan yang terjadi pada tanah dapat dibagi dalam dua fase (Lambe dan Whitman, 1969):

1. Fase pembebanan tidak terdrainase, merupakan fase pembebanan saat terjadi peningkatan tekanan air pori tanpa disertai aliran air pori.
2. Fase disipasi, fase saat beban yang diterima tanah relatif konstan dan terjadi aliran untuk mendisipasi adanya tekanan air pori yang berlebih dari fase pembebanan tidak terdrainase.

Pada permasalahan yang terkait kuat geser tak terdrainase dari tanah, Skempton (1954) mendefinisikan perubahan tekanan air pori, Δu ,

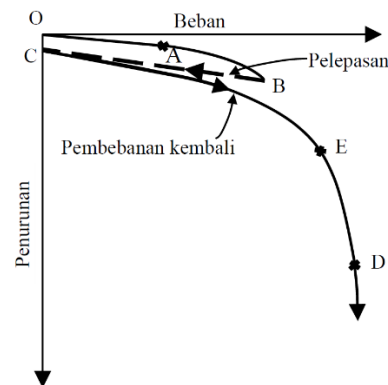
yang muncul akibat perubahan tegangan utama ($\Delta\sigma_1$ dan $\Delta\sigma_3$). Bila tanah berada pada kondisi awal tekanan efektif, p , yang setimbang, maka perkembangan tegangan utama dapat dianalisis dalam dua tahapan (Gambar 1).



Gambar 1. Fase perubahan tegangan pada elemen tanah (Skempton, 1954).

Fondasi yang mendukung beban aksial menyalurkan beban melalui dua mekanisme, gesekan selimut dan tahanan ujung. Tahanan berupa gesekan selimut merupakan hasil kombinasi dari gesekan di sisi tiang dan lekatan antara butiran tanah dengan tiang. Tahanan ujung merupakan hasil dari beban desak pada bagian bawah tiang dengan tanah, mirip dengan mekanisme penyaluran beban pada fondasi telapak.

Perilaku tiang dalam menerima beban desak disajikan dalam kurva hubungan beban-penurunan seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Kurva hubungan beban-penurunan akibat beban desak pada tiang (Tomlinson dan Woodward, 2014).

Kapasitas dukung fondasi tiang pancang pada tanah lempung dengan analisis statis

Metode Alpha (Analisis Tegangan Total)

Metode α merupakan sebuah metode perhitungan kapasitas dukung yang berdasarkan pada analisis tegangan total tanah. Metode ini dapat digunakan untuk menghitung kapasitas dukung

tiang pancang jangka pendek pada tanah dengan gradasi halus (Muni Budhu, 2007).

Kapasitas dukung gesek tiang dapat didefinisikan sebagai hasil perkalian antara tegangan gesek dengan luas selimut tiang.

$$Q_f = \alpha_u s_u A_s \quad (1)$$

Q_f merupakan kapasitas dukung gesek tiang
 α_u merupakan koefisien
 s_u merupakan kuat geser tidak terdrainase
 A_s merupakan luas selimut tiang

Kapasitas dukung ujung dasar tiang merupakan persamaan yang didapatkan mengikuti perhitungan fondasi dangkal, sebagai berikut:

$$Q_b = N_c (s_u)_b A_b \quad (2)$$

Q_b merupakan kapasitas ujung dasar tiang
 N_c merupakan koefisien daya dukung ujung tiang
 $(s_u)_b$ merupakan kuat geser tidak terdrainase di ujung dasar tiang
 A_b merupakan luas dasar penampang ujung tiang

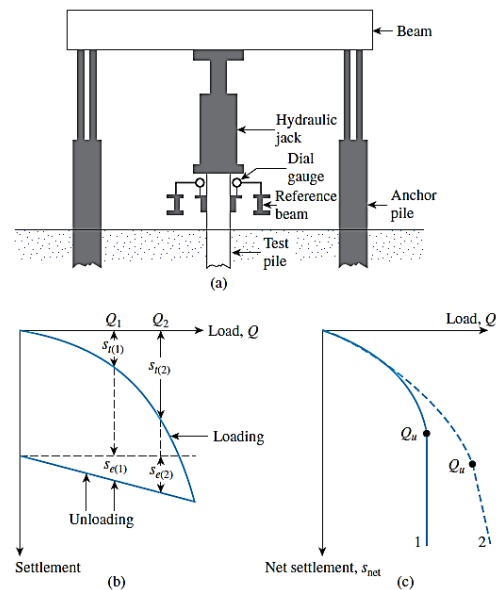
Pengujian pembebanan pada fondasi tiang

Kapasitas dukung tiang dapat ditentukan dengan berbagai macam cara, baik melalui rumus empiris, maupun secara langsung dengan pengujian di lapangan. Pengujian dengan pemberian beban pada model tiang di lapangan perlu dilakukan akibat ketidakakuratan metode prediksi yang ada. Skema pengujian kapasitas dukung tiang di lapangan dan kurva hasil pengujian dapat dilihat pada Gambar 3.

Pengujian beban tiang (load test) dilakukan untuk menentukan grafik hubungan beban dan penurunan. Dari grafik hubungan dapat diketahui kapasitas dukung ultimit dari tiang. Terdapat tiga macam metode uji beban tekan, yaitu metode beban tertahan (*maintained load*), metode penetrasi kecepatan konstan (*constant rate of penetration*), dan metode keseimbangan (*method of equilibrium*) (Hardiyatmo, 2010).

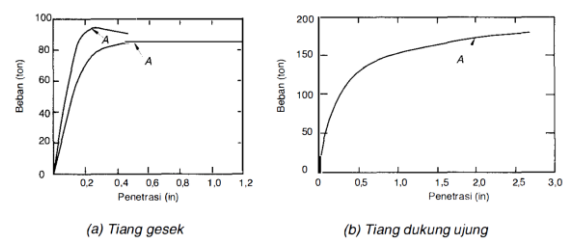
Perlu diperhatikan bahwa tujuan utama dari test dengan metode ini adalah mengetahui kapasitas dukung ultimit tiang. Kapasitas dukung ultimit pada metode ini didefinisikan sebagai kapasitas dukung ultimit pada saat tahanan maksimum tiang termobilisasi. Kurva hubungan gaya dan kedalaman penetrasi yang diperoleh dari pengujian ini tidak menggambarkan persamaan

kesetimbangan antara beban dan penurunan, sehingga penurunan pada beban rencana tidak dapat diperoleh.



Gambar 3. (a) Skema pengujian di lapangan, (b) Grafik hubungan beban desak dengan penurunan, (c) Grafik hubungan beban desak dengan penurunan netto (Das, 2011).

Tipikal diagram kurva hubungan gaya dan settlement hasil pengujian C.R.P pada tiang dukung ujung dan tiang dukung gesek dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Kurva tipikal hubungan gaya dan penurunan pada uji C.R.P (Whitaker, 1970 dalam Hardiyatmo, 2010)

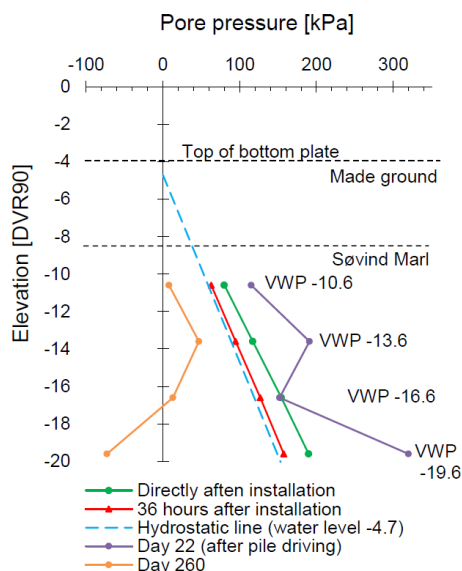
Pengaruh pemancangan tiang pada tanah lempung

Pemancangan tiang akan mengakibatkan perubahan tegangan di tanah. Pemahaman yang kurang memadai terkait kondisi tegangan awal dan hubungan tegangan-regangan pada lempung yang remolded, mengakibatkan tidak ada teori yang dapat menggambarkan permasalahan yang terjadi. Akibat pemancangan dijumpai kenaikan

tekanan air pori pada tanah. Flaate (1972) merangkum informasi pada penelitian dan literatur terkait proses *remoulding*, perubahan tegangan, dan perubahan karakteristik dari lempung akibat pemancangan. Diperoleh kesimpulan bahwa jenis tiang, karakteristik tanah, dan kondisi pemancangan mempengaruhi parameter yang ditinjau.

Pemancangan tiang pada lempung yang jenuh dapat ditinjau sebagai kondisi tidak terdrainase akibat proses remolding yang lebih cepat dibandingkan dengan disipasi tekanan air pori berlebih yang terjadi akibat penetrasi tiang pada tanah (Afshin, 2012). Sesuai dengan pertimbangan tegangan efektif, tekanan air pori merupakan selisih tegangan total dengan tegangan efektif tanah.

Simonsen dan Sørensen (2016) melakukan pengujian terkait perubahan tekanan air pori akibat pemancangan tiang baja pada tanah lempung Palaeogene dengan plastisitas tinggi. Pembacaan perubahan tekanan air pori dilakukan dengan menggunakan *piezometer*. Akibat pemancangan, terjadi perubahan profil tekanan air pori seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Profil tekanan air pori pada penelitian Simonsen dan Sørensen (2016).

METODE PENELITIAN

Pengujian karakteristik tanah yang dilakukan pada penelitian ini antara lain:

1. Uji gradasi butiran tanah (ASTM D 1140-17)
2. Uji kadar air (ASTM D 2216-19)
3. Uji berat jenis spesifik tanah (G_s) (ASTM D 854-14)
4. Uji batas-batas *Atterberg* (ASTM D 4318-17)
5. Uji triaxial UU (ASTM D 2850-15)

Model tiang besi yang digunakan berupa besi hollow yang diisi dengan beton, dengan ujung rata. Tiang memiliki pelat persegi sebagai bantalan untuk pemukul saat pemancangan dan sebagai referensi untuk mengukur penurunan saat uji pembebanan.

Ukuran tiang berupa diameter dan panjang tiang secara berturut-turut adalah sebesar 2,5 dan 30 cm (Gambar 6), sedangkan ukuran pelat pada bagian atas tiang adalah 10 cm dengan tebal sebesar 0,5 cm. Pemancangan dilakukan hingga tiang tertanam sedalam 25 cm.



Gambar 6. Model tiang yang digunakan dalam pengujian di laboratorium.

Tabung uji, merupakan tabung besi dengan ukuran diameter sebesar 15,5 cm dan tinggi sebesar 40 cm (Gambar 7). Saat pengujian tanah dipadatkan pada tabung uji dengan tinggi sampel pada tabung uji sebesar 35 cm.



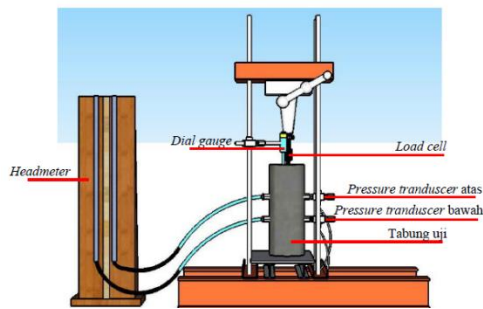
Gambar 7. Tabung uji yang digunakan dalam penelitian utama.

Pada pengujian dilakukan pula, pengukuran perubahan tekanan air pori menggunakan *pressure transducer* yang dipasang pada kedalaman tanah 10 cm dan 20 cm.

Beban diberikan melalui alat uji CBR (Gambar 8) dengan kecepatan putar yang diusahakan konstan pada kecepatan 0,01 – 0,02 cm/s. Pembacaan beban dilakukan melalui rekaman data melalui dial gauge yang dipasang pada dongkrak CBR.

Pembebanan dilakukan hingga kedalaman tiang mengalami pertambahan sebesar 5 cm, sesuai dengan batasan tabung uji dan panjang tiang.

Pengujian pembebanan disertai pembacaan penurunan. Penurunan dibaca relatif terhadap pelat pada tiang. Pembacaan penurunan dilakukan dengan alat dial gauge. Pada pelat diberikan kaca sebagai dudukan yang rata bagi ujung dial.

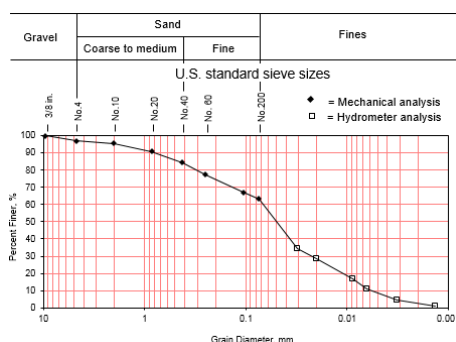


Gambar 8. Skema alat pada uji pembebanan.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Karakteristik tanah asli

Dari uji gradasi tanah diperoleh persentase lolos butiran seperti pada Gambar 9. Berdasarkan klasifikasi USCS, tanah sampel terdiri dari 63,28% tanah berbutir halus (lanau dan lempung). AASHTO dan ASTM memisahkan pengertian ukuran butiran lempung dan lanau. Berdasarkan grafik pengujian, berdasarkan AASHTO dan ASTM tanah terdiri atas 53,28% butiran lanau dan 10 % butiran lempung.



Gambar 9. Hasil uji gradasi butiran tanah.

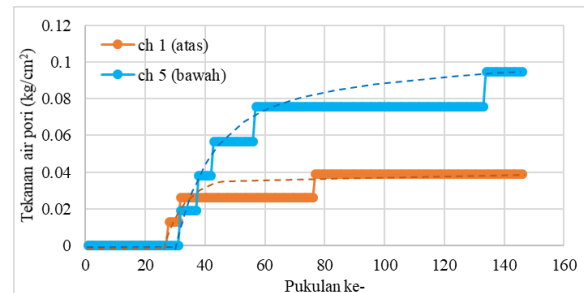
Hasil pengujian parameter tanah dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai parameter tanah asli

Parameter tanah	Hasil pengujian	Satuan
Kadar air (w)	18,62	%
Berat jenis spesifik (G_s)	2,60	-
Batas cair (LL)	44,35	%
Batas plastis (PL)	25,05	%
Indeks plastisitas (PI)	19,30	%
Kohesi tidak terdrainase (c_u)	41,48	kPa
Sudut geser dalam (ϕ)	1,98	°

Pembacaan tekanan air pori pada *pressure transducer*

Perubahan tekanan air pori selama pemancangan pada sampel dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10. Hasil pembacaan perubahan tekanan air pori selama proses pemancangan.

Dapat dilihat bahwa diperlukan sebanyak 146 kali pukulan pada tiang pancang untuk mencapai kedalaman rencana penelitian. Akibat proses pemancangan, dapat diamati telah terjadi peningkatan tekanan air pori. Tekanan air pori berkembang terlebih dahulu pada pembacaan *pressure transducer* bagian atas, dan disusul dengan kenaikan tekanan air pori berdasarkan pembacaan *pressure transducer* bagian bawah. Hal ini menunjukkan bahwa tekanan air pori berkembang pada titik posisi penetrasi tiang dalam tanah.

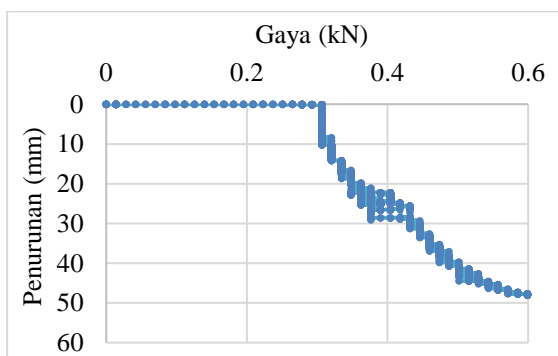
Dari pembacaan perubahan tekanan air pori akibat proses pemancangan pada Gambar 10 juga dapat diamati perilaku perubahan tekanan air pori pada bagian atas tidak mengalami

perubahan yang signifikan setelah tiang mengalami penetrasi yang lebih dalam. Selain itu grafik yang ada menunjukkan tekanan air pori yang berkembang pada bagian bawah jauh lebih besar dibandingkan tekanan air pori yang berkembang pada bagian atas.

Hasil uji pembebanan di laboratorium

Uji pembebanan dilakukan segera setelah proses pemancangan fondasi tiang dilakukan dengan selisih waktu berupa waktu untuk persiapan untuk setting alat pengujian.

Berdasarkan hasil uji pembebanan dengan alat uji CBR sesuai skema pengujian yang dapat pada Gambar 8, didapatkan grafik pembacaan gaya pada load cell dengan penurunan yang terbaca pada *dial gauge* seperti dapat dilihat pada Gambar 11.



Gambar 11. Hasil uji pembebanan di laboratorium.

Dari hasil pengujian, bila dilakukan koreksi dengan pendekatan pada Gambar 11 didapatkan kuat dukung tiang sebesar 0,31 kN.

Berdasarkan bentuk grafik hubungan penurunan dan pembacaan beban pada Gambar 11, didapatkan perilaku pertambahan beban yang tidak disertai penurunan yang signifikan. Bila diperhatikan kembali pada setup pengujian, hasil ini dapat terjadi karena jarak antara ujung tertanam tiang berada pada posisi yang relatif dekat terhadap dasar tabung sampel. Hal ini mengakibatkan tanah sampel tidak memiliki ruang yang cukup untuk mengalami deformasi arah vertikal.

Kapasitas Kuat Dukung berdasarkan metode analisis statis

Kuat dukung gesek tiang dihitung sesuai dengan persamaan (1), sedangkan kuat dukung ujung dihitung menggunakan persamaan (2).

Parameter kuat geser berupa kohesi tidak terdrainase diambil sesuai hasil uji triaxial UU pada Tabel 1. Kuat dukung tiang merupakan hasil penjumlahan dari kuat dukung gesek dengan kuat dukung ujung, dari hasil perhitungan didapatkan nilai kuat dukung tiang sebesar 0,75 kN.

Dibandingkan dengan hasil uji pembebanan di laboratorium, kuat dukung tiang berdasarkan metode analisis statis menghasilkan kuat dukung yang lebih besar dan bernilai sekitar 2,4 kali lipat dari hasil uji pembebanan di laboratorium. Hal ini diakibatkan analisis dengan metode analisis statis, khususnya dengan metode alpha merupakan tinjauan kapasitas kuat dukung dengan pendekatan tegangan total, sehingga belum memperhatikan efek pemancangan berupa kenaikan tekanan air pori yang terjadi di sekitar tiang selama proses pemancangan seperti yang diamati selama pembacaan perubahan air pori pada Gambar 10.

Dihitung kapasitas dukung tiang dengan memperhatikan tekanan air pori seperti pada Gambar 10, didapatkan kapasitas dukung sebesar 0,63 kN. Kapasitas dukung tiang dengan memperhatikan kenaikan tekanan air pori berdasar hasil pembacaan masih jauh lebih besar, sekitar 2 kali lipat dibandingkan hasil uji pembebanan sesaat setelah pemancangan. Hal ini kemungkinan diakibatkan karena masih digunakan parameter koefisien kuat geser tiang (α) yang sama, sedangkan akibat pemancangan kemungkinan timbul gangguan dan proses remolding yang mengakibatkan penurunan kapasitas kuat geser tiang sesaat setelah pemancangan.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian parameter tanah pengujian, diketahui bahwa tanah merupakan tanah berbutir halus dengan kohesi tak terdrainase sebesar 41,48 kPa.

Hasil pembacaan *pressure transducer* menunjukkan berkembangnya tekanan air pori berlebih disekitar tanah pada saat proses pemancangan tiang. Tekanan air pori berlebih berkembang mengikuti penetrasi tiang dalam tanah dan relatif tidak mengalami perubahan signifikan setelah ujung tiang melewati batas tertentu.

Diketahui bahwa nilai kuat dukung tiang berdasarkan hasil uji pembebanan di laboratorium lebih kecil dibandingkan kuat dukung tiang dari hasil analisis statis menggunakan metode alpha. Hal ini diakibatkan karena tekanan air pori berlebih yang muncul saat proses pemancangan tiang pada tanah lempung jenuh.

Selain itu proses remolding dan gangguan akibat penetrasi tiang dapat mengakibatkan penurunan kuat geser tanah yang berakibat nilai kuat dukung tiang sesaat setelah pemancangan lebih kecil dibandingkan dengan kuat dukung tiang setelah waktu tertentu.

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM International, (2017). *Standard Test Methods for Amount of Material in Soils Finer Than the No. 200 (75-um) Sieve (ASTM D 1140)*, United States, ASTM International.
- ASTM International, (2019). *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass (ASTM D 2216)*, United States, ASTM International.
- ASTM International, (2017). *Standard Test Methods for Liquid Limit, Plastic Limit, and Plasticity Index of Soils (ASTM D 4318)*, United States, ASTM International.
- ASTM International, (2014). *Standard Test Methods for Specific Gravity of Soil Solids by Water Pycnometer (ASTM D 854)*, United States, ASTM International.
- ASTM International, (2015). *Standard Test Methods for Unconsolidated-Undrained Triaxial Compression Test on Cohesive Soils (ASTM D 2850)*, United States, ASTM International.
- Afshin, A, (2012). *Evaluation of Time-Dependent Pile Capacity Increase in Soft Clay*. Carleton University, Ottawa.
- Budhu, M, (2007). *Foundations and earth retaining structures*. John Wiley & Sons, Hoboken.
- De Mello, V. F. B., 1969. *Foundations of buildings on clay*. State-of-the-Art report. Proc. 7th ICSMFE, 49-136.
- Flaate, K. (1972). "Effects of Pile Driving in Clays". *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 9, No. 81.
- Hardiyatmo, H. C. (2010). *Analisis dan Perancangan Fondasi bagian II*. Gadjah Mada University Press, Yogyakarta.
- Lambe, T. W. dan Whitman, R. V. (1969). *Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, New York.
- Simonsen, T. R. dan Sorensen, K. K. (2016). *Field Measurements of Pore Water Pressure Changes in Very High Plasticity Stiff Clays Adjacent to Driven Piles*. Proceedings of the 17th Nordic Geotechnical Meeting, Reykjavik.
- Skempton, A.W. (1954). *The Pore-Pressure Coefficients A and B*. *Geotechnique*, 4: 4: 143.
- Tomlinson, M. dan Woodward, J. (2014). *Pile Design and Construction Practice Sixth Edition*. CRC Press, Boca Raton.