

Kajian Kapasitas Kelompok Tiang pada Tanah Lunak Menggunakan Skala Kecil Laboratorium

*Andry Galardo Naibaho, Aazokhi Waruwu
Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Medan
*)andrynaibaho10@gmail.com

Received: 25 Oktober 2020 Revised: 26 November 2021 Accepted: 29 November 2021

Abstract

Soft clay is one type of subgrade that is problematic in infrastructure development. Pile reinforcement is an alternative to stabilize and increase the bearing capacity of soft clay soils. This study is expected to determine the capacity of the pile group from observations through a small-scale laboratory model and its comparison with the results of the analysis. Reinforcement of the piles used are concrete piles and wooden piles. The research was conducted through model testing on single piles and group piles in soft clay soil. The piles have a length of 20 cm and a diameter of 2 cm with the number of 1, 2, 4, and 9 piles. The study results show that the overall bearing capacity of the observed results is not much different from the results of the analysis. The average bearing capacity of the wooden and concrete piles is 20% and 18% greater than the analysis. The increase in pile capacity for each additional number of piles from the observations is not as high as the analysis. There is a tendency for the soil in the pile group to move down together, so that the capacity value of the pile group on soft clay is smaller than the single pile capacity value multiplied by the number of piles in the pile group.

Keywords: *Soft soil, pile, bearing capacity, efficiency of the pile*

Abstrak

Tanah lempung lunak merupakan salah satu jenis tanah dasar yang bermasalah pada pembangunan infrastruktur. Perkuatan tiang merupakan alternatif untuk menstabilkan dan meningkatkan kapasitas dukung pada tanah lempung lunak. Penelitian ini diharapkan dapat mengetahui kapasitas kelompok tiang dari pengamatan melalui model skala kecil laboratorium dan perbandingannya dengan hasil analisis. Perkuatan tiang yang digunakan adalah tiang beton dan tiang kayu. Penelitian dilakukan melalui uji model pada tiang tunggal dan tiang kelompok pada tanah lempung lunak. Tiang memiliki panjang 20 cm dan diameter 2 cm dengan jumlah 1, 2, 4, dan 9 tiang. Hasil penelitian menunjukkan bahwa secara keseluruhan kapasitas dukung hasil pengamatan tidak berbeda jauh dengan hasil analisis. Kapasitas dukung rata-rata dari tiang kayu dan beton lebih besar 20% dan 18% daripada hasil analisis. Peningkatan kapasitas tiang setiap penambahan jumlah tiang dari hasil pengamatan tidak setinggi hasil analisis. Ada kecenderungan tanah pada kelompok tiang bergerak turun secara bersama-sama, sehingga nilai kapasitas kelompok tiang pada tanah lempung lunak lebih kecil dibandingkan nilai kapasitas tiang tunggal dikalikan jumlah tiang pada kelompok tiang.

Kata kunci: *Tanah lunak, tiang, kapasitas dukung, efisiensi tiang*

Pendahuluan

Indonesia merupakan salah satu negara berkembang dengan jumlah penduduk yang cukup banyak. Beberapa tahun terakhir pembangunan infrastruktur di Indonesia begitu pesat, sejalan dengan bertambahnya kebutuhan hidup dan teknologi. Peningkatan kebutuhan ini tidak dapat dihindari lagi, dimana lahan semakin sulit untuk dicari. Tanah

lunak seperti tanah lempung lunak merupakan salah satu alternatif untuk memenuhi kebutuhan lahan.

Namun, hal yang perlu diperhatikan ialah tanah lempung lunak merupakan tanah yang kurang baik untuk konstruksi bangunan sipil. Tanah lunak adalah tanah jika tidak dikenali dan diselidiki secara berhati-hati akan dapat menyebabkan masalah ketidakstabilan dan penurunan jangka panjang yang

tidak dapat ditolerir. Tanah tersebut mempunyai kuat geser rendah dan pemampatan tinggi.

Tanah lunak merupakan tanah kohesif yang terdiri dari tanah yang sebagian besar terdiri dari butir-butir yang sangat kecil seperti lempung dan lanau. Lapisan tanah lunak mempunyai sifat gaya geser yang rendah, pemampatan yang tinggi, koefisien permeabilitas yang rendah, dan mempunyai daya dukung yang rendah. Kuat geser yang rendah mengakibatkan terbatasnya beban yang dapat bekerja di atasnya, sedangkan pemampatan yang besar mengakibatkan terjadinya penurunan setelah pembangunan selesai.

Tanah lempung termasuk ke dalam jenis tanah kohesif yaitu tanah yang memiliki butiran halus. Jenis tanah ini mempunyai potensi kembang susut yang tinggi dan memiliki daya dukung yang jelek pada kondisi jenuh air (Zaro *et al.*, 2014). Tanah ini mengandung mineral mineral lempung dan memiliki kadar air yang tinggi yang menyebabkan kuat geser yang rendah. Klasifikasi lempung berdasarkan hubungan antar konsistensi dan kuat tekan bebas (q_u), seperti terlihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Konsistensi tanah lempung

Konsistensi	q_u (kg/cm ²)
Sangat Lunak	<0,25
Lunak	0,25-0,5
Sedang	0,5-1,0
Kaku	1,0-2,0
Sangat Kaku	2,0-4,0
Keras	>4,0

Sumber: Hardiyatmo, 2002

Lempung lunak merupakan kumpulan butiran partikel mineral yang berukuran kurang dari 0,002 mm atau lolos saringan no. 200, sebagian besar proses pembentukannya adalah melalui proses pembentukan alami yaitu dari pelapukan bebatuan. Secara laboratorium, tanah lempung lunak dapat diketahui dengan uji batas-batas *Atterberg*, dimana suatu tanah bisa dikatakan lempung lunak bila memiliki indeks plastisitas lebih dari 17. Batasan mengenai indeks plastisitas, sifat, macam tanah dan kohesinya diberikan oleh *Atterberg* terdapat dalam Tabel 2.

Menurut Alawiah & Yakin (2016), tanah lunak memiliki sifat gaya gesek kecil, pemampatan yang tinggi, dan daya dukung rendah. Tanah lunak yang mudah mampat dan tebal memerlukan pembebanan sebelum pembangunan permanennya dilaksanakan (Susanti, *et al.*, 2017). Cara ini disebut prapembebanan (*preloading*). Maksud dari prapembebanan ini adalah untuk meniadakan atau mereduksi 18 penurunan konsolidasi primer, yaitu

dengan membebani tanah lebih dulu sebelum pelaksanaan bangunan (Hardiyatmo, 2011).

Ada beberapa metode untuk perbaikan tanah seperti penggantian tanah, perkuatan untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan tanah, perbaikan tanah, *stone column*, tiang-tiang, dan pencampuran bahan kimia seperti semen dan kapur. Perbaikan tanah memainkan peran penting dalam rekayasa geoteknik karena satu-satunya cara untuk menstabilkan dan meningkatkan sifat-sifat tanah. Oleh karena itu, perlu dilakukan perbaikan tanah sebelum memulai pekerjaan konstruksi pada tanah lunak (Kazemian *et al.*, 2011).

Sebagian besar, perbaikan difokuskan pada modifikasi dan stabilisasi tanah. Ada beberapa cara perbaikan tanah seperti penggantian tanah, perkuatan untuk meningkatkan kekuatan dan kekakuan tanah, *preloading* dengan beban bertahap, penggunaan tiang-tiang, dan penggunaan bahan stabilisasi. Penggunaan tiang merupakan alternatif yang lebih tepat apabila lapisan tanah lunak cukup dalam.

Tabel 2. Klasifikasi berdasarkan plastisitas

PI	Sifat	Macam tanah	Kohesi
0	Non plastis	Pasir	Nonkohesif
<7	Plastisitas rendah	Lanau	Kohesif sebagian
7-17	Plastisitas rendah	Lempung berlanau	Kohesif
>17	Plastisitas tinggi	Lempung	Kohesif

Sumber: Hardiyatmo, 2002

Tiang diartikan sebagai bahan yang berfungsi untuk meneruskan beban ke lapisan yang lebih kokoh di bawah lapisan lunak. Tiang juga akan dapat meningkatkan stabilitas konstruksi. Bahan tiang dapat berupa beton dari campuran agregat halus, agregat kasar, semen, yang dipersatukan dengan air dalam perbandingan tertentu (Srihandayani, 2019). Hasil dari penelitian (Waruwu *et al.*, 2016), menunjukkan bahwa penggunaan tiang-tiang dengan pelat sebagai perkuatan pada tanah dapat mereduksi penurunan. Tiang yang dipasang dengan pelat dapat mereduksi penurunan dan mengurangi lendutan pelat, sehingga meningkatkan kemampuan tanah dalam menerima beban yang bekerja. Kinerja yang baik didapatkan pada tiang-tiang monolit dengan pelat. Tiang pancang yang monolit dengan pelat mengakibatkan tanah di antara tiang menjadi terkekang, sehingga gaya-gaya lateral semakin berkurang dan penurunan semakin kecil (Waruwu *et al.*, 2019).

Tiang-tiang di bawah pelat berkontribusi dalam menahan beban-beban, mereduksi penurunan, meningkatkan kekakuan pelat, dan menjaga stabilitas konstruksi di atasnya (Waruwu *et al.*, 2019). Kualitas tiang pancang beton didasarkan atas campuran material pembuatannya. Tiang beton terbuat dari campuran material beton seperti pasir, semen, air, tambahan bahan kimia serta struktur tulangan besi. Campuran dari bahan material tersebut menentukan kualitasnya, mulai dari kualitas kekuatan, ketahanan dan batas maksimal beban yang diijinkan.

Tiang beton adalah produk beton cetak yang memiliki berbagai jenis bentuk dan ukuran. Bentuk tiang pancang umumnya berbentuk persegi dan silinder. Ukuran persegi dan diameter ini disesuaikan kebutuhan di lapangan dan aplikasi pemasangannya. Tiang-tiang beton yang dipancang pada tanah sangat lunak memberikan kinerja yang baik dalam menahan beban, mereduksi penurunan, dan meningkatkan daya dukung tanah (Waruwu *et al.*, 2020).

Penentuan jenis fondasi yang digunakan dipengaruhi oleh faktor kepadatan tanah, kedalaman tanah keras, karakteristik tanah, dan beban yang bekerja di atas fondasi (Yusti & Fahriani, 2014). Selain tiang beton, dapat juga menggunakan tiang dari bahan kayu. Tanah lempung lunak dapat diperkuat dengan cerucuk dari bahan kayu. Penggunaan cerucuk bertujuan untuk meningkatkan daya dukung tanah, mengurangi penurunan, dan menghindari pergeseran (Suroso *et al.*, 2008).

Pemakaian tiang pancang kayu merupakan cara tertua dalam penggunaan tiang pancang sebagai fondasi. Tiang pancang kayu akan tahan lama dan tidak mudah busuk apabila selalu terendam terus menerus di bawah permukaan air tanah. Tiang kayu sangat cocok untuk daerah rawa dan daerah-daerah dimana selalu terendam air.

Penggunaan perkuatan cerucuk yang dipancang dalam tanah lunak dapat meningkatkan daya dukung. Berdasarkan uji pembebanan didapatkan bahwa kapasitas dukung tanah meningkat dengan peningkatan panjang dan diameter cerucuk (Suroso *et al.*, 2008).

Tiang merupakan perkuatan yang dipakai dalam menambah daya dukung tanah untuk memikul beban konstruksi yang akan dibangun di atas tanah. Daya dukung kelompok tiang tidak cukup hanya meninjau daya dukung satu tiang yang berdiri sendiri sebab daya dukung kelompok tiang (*pile group*) belum tentu sama dengan daya dukung satu tiang (*single pile*) dikalikan dengan jumlah tiang.

Kapasitas dukung tiang dipengaruhi oleh tingkat kepadatan tanah. Tiang yang dipancang sampai tanah keras memberikan perlawanan gaya normal tekan yang besar daripada tiang yang dipancang pada tanah lunak sampai sedang (Firmando *et al.*, 2021).

Kapasitas dukung fondasi untuk perencanaan fondasi dapat dianalisis menggunakan data pengujian tanah atau berdasarkan pengujian beban di lapangan (Sagita *et al.*, 2020). Sifat-sifat tanah dari uji laboratorium yang dapat digunakan untuk menghitung kapasitas tiang pancang di antaranya nilai kohesi, sudut gesek dalam tanah, dan berat isi tanah (Randyanto, 2015). Waruwu & Pardosi (2021) melakukan penelitian skala kecil melalui uji beban pada tiang bambu, kayu, dan tiang beton. Namun pada penelitian ini kapasitas dukung fondasi didapatkan berdasarkan uji beban pada pengamatan skala kecil di laboratorium dan dianalisis dengan menggunakan pendekatan statis dari hasil pengujian sifat-sifat teknis tanah. Kajian pada tiang tunggal dan kelompok tiang yang dipancang dalam tanah lunak perlu diuji dan diselidiki di laboratorium. Penelitian ini menggunakan perkuatan tiang beton dan tiang kayu, keduanya dibandingkan untuk dicaritahu sejauh mana perbedaan kapasitasnya dari hasil analisis.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui kapasitas kelompok tiang berdasarkan data pengamatan, hasil analisis kapasitas kelompok tiang menggunakan data sifat-sifat tanah, dan untuk mengetahui perbandingan efisiensi tiang dari hasil analisis dan pengamatan.

Kapasitas tiang tunggal

Kapasitas tiang (*pile capacity*) adalah kapasitas dukung tiang dalam mendukung beban. Kapasitas dukung merupakan tahanan geser tanah dalam melawan penurunan akibat pembebanan. Kapasitas tiang dapat dihitung dengan pendekatan statis atau dinamis (Hardiyatmo, 2011). Pendekatan statis berdasarkan sifat-sifat teknis tanah, sedangkan pendekatan dinamis berdasarkan data dari pemancangan tiang.

Kapasitas tiang dari hasil uji sifat-sifat tanah merupakan kapasitas ultimit tiang tunggal (Q_u). Kapasitas ultimit tiang tunggal didapatkan dari jumlah dari tahanan ujung bawah ultimit (Q_b) dan tahanan gesek ultimit (Q_s) (Sagita *et al.*, 2020). Tahanan ujung yang termobilisasi pada tiang pancang seharusnya setara dengan tahanan dari uji penetrasi seperti *Cone Penetration Test* (CPT), tetapi kecepatan pembebanan yang berbeda-beda dapat menyebabkan nilai tahanan ujung tiang menjadi berbeda (Basoka, 2020).

Q_u dapat dihitung dengan Persamaan 1, Q_s dihitung dengan Persamaan 4, dan Q_b dihitung dengan Persamaan 5. Nilai A_s dan A_b masing-masing luas selimut dan luas penampang tiang. Sedangkan nilai c_u dan c_b masing-masing nilai kohesi di sepanjang tiang dan di ujung tiang.

$$Q_u = (Q_b + Q_s) \quad (1)$$

Tahanan gesek dinding ultimit :

$$Q_s = A_s \times fs \quad (2)$$

$$fs = \alpha \times c_u \quad (3)$$

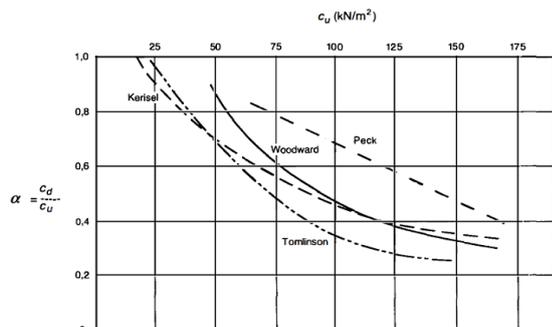
$$Q_s = A_s \times \alpha \times c_u \quad (4)$$

Tahanan ujung ultimit :

$$Q_b = A_b \times c_b \times N_c \quad (5)$$

$$Q_u = (A_b \times c_b \times N_c + A_s \times \alpha \times c_u) \quad (6)$$

Tahanan gesek tiang yang dipancang di dalam tanah lempung menggunakan faktor adhesi (α) yang didapat berdasarkan nilai kohesi undrained (c_u) dari hasil uji *unconfined compression strength* (Gambar 1). Kapasitas ujung tiang yang terletak pada tanah lempung menggunakan faktor kapasitas (N_c) dengan yang diambil 9 (Hardiyatmo, 2011).



Sumber: Hardiyatmo, 2011

Gambar 1. Faktor adhesi (α) untuk tiang pancang dalam lempung

Kapasitas kelompok tiang.

Kapasitas tiang tidak selalu sama dengan jumlah dari kapasitas tiang tunggal dalam satu kelompok, tetapi dipengaruhi oleh kapasitas dukung tanah dan penurunan di bawah kelompok tiang. Kapasitas kelompok tiang pada lapisan tanah lunak lebih rendah dari jumlah kapasitas masing-masing tiang tunggal (Hardiyatmo, 2011). Kapasitas dukung total tiang menjadi tereduksi akibat pengaruh dimensi, jarak, panjang, dan bentuk kelompok tiang. Pengaruh kelompok tiang diakomodir dengan faktor pengali terhadap kapasitas ultimit tiang tunggal dan sering disebut efisiensi tiang. Efisiensi tiang dalam tanah kohesif dapat dihitung dengan menggunakan formula Converse-Labarre seperti pada Persamaan 7.

$$E_g = 1 - \theta \frac{(n'-1)m + (m-1)n'}{90mn'} \quad (7)$$

$$\theta = \arctan d/s \quad (8)$$

Kapasitas ultimit kelompok tiang dengan memperhatikan faktor efisiensi tiang dapat dianalisis dengan menggunakan Persamaan 9.

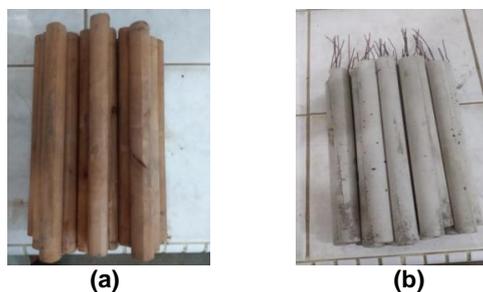
$$Q_g = E_{pg} \times n \times Q_u \quad (9)$$

$$E_{pg} = Q_g / (n \times Q_u) \quad (10)$$

Metode

Bahan yang digunakan pada penelitian ini terdiri dari tanah lempung lunak (*soft clay*) sebagai media penelitian, kayu dan beton sebagai bahan tiang, dan pelat besi sebagai beban. Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Mekanika Tanah Jurusan Teknik Sipil Institut Teknologi Medan. Tanah lempung lunak berasal dari Desa Pematang, Biara Kecamatan Pantai Labu, Kabupaten Deliserdang Provinsi Sumatera Utara. Tanah lunak dipadatkan setiap 10 cm sampai dengan tebal 50 cm dalam bak uji berukuran 110 cm x 90 cm x 90 cm. Tanah yang sudah dipadatkan dalam bak uji terlebih dahulu diuji dengan *unconfined compression strength* untuk menentukan nilai kuat geser *undrained* tanah.

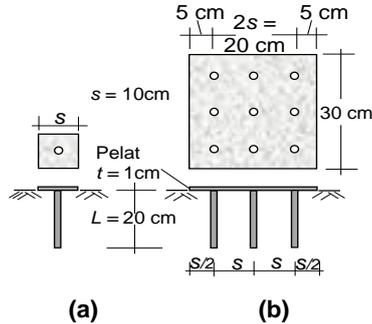
Bahan tiang yang digunakan adalah kayu dan beton, seperti terlihat pada Gambar 2. Kayu yang digunakan merupakan kayu laut yang diambil dari daerah Belawan Medan. Tiang beton dibuat dengan campuran satu semen: dua pasir dan dicampur dengan air. Panjang tiang beton yang digunakan yaitu 20 cm dengan diameter tiang 2 cm.



Gambar 2. Model tiang: (a) Tiang kayu; (b) Tiang beton

Skema pengujian yang direncanakan ditunjukkan pada Gambar 3. Tiang tunggal dan tiang kelompok yang terdiri dari 2 tiang, 4 tiang, dan 9 tiang. Tiang-tiang dipancang setiap jarak 10 cm dengan jumlah yang sesuai. Diameter dan jarak tiang mengikuti penelitian (Waruwu *et al.*, 2019). Uji beban pelat dilakukan pada tiang tunggal dan tiang kelompok. Beban yang diterapkan pada uji tiang tunggal sebesar 0,81 kg, 1,63 kg, 2,46 kg, 3,30 kg, 4,14 kg, 4,98 kg, 5,83 kg, 6,67 kg, 7,55 kg, 8,60 kg, dan

10,25 kg. Beban yang diterapkan pada kelompok tiang sebesar 13,2 kg, 26,56 kg, 34,79 kg, 42,20 kg, 48,92 kg, 54,12 kg, 59,31 kg, 64,48 kg, 67,87 kg, 71,26 kg, 78 kg, 82,94 kg, 88,12 kg, 94,72 kg, 100,67 kg, 106,12 kg, dan 108,65 kg.



Gambar 3. Skema uji: (a) Tiang tunggal; (b) Tiang kelompok

Beban diberikan secara bertahap sampai tercapai kapasitas tiang ultimit yang ditandai dengan penurunan yang signifikan. Setiap penambahan beban dilakukan pembacaan menggunakan dial gauge yang dipasang di atas pelat kepala tiang. Pengujian model tiang tunggal dan tiang kelompok dapat dilihat pada Gambar 4.



Gambar 4. Model uji tiang di laboratorium

Hasil dan Pembahasan

Hasil pengujian sifat-sifat tanah lempung lunak

Hasil pengujian sifat fisik tanah lempung lunak dilihat pada Tabel 3. Berdasarkan nilai indeks plastisitas, maka tanah ini merupakan tanah lempung dengan plastisitas tinggi, seperti klasifikasi yang diuraikan pada Tabel 2. Tanah di dalam bak uji, diuji dengan *unconfined compression strength* untuk mendapatkan nilai kuat geser *undrained* (c_u). Pengujian dilakukan setiap kedalaman 10 cm untuk mendapatkan perilaku kuat geser tanah dari permukaan sampai pada kedalaman 50 cm. Hasil uji yang didapat terlihat pada Tabel 4. Nilai c_u rata-rata adalah 0,103 kg/cm² atau dengan nilai $q_u = 0,206$ kg/cm². Berdasarkan Tabel 1, tanah

ini termasuk pada lempung dengan konsistensi lunak ke sangat lunak. Nilai-nilai c_u dari hasil uji ini dapat digunakan untuk menganalisis nilai kapasitas tiang dengan menggunakan persamaan-persamaan yang telah diuraikan sebelumnya.

Tabel 3. Sifat-sifat tanah lempung lunak

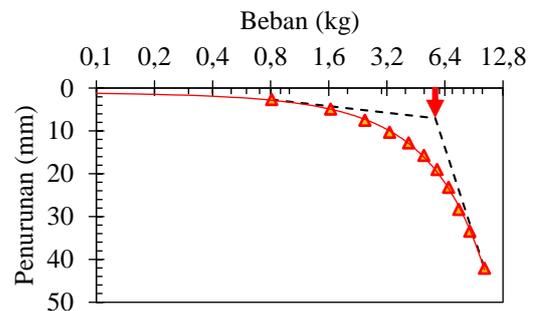
Pengujian	Satuan	Nilai
Kadar air (w)	%	73,7
Berat volume tanah (γ)	gr/cm ³	1,628
Berat jenis (G_s)	-	2,64
Batas cair (LL)	%	57,27
Batas plastis (PL)	%	36,07
Indeks plastisitas (PI)	%	21,2

Tabel 4. Uji *unconfined compression strength*

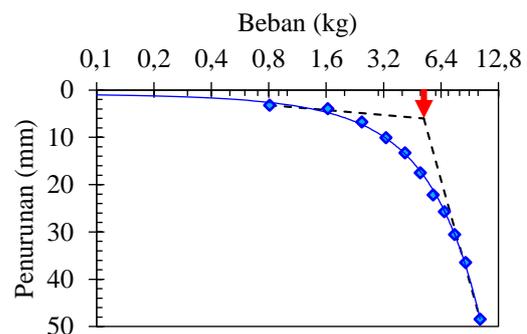
Kedalaman (cm)	c_u (kg/cm ²)
10	0,1222
20	0,1128
30	0,1063
40	0,0873
50	0,0873

Hasil uji beban pada tiang tanpa pelat

Hasil uji beban pada tiang tunggal kayu tanpa pelat ditunjukkan seperti pada Gambar 5 dan tiang beton tanpa pelat seperti pada Gambar 6. Kapasitas tiang tunggal dari bahan kayu sebesar 5,7 kg dan untuk bahan beton 5,2 kg. Kapasitas tiang kayu tidak berbeda jauh dibandingkan dengan tiang beton.



Gambar 5. Hasil uji tiang kayu tanpa pelat



Gambar 6. Hasil uji tiang beton tanpa pelat

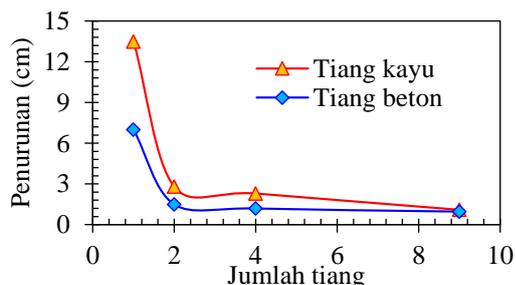
Hasil uji beban pada tiang dengan pelat

Uji beban pada tiang dibedakan berdasarkan jumlah tiang. Ukuran pelat menyesuaikan dengan jumlah tiang, untuk satu tiang menggunakan pelat berukuran 10 cm x 10 cm, untuk dua tiang menggunakan pelat berukuran 20 cm x 10 cm, untuk empat tiang menggunakan pelat berukuran 20 cm x 20 cm, dan untuk sembilan tiang menggunakan pelat berukuran 30 cm x 30 cm.

Penurunan tiang yang terjadi akibat beban-beban yang bekerja pada tiang ditunjukkan pada Tabel 5. Penurunan tiang didapatkan semakin kecil pada tiang dengan jumlah lebih banyak. Ini terjadi pada level beban maksimum yang dapat dipikul oleh setiap model tiang. Perilaku pola penurunan akibat beban yang bekerja untuk masing-masing kelompok tiang ditunjukkan pada Gambar 7.

Tabel 5. Penurunan tiang berdasarkan pengamatan

Jumlah tiang	Tiang kayu		Tiang beton	
	Beban (kg)	Penurunan (mm)	Beban (kg)	Penurunan (mm)
1	51	13,5	35	7
2	54	2,8	64	1,5
4	58	2,3	67	1,2
9	100	1,1	91	0,97



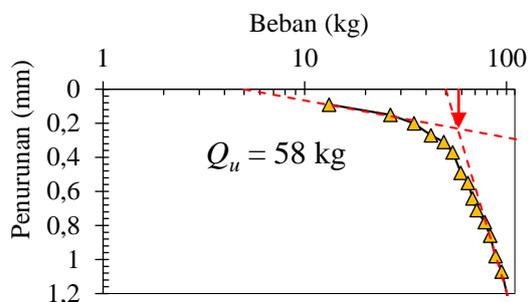
Gambar 7. Hubungan jumlah tiang dan penurunan

Penurunan yang terjadi pada satu tiang dengan pelat terlihat jauh lebih besar daripada kelompok tiang lainnya. Penurunan pada kelompok dua tiang, empat tiang, dan sembilan tiang terlihat tidak jauh berbeda satu dengan yang lainnya. Berdasarkan penelitian ini didapatkan bahwa penurunan pada tiang beton tidak jauh berbeda dengan penurunan tiang kayu, bahkan pada sembilan tiang terlihat penurunannya hampir sama. Kedua jenis tiang memperlihatkan penurunan kelompok tiang yang hampir sama pada jumlah tiang yang berbeda.

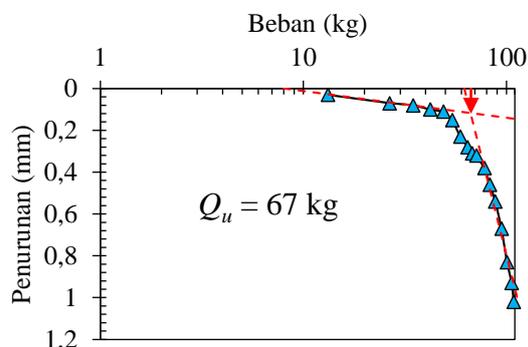
Kapasitas tiang berdasarkan pengamatan

Kapasitas tiang didapatkan dari hasil uji beban-beban pada setiap kelompok tiang. Beberapa hasil

uji beban pada empat tiang kayu dan tiang beton ditunjukkan pada Gambar 8 dan Gambar 9. Kapasitas tiang diperoleh dari perpotongan dua garis linier dari hasil hubungan beban (P) dengan penurunan (S) (Pham, *et al.*, 2020). Kapasitas dukung tiang kayu diperoleh sebesar 58 kg dan tiang beton sebesar 67 kg. Cara yang sama dilakukan pada hasil-hasil uji kelompok tiang lainnya, baik untuk tiang kayu maupun untuk tiang beton.



Gambar 8. Penentuan kapasitas tiang kayu



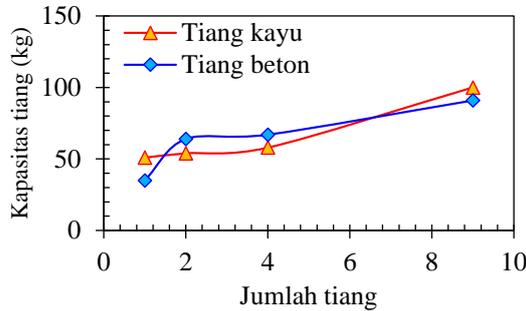
Gambar 9. Penentuan kapasitas tiang beton

Hubungan kapasitas tiang dari hasil pengamatan dengan jumlah tiang ditunjukkan pada Gambar 10. Hasil uji menunjukkan bahwa semakin banyak tiang, maka kapasitas dukung kelompok tiang semakin tinggi. Ada kecenderungan bahwa kapasitas dukung tiang kayu dan tiang beton secara keseluruhan tidak jauh berbeda.

Kapasitas tiang berdasarkan hasil analisis

Kapasitas tiang dapat dihitung berdasarkan nilai kuat geser *undrained* (c_u) dari hasil uji *unconfined compression strength* dengan menggunakan Persamaan 1 sampai 6. Kapasitas dukung tiang tunggal diperoleh sebesar 15,77 kg. Kapasitas ultimit kelompok tiang dapat dihitung menggunakan Persamaan) pada masing-masing jumlah kelompok tiang. Nilai efisiensi tiang menggunakan Persamaan 7. Efisiensi kelompok tiang berdasarkan analisis dapat dilihat pada Tabel 6. Nilai kapasitas dukung tiang kelompok hasil pengamatan dan analisis ditunjukkan Tabel 7.

Secara keseluruhan didapatkan bahwa hasil pengamatan mendekati sama dengan hasil analisis. Perbedaan hasil pengamatan pada tiang kayu didapatkan 20% lebih tinggi daripada hasil analisis dan tiang beton 18% lebih tinggi daripada hasil analisis.



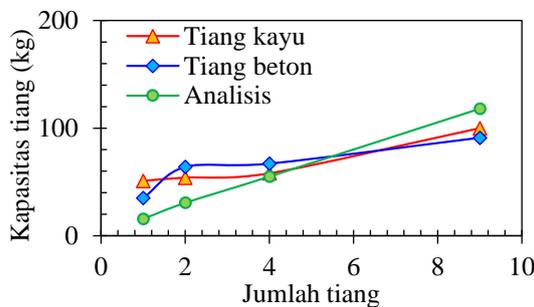
Gambar 10. Hubungan jumlah tiang dan kapasitas tiang

Tabel 6. Efisiensi Kelompok Tiang

Jumlah tiang	Efisiensi tiang
1	1
2	0,9372
4	0,874
9	0,8325
Rata-rata	0,9109

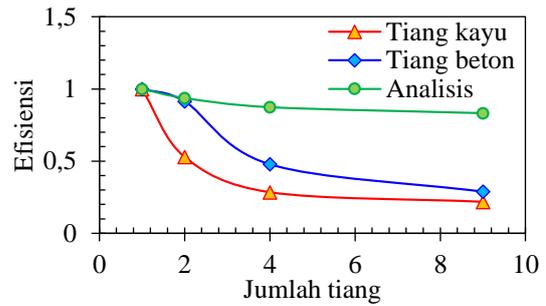
Tabel 7. Kapasitas tiang berdasarkan pengamatan dan analisis

Jumlah Tiang	Kapasitas Tiang (Q_u) kg		
	Kayu	Beton	Analisis
1	51	35	15,77
2	54	64	29,56
4	58	67	55,13
9	100	91	118,16
Rata-rata/ tiang	16,44	16,06	13,66



Gambar 11. Perbandingan kapasitas tiang

Perbedaan nilai kapasitas dukung hasil pengamatan dengan analisis dapat disebabkan dari nilai efisiensi yang digunakan pada analisis. Efisiensi tiang pada data pengamatan dapat dihitung dengan membagi kapasitas kelompok dengan perkalian jumlah tiang dengan kapasitas 1 tiang, seperti Persamaan (9). Perbandingan efisiensi hasil pengamatan dengan analisis dapat dilihat pada Gambar 12.



Gambar 12. Perbandingan efisiensi tiang

Berdasarkan efisiensi tiang dipengaruhi oleh jumlah, Panjang, susunan, dan jarak tiang seperti yang diuraikan dalam Persamaan (7). Namun hasil penelitian ini menunjukkan bahwa efisiensi tiang hasil pengamatan lebih kecil daripada efisiensi tiang hasil analisis. Faktor lain yang dapat mempengaruhi nilai efisiensi tiang dapat disebabkan oleh jenis tiang maupun jenis tanah. Tiang kayu menunjukkan nilai efisiensi tiang yang lebih kecil daripada tiang beton.

Analisis efisiensi tiang perlu mempertimbangkan faktor jenis tanah. Penelitian ini dilakukan pada jenis tanah lunak, hal ini bisa menjadi faktor yang mempengaruhi nilai efisiensi yang jauh lebih kecil dibandingkan hasil analisis. Kapasitas kelompok tiang pada tanah lempung lunak sering lebih kecil daripada hasil kali perkalian kapasitas dukung tiang tunggal dikalikan jumlah tiang dalam satu kelompok (Hardiyatmo, 2011). Mekanisme keruntuhan berubah bentuk dari keruntuhan tiang tunggal menjadi keruntuhan blok satu kelompok, dimana tanah di antara tiang dan tiang bergerak turun secara bersama-sama.

Kesimpulan

Berdasarkan hasil pengamatan didapatkan bahwa kapasitas dukung tiang kelompok menggunakan tiang kayu tidak jauh beda dengan tiang beton. Semakin banyak tiang, maka kapasitas dukung kelompok tiang semakin tinggi. Namun kapasitas kelompok tiang pada tanah lunak jauh lebih kecil dibandingkan dengan jumlah kapasitas tiang tunggal dalam satu kelompok tiang. Ada kecenderungan tanah antar tiang dengan tiang bergerak turun bersama-sama, sehingga kapasitas kelompoknya tidak sebanding dengan jumlah kapasitas tiang tunggal. Kapasitas kelompok tiang relatif meningkat secara linier seiring dengan peningkatan jumlah tiang, berbeda dengan hasil pengamatan yang menghasilkan peningkatan kapasitas kelompok tiang yang tidak setinggi seperti hasil analisis. Faktor jenis tanah lunak dapat menjadi penyebab utama perbedaan ini. Namun secara keseluruhan hasil pengamatan tidak berbeda jauh dengan hasil analisis. Perbedaan hasil

pengamatan pada tiang kayu dan tiang beton masing-masing didapatkan 20% dan 18% lebih tinggi daripada hasil analisis. Efisiensi tiang hasil pengamatan lebih kecil daripada efisiensi tiang hasil analisis. Kapasitas kelompok tiang pada tanah lempung lunak jauh lebih kecil dibandingkan hasil analisis, karena keruntuhan tiang dengan tanah pada tanah lunak membentuk keruntuhan blok satu kelompok tiang. Perlu penelitian lanjutan pada jenis tanah yang berbeda, diameter tiang yang berbeda, dan jarak antar tiang untuk melihat pengaruhnya terhadap efisiensi tiang.

Ucapan Terimakasih

Terimakasih kepada Laboratorium Mekanika Tanah, Jurusan Teknik Sipil Fakultas Teknik Sipil dan Perancangan Institut Teknologi Medan sebagai tempat pelaksanaan penelitian serta semua pihak atas dukungan dan partisipasinya selama penelitian.

Daftar Pustaka

Alawiah, W. A., & Yakin, Y. A. (2016). Analisis daya dukung tiang tunggal statik pada tanah lumpur di Gebebage. *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, 2(3), 135-146.

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(1), 109-123.

Firmando, A., Wijaya, H., & Yuwono, A. (2021). Analisis Riwayat Waktu Gempa Sesar pada Sistem Pondasi Tiang. *Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 4(1), 205-220.

Hardiyatmo, H. C. (2002). *Mekanika Tanah I*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.

Hardiyatmo, H. C. (2011). *Analisis dan Perancangan Fondasi II*. Yogyakarta: Gajah Mada University Press.

Kazemian, Huat, B. B., Prasad, A., & Barghchi, M. (2011). A state of art review of peat: Geotechnical Engineering Perspective. Vol. 6(8), 1974-1981.

Pham, T. A., Ly, H. B., Tran, V. Q., Giap, L. V., Vu, H. L. T., & Duong, H. A. T. (2020). Prediction of pile axial bearing capacity using artificial neural network and random forest. *Applied Sciences*, 10(5), 1-21.

Randyanto, E. S. (2015). Analisis Daya dukung tiang pancang dengan menggunakan metode statik dan calendering. *Jurnal Sipil Statik*, 3(9), 631-643.

Sagita, M. A., Fahriani, F., & Aprianti, Y. (2020). *Analisis Perbandingan Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Menggunakan Hasil Uji SPT dan Uji Beban Dinamis pada Proyek Penggantian Jembatan Baturusa*. Pangkalpinang, Prosiding Seminar Penelitian dan Pengabdian pada Masyarakat.

Srihandayani, S. (2019). Pengaruh daya dukung pondasi tiang beton bertulang terhadap tanah gambut. *Siklus: Jurnal Teknik Sipil*, 5(1), 31-38.

Suroso, Harimurti, & Harsono, M. (2008). Alternatif perkuatan tanah lempung lunak menggunakan cerucuk dengan variasi panjang dan diameter cerucuk. *Jurnal Rekayasa Sipil*, 2(1), 47-61.

Susanti, R. D., Maulana, & Waruwu, A. (2017). Bearing capacity improvement of peat soil by preloading. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12(1), 121-124.

Waruwu, A., Hardiyatmo, H. C., & Rifa'i, A. (2019). The performance of the nailed slab system-supported embankment on peat soil. *International Review of Civil Engineering (I.R.E.C.E.)*, 10(5), 243-248.

Waruwu, A., Hardiyatmo, H. C., & Rifa'i, A. (2016). *Studi eksperimental pembebanan pelat yang diperkuat tiang pada tanah gambut*. Seminar Nasional Geoteknik 2016 HATTI, 55-59, Yogyakarta.

Waruwu, A., Hardiyatmo, H. C., & Rifa'i, A. (2019). Uji beban timbunan yang diperkuat dengan sistem pelat terpaku pada tanah gambut. *Media Komunikasi Teknik Sipil*, 25(2), 152-159.

Waruwu, A., & Pardosi, S. Y. (2021). Pengaruh tiang terhadap kapasitas dukung pelat dan modulus reaksi tanah-dasar pada tanah gambut. *Jurnal Saintis*, 21(2), 79-86.

Waruwu, A., Susanti, R. D., Endriani, D., & Hutagaol, S. (2020). Effect of Loading Stage on Peat Compression and Deflection of Bamboo Grid with Concrete Pile. *International Journal of GEOMATE*, 18(66), 150-155.

Yusti, A., & Fahriani, F. (2014). Analisis daya dukung pondasi tiang pancang diverifikasi dengan hasil uji pile driving analyzer test dan capwap. *Jurnal Fropil*, 2(1), 19-31.

Zaro, K., Nugroho, S. A., & Fatnanta, F. (2014). *Pengaruh Kadar Lempung dengan Kadar Air Diatas OMC terhadap Nilai CBR Dengan Dan Tanpa Rendaman pada Tanah Lempung Organik*, Riau: Phd Thesis Riau University.