

ANALISIS KAPASITAS DUKUNG TIANG TUNGGAL BERDASARKAN DATA KALENDERING

Aazokhi Waruwu¹ dan Jhonson Frenky Leonardo Sirait²

¹Jurusan Teknik Sipil, Institut Teknologi Medan, Jl. Gedung Arca No.52 Medan
azokhiw@gmail.com

²Program Sarjana Teknik Sipil, Institut Teknologi Medan, Jl. Gedung Arca No.52 Medan
jhonsonsirait06@gmail.com

Masuk: 08-07-2021, revisi: 17-11-2021, diterima untuk diterbitkan: 17-01-2022

ABSTRACT

Pile foundations are used to support buildings, when the hard soil layer is very deep. Pile capacity needs to be analyzed with calendaring data in the form of field piling data. This study aims to obtain the bearing capacity of the pile, its relationship to penetration, and a comparison between the methods used. This research was conducted by analyzing the calendaring data at two locations of piling points. Loose and medium soil conditions along the pile and solid soil at the ends of the pile. Based on the method of Hilley, Sanders, and Navy-Mckay was conducted an analysis of the pile capacity and its relationship with penetration. These methods are used because of the principle of the energy equation between the pile and the hammer. The results of the analysis show that the pile capacity of the Hilley is close to the same as that of the Navy-Mckay. The Sanders method shows a significant difference and is 80% higher than the Hilley method, while the Navy-Mckay method has a 20% higher difference than the Hilley method. The value of the pile capacity can be used as a consideration for evaluating the design of the pile foundation in the field.

Keywords: Pile foundation; pile capacity; calendaring; penetration of pile

ABSTRAK

Fondasi tiang digunakan untuk mendukung bangunan, bila lapisan tanah kuat terletak sangat dalam. Kapasitas dukung tiang perlu dianalisis menggunakan data kalendering berupa data pemancangan di lapangan. Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan kapasitas dukung tiang, hubungannya dengan penetrasi, dan perbandingan antar metode yang digunakan. Penelitian ini dilakukan dengan menganalisis data-data kelendering pada dua lokasi titik pemancangan. Kondisi tanah lepas dan sedang di sepanjang tiang dan tanah padat di ujung tiang. Berdasarkan metode Hilley, Sanders, dan Navy-Mckay dilakukan analisis kapasitas dukung tiang dan hubungannya dengan penetrasi. Metode-metode ini digunakan karena prinsip persamaan energi antara tiang dan *hammer*. Hasil analisis menunjukkan bahwa kapasitas dukung tiang Hilley mendekati sama dengan Navy-Mckay. Metode Sanders menunjukkan perbedaan yang cukup jauh dan lebih tinggi 80% dari metode Hilley, sedangkan metode Navy-Mckay memiliki perbedaan 20% lebih tinggi dari metode Hilley. Nilai kapasitas ijin tiang ini dapat digunakan sebagai pertimbangan evaluasi perancangan fondasi tiang di lapangan.

Kata kunci: fondasi tiang; kapasitas tiang; kalendering; penetrasi tiang

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur seperti jalan tol sangat membutuhkan suatu konstruksi yang kokoh dengan fondasi yang kuat. Salah satu infrastruktur jalan tol adalah jembatan *underpass* yang bertujuan memperbaiki elevasi permukaan jalan, sehingga didapatkan permukaan jalan yang rata untuk memberikan rasa nyaman dan aman bagi pengendara. Jembatan *underpass* membutuhkan fondasi yang kuat dan kokoh untuk memikul seluruh beban konstruksi dan meneruskannya ke lapisan tanah keras. Gaya-gaya normal dari tiang pada lapisan tanah keras lebih besar dibandingkan pada tanah lunak ke tanah sedang (Firmando, Wijaya, & Yuwono, 2021).

Fondasi yang kokoh dan kuat sampai ke lapisan tanah keras didapatkan pada jenis fondasi tiang pancang. Pemilihan fondasi dari tiang pancang dilakukan dalam mendukung konstruksi, ketika lapisan tanah keras terletak sangat dalam (Hardiyatmo, 2015). Fondasi tiang pancang berfungsi untuk mendistribusikan beban-beban yang berada di atasnya ke lapisan tanah yang lebih dalam (Pratama, Lukman, & Rahmah, 2016).

Fondasi tiang pancang merupakan jenis fondasi dalam yang berguna untuk mendukung beban konstruksi dan meneruskannya ke lapisan tanah kuat yang terletak sangat dalam. Fondasi tiang juga berguna untuk menahan gaya angkat ke atas, terutama pada bangunan-bangunan tingkat tinggi yang dipengaruhi oleh gaya-gaya penggulingan akibat beban-beban horizontal seperti beban angin dan beban gempa. Selain itu, fondasi tiang juga berguna untuk mendukung bangunan dermaga yang dipengaruhi oleh gaya-gaya akibat benturan kapal dan gelombang air laut. Jenis bahan fondasi tiang pancang dapat berupa tiang pancang kayu, beton pracetak, profil baja, atau dari bahan komposit (Hardiyatmo, 2015).

Kapasitas dukung tiang pancang dapat dianalisis berdasarkan data lapangan seperti SPT dan CPT. Menurut (Basoka, 2020), kapasitas dukung tiang berdasarkan data *Cone Penetration Test* (CPT) lebih tinggi daripada data *Standard Penetration Test* (SPT) dengan perbedaan sekitar 10,4-16,3%.

Kapasitas dukung berdasarkan data SPT memberikan hasil yang lebih baik, karena kapasitas dukung tiang dari data SPT paling mendekati dengan hasil berdasarkan data PDA (Yusti & Fahriani, 2014). Rasio perbandingan kapasitas dukung fondasi berdasarkan data SPT dengan data uji Kalendering dan uji Pile Driving Analyzer (PDA) didapatkan antara 1,55-1,64 (Sagita, Fahriani, & Aprianti, 2020).

Kapasitas tiang pancang dapat dihitung menggunakan data kalendering yang diambil dari pada saat pelaksanaan pemancangan. Pengambilan data kalendering dilakukan pada saat tiang mencapai tanah keras, besarnya penetrasi dan *rebound* diambil untuk 10 kali pukulan (Lukman, 2017).

Analisis dilakukan dengan beberapa persamaan dari rumus dinamik, karena beberapa persamaan ini memiliki keakuratan dalam menganalisis kapasitas tiang pancang tunggal dengan data kalendering. Adapun persamaan-persamaan yang akan digunakan yaitu metode persamaan *Hiley*, persamaan *Sanders*, dan persamaan *Navy-Mckay*. Menurut SNI 8460 (2017), ketepatan analisis kapasitas dukung berdasarkan formula dinamik sangat tergantung dari formula dan data pemancangan. Persamaan *Hiley* dan turunannya memberikan rentang kapasitas dukung yang sangat bervariasi.

Analisis kapasitas dukung ultimit tiang menggunakan rumus dinamik didasarkan pada rumus tiang pancang dinamik. Hasil analisis ini hanya berlaku pada kapasitas tiang tunggal, karena tidak mempertimbangkan perilaku tanah di bawah dasar kelompok tiang, reduksi tahanan gesek sisi tiang sebagai akibat pengaruh kelompok tiang, dan perubahan struktur tanah akibat pemancangan (Sulha, Sarita, Fitriah, & Sukri, 2019).

Rumus dinamik didasarkan pada hubungan kapasitas dukung tiang pancang dengan energi pemancangan tiang, dengan anggapan bahwa perlawanan tanah pada saat pemancangan memiliki nilai sama dengan kapasitas tiang saat memikul beban statis (Tampubolon & Yakin, 2017).

Secara umum data kalendering diambil pada saat pemancangan tiang pancang dan digunakan untuk analisis kapasitas dukung secara empiris dari proses pemukulan tiang dengan alat pancang. Pengambilan data kalendering dari alat pancang dilakukan pada saat tiang mencapai lapisan tanah keras dengan penetrasi dan *rebound* diambil untuk 10 kali pukulan (Lukman, 2017).

Analisis kapasitas dukung tiang pancang dapat menggunakan data yang sama, namun dengan metode yang berbeda-beda. Perbedaan kapasitas dukung dari metode yang satu dengan yang lain diharapkan masih dalam batas-batas toleransi. Kajian mendalam diperlukan dalam menentukan hasil analisis yang mendekati satu sama lainnya, supaya dapat dijadikan acuan dalam perancangan fondasi tiang pancang. Oleh karena itu, perlu dan penting untuk menganalisis kapasitas dukung tiang tunggal menggunakan beberapa metode dan hubungan kapasitas tiang pancang dengan penetrasi tiang berdasarkan data kalendering. Data kalendering diperuntukkan sebagai kontrol pada saat pemancangan di lapangan (Randyanto, 2015).

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah peningkatan pelayanan transportasi yang aman dan nyaman membutuhkan suatu bangunan yang kokoh dengan fondasi yang kuat. Pembangunan jalan tol merupakan salah satu prasarana transportasi untuk menunjang sarana transportasi yang dalam kondisi tertentu memerlukan perencanaan jembatan dengan konstruksi pondasi yang kokoh. Kondisi tanah dan kedalaman tanah keras menjadi pertimbangan dalam perencanaan fondasi dalam.

Perencanaan fondasi perlu pengetahuan kapasitas tiang sebagai dasar pertimbangan seberapa banyak tiang yang mampu memikul beban konstruksi di atasnya. Kapasitas tiang dapat diketahui apabila data-data yang memadai untuk mendapatkan nilai kapasitas tiang tunggal. Analisis kapasitas tiang pancang perlu perbandingan dari berbagai metode yang ada untuk memberikan hasil yang optimal. Penilaian dari hasil analisis dari berbagai metode yang digunakan perlu dilihat kesamaan dan perbedaan hasil yang didapatkan dan banyak parameter yang perlu diperhatikan untuk mendapatkan perencanaan tiang pancang yang teliti dan valid.

Tulisan makalah ini dilakukan dengan menganalisis data kalendering untuk menentukan kapasitas dukung tiang tunggal. Metode yang digunakan adalah metode Hilley, Sanders, dan Navy-Mckay. Alat pemancangan yang digunakan pemukul aksi double, hal ini berpengaruh pada penentuan faktor efisiensi alat pada formula dinamik tiang.

Kondisi tanah berdasarkan data SPT (Standar Penetration Test) didapatkan bahwa tanah pada kedalaman 0-4 m terdiri dari tanah sangat lepas dengan nilai SPT < 4, kedalaman 4-10 m terdiri dari tanah lepas dengan nilai SPT antara 4-10, kedalaman 10-23 m terdiri dari tanah sedang dengan nilai SPT antara 10-30, kedalaman 23-30 m terdiri dari tanah pada dengan nilai SPT antara 30-50, dan kedalaman > 30 m terdiri dari tanah sedang dengan nilai SPT < 30. Profil tanah dan kondisi lapisan tanah pada lokasi pemancangan tiang terlihat tidak seragam berdasarkan data SPT.

Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui kapasitas dukung tiang tunggal berdasarkan data kalendering, mengetahui hubungan kapasitas ijin rata-rata dengan penetrasi tiang, dan untuk mengetahui perbandingan hasil analisis kapasitas ijin tiang dari beberapa metode yang digunakan. Nilai kapasitas ijin tiang berdasarkan metode Hilley, Sanders, dan Navy-Mckay yang diperoleh dari data kalendering dapat digunakan sebagai pertimbangan evaluasi perancangan fondasi tiang di lapangan.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dimulai dengan melakukan peninjauan ke lapangan untuk menentukan dan memilih lokasi data pemancangan tiang yang akan digunakan dalam analisis kapasitas dukung tiang. Lokasi observasi lapangan adalah pada Pembangunan *Underpass* Jalan Inspeksi dan Gas Sta. 2+541 Binjai-Stabat, Provinsi Sumatera Utara.

Data-data yang diperlukan adalah data gambar tiang pancang, baik dimensi maupun jumlah titik pengujian. Selain itu, data kalendering pada setiap titik uji tiang dikumpulkan untuk dianalisis.

Berdasarkan pengujian beban tiang pancang maupun tiang bor yang berdiameter kecil sampai sedang sekitar 60 cm, penurunan akibat beban kerja lebih kecil dari 1 cm, maka faktor aman disarankan lebih kecil dari 2,5 (Hardiyatmo, 2015). Besarnya kapasitas dukung ijin tiang dengan mempertimbangkan keamanan terhadap potensi keruntuhan adalah nilai kapasitas ultimit tiang dibagi faktor aman (F), seperti pada Persamaan (1) (Yusti & Fahrani, 2014). Kapasitas dukung tiang pancang yang dianalisis berupa kapasitas ultimit, kapasitas ijin tiang diperoleh dari kapasitas ultimit tiang dibagi dengan faktor aman tertentu. Faktor aman berfungsi untuk memberikan keamanan terhadap ketidakpastian dari nilai kuat geser, pemampatan lapisan tanah, penurunan tidak seragam, bahan tiang cukup aman dalam mendukung beban yang bekerja, dan mengantisipasi adanya ketidakpastian metode hitungan yang digunakan. Penghentian pemukulan saat pekerjaan pemancangan, untuk mencegah pecahnya kepala tiang akibat jumlah pukulan terlalu banyak dapat dilihat dalam Tabel 1.

$$Q_a = \frac{Q_u}{F} \quad (1)$$

dengan Q_a = kapasitas ijin tiang, Q_u = kapasitas ultimit tiang, dan F = faktor aman.

Tabel 1. Penghentian pemancangan

Bahan Tiang	Pemukulan dihentikan bila penetrasi tiang mencapai:
Kayu	4 - 5 pukulan/25 mm
Beton bertulang	6 - 8 pukulan/25 mm
Baja	12 - 15 pukulan/25 mm

(Sumber: Hardiyatmo, 2015)

Persamaan Hiley diberikan faktor $\frac{1}{2}$ untuk k (untuk energi regangan), untuk pemukul aksi double atau diferensial, seperti pada Persamaan 2.

$$Q_u = \frac{e_h E_h}{s + \frac{1}{2}(k_1 + k_2 + k_3)} \frac{W_r + n^2 W_p}{W_r + W_p} \quad (\text{faktor aman, } F = 4) \quad (2)$$

dengan Q_u = kapasitas ultimit tiang, e_h = efisiensi pemukul, E_h = besar energi pemukul, W_r = berat ram, W_p = berat keseluruhan tiang, n = koefisien restitusi, s = penetrasi per pukulan, k = rebound, k_1 = kompresi elastis blok penutup (*capblok*) dan *pile cap*, k_2 = kompresi elastis tiang, dan k_3 = kompresi elastis tanah.

Nilai E_h didasarkan pada berat ekivalen W dan tinggi jatuh ram, yaitu:

$$E_h = W h = (W_r + \text{berat casing}) \times h \tag{3}$$

dengan W_r = berat ram dan h = tinggi jatuh pemukul.

Nilai-nilai k_1 yang digunakan dapat dilihat dalam Tabel 2, k_2 dihitung sama dengan $Q_u/L/AE$, nilai k_3 dapat diambil: $k_3 = 0$ untuk tanah keras (batu, pasir sangat padat dan kerikil, 0,1 sampai 0,2 (2,5 mm sampai 5 mm) untuk tanah-tanah yang lain.

Nilai efisiensi pemukul (e_h) bergantung pada kondisi pemukul dan blok penutup (*capblock*) dan kondisi tanah (khususnya untuk pemukul tenaga uap). Jika belum ada data yang tepat, nilai-nilai e_h dapat dilihat dalam Tabel 3.

Rumus dinamik untuk rumus *Sanders* didasarkan juga pada hubungan energi yang masuk = energi digunakan + energi hilang. Energi yang digunakan sama dengan tahanan tiang waktu pemancangan (*driving resistance*) dikalikan dengan perpindahan tiang. Jika energi yang masuk (*energi input*) telah diketahui, dapat diestimasi besarnya energi yang hilang.

$$Q_u = \frac{W_r h}{s+C} \text{ (faktor aman, } F=8) \tag{4}$$

dengan Q_u = kapasitas ultimit tiang, W_r = berat ram, h = tinggi jatuh pemukul, s = penetrasi tiang dan C = konstanta empiris untuk energi hilang sewaktu pemancangan.

Nilai C umumnya diambil 0,1 in (0,25 cm) untuk pemukul dengan mesin tenaga uap dan 1 in (2,5 cm) untuk pemukul yang dijatuhkan.

Tabel 2. Nilai-nilai k_1

Jenis tiang	Nilai-nilai k_1 (mm), untuk tegangan akibat pukulan pemancangan di kepala tiang			
	3,5 MPa	7,0 MPa	10,5 MPa	14 MPa
Tiang baja atau pipa langsung pada kepala tiang	0	0	0	0
Tiang kayu langsung pada kepala tiang	1,3	2,5	3,8	5
Tiang beton pracetak dengan 75 - 100 mm bantalan di dalam cap	3	6	9	12,5
Baja tertutup cap yang berisi bantalan kayu untuk tiang baja H atau tiang pipa	1	2	3	4
Piringan fiber 5 mm diantara dua pelat baja 10 mm	0,5	1	1,5	2

(Sumber: Hardiyatmo, 2015)

Tabel 3. Nilai efisiensi pemukul

Nilai efisiensi e_h	
Tipe	Efisiensi
Pemukul Jatuh (<i>drop Hammer</i>)	0,75 -1
Pemukul Aksi Tunggal	0,75-0,85
Pemukul Aksi Dobel	0,85
Pemukul Diesel	0,85-1

(Sumber: Hardiyatmo, 2015)

Nilai-nilai koefisien restitusi n bergantung pada tipe dan kondisi dilihat dalam Tabel 4.

Tabel 4. Nilai koefisien restitusi (n)

Koefisien Restitusi (n)	
Material	n
<i>Broomed wood</i>	0
Tiang kayu (ujung tidak rusak)	0,25
Bantalan kayu padat pada tiang baja	0,32
Bantalan kayu padat di atas tiang baja	0,40
Landasan baja pada baja , pada tiang baja atau beton	0,50
Pemukul besi cor pada tiang beton tanpa penutup (<i>cap</i>)	0,40

(Sumber: Hardiyatmo, 2015)

Berdasarkan metode Navy-Mckay, kapasitas tiang dapat dihitung dengan hasil uji kalendering sebagai berikut:

$$Q_u = \frac{e_n E_h}{s \left(1 + 0,3 \frac{W_p}{W_r} \right)} \quad (\text{faktor aman, } F = 6) \quad (5)$$

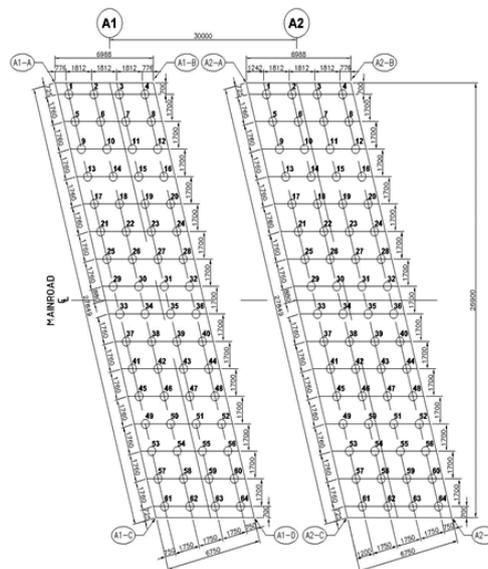
dengan Q_u = kapasitas ultimit tiang, e_n = efisiensi pemukul, E_h = besar energi pemukul, W_r = berat ram, W_p = berat keseluruhan tiang dan s = penetrasi per pukulan.

Berdasarkan data-data yang tersedia dilakukan analisis kapasitas dukung tiang tunggal dengan menggunakan Metode Hilley, Sanders, dan Navy-Mckay. Kapasitas dukung tiang tunggal yang didapatkan terdiri dari kapasitas dukung ultimit dan kapasitas ijin setelah dibagi dengan faktor aman. Kapasitas tiang yang dicari dalam penelitian ini difokuskan pada arah aksial saja. Analisis berikutnya adalah mencari hubungan kapasitas dukung ijin rata-rata dengan penetrasi dari setiap metode pada kedua lokasi titik pemancangan yang ditinjau.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data Tiang dan Kelendering

Pelaksanaan pembangunan *underpass* Jalan Inspeksi dan Gas menggunakan fondasi tiang pancang dengan spesifikasi tiang di antaranya jenis fondasi tiang pancang beton pracetak, rencana kedalaman ABT-A1 adalah 35 m, rencana kedalaman ABT-A2 adalah 25 m, diameter tiang 60 cm, dan jumlah tiang 64 buah. Selain spesifikasi data yang diambil, diperlukan juga gambar dengan titik pancang seperti pada Gambar 1. Kelompok tiang pancang terdiri dari dua yaitu tiang pancang kelompok ABT-A1 dan tiang pancang kelompok ABT-A2.



Gambar 1. Denah titik pancang *underpass*

Data-data hasil uji kalendering ABT-A1 dan ABT-A2 terlihat pada Tabel 5 dan Tabel 6. Data-data ini digunakan untuk menganalisis kapasitas dukung tiang pancang dengan menggunakan metode persamaan *Hiley*, persamaan *Sanders*, dan persamaan *Navy-Mckay*.

Tabel 5. Data hasil uji kalendering pada ABT-A1

Titik Pancang	Diameter Spun Pile (cm)	Konfigurasi Tiang Pancang				Jumlah Pukulan	Final Set		Berat Hammer (ton)	Ramstroke (cm)
		Bottom	Middle 1	Middle 2	Middle 3		K (cm)	S (cm)		
1	60	12	12	12		657	1,4	1,5	6,5	250
2	60	12	12	12		780	1,5	1,7	6,5	250
3	60	8	12	12		638	1,4	1,4	6,5	250
4	60	8	12	12		725	1,9	1,5	6,5	250
9	60	8	8	8	12	775	1,5	1,6	6,5	250
10	60	8	8	8	12	764	1,7	1,5	6,5	250
7	60	8	8	12		658	1,8	1,6	6,5	250
8	60	8	8	12		657	1,8	1,5	6,5	250
60	60	8	8	12		790	1,6	1,8	6,5	250
61	60	8	8	12		812	1,7	1,5	6,5	250
62	60	8	8	12		680	1,7	1,5	6,5	250
63	60	8	8	12		640	1,7	1,5	6,5	250
64	60	8	8	12	8	910	1,8	1,6	6,5	250
59	60	8	8	8	12	832	1,6	1,7	6,5	250
56	60	8	8	12		630	1,8	1,4	6,5	250
58	60	8	8	12		705	1,7	1,4	6,5	250
57	60	8	8	8	12	740	2,0	1,7	6,5	250
55	60	8	8	8	12	825	1,6	1,6	6,5	250
51	60	8	8	12		680	1,8	1,7	6,5	250
52	60	8	8	8	8	780	1,5	1,5	6,5	250
53	60	8	8	8	12	870	1,8	1,6	6,5	250
54	60	8	8	8	12	721	1,6	1,7	6,5	250
50	60	8	8	12		626	1,7	1,5	6,5	250
48	60	8	8	12		638	2,1	1,4	6,5	250
49	60	8	8	12		751	2,0	1,6	6,5	250
47	60	8	8	8	12	768	1,9	1,7	6,5	250
46	60	8	8	12		640	1,6	1,5	6,5	250
45	60	8	8	12		660	1,8	1,4	6,5	250
44	60	8	8	8	12	755	1,5	1,5	6,5	250
43	60	8	8	8	12	827	1,7	1,6	6,5	250
40	60	8	8	12		639	1,7	1,5	6,5	250
41	60	8	8	12		652	1,7	1,4	6,5	250
42	60	8	8	8	12	790	1,6	1,6	6,5	250
39	60	8	8	8	12	779	1,8	1,6	6,5	250
37	60	8	8	12		632	1,9	1,8	6,5	250
38	60	8	8	12		628	2,1	1,8	6,5	250
33	60	8	8	8	12	698	1,8	1,6	6,5	250
34	60	8	8	8	12	722	1,7	1,6	6,5	250
35	60	8	8	12		642	1,5	1,6	6,5	250
36	60	8	8	12		639	1,5	1,7	6,5	250
32	60	8	8	8	12	776	1,7	1,6	6,5	250
31	60	8	8	12	8	732	1,9	1,8	6,5	250
27	60	8	8	12		648	1,6	1,5	6,5	250
28	60	8	8	8	12	788	1,7	1,7	6,5	250
29	60	8	8	8	12	758	1,5	1,6	6,5	250
30	60	8	8	8	12	746	1,5	1,4	6,5	250

Tabel 5 (lanjutan). Data hasil uji kalendering pada ABT-A1

Titik Pancang	Diameter Spun Pile (cm)	Konfigurasi Tiang Pancang				Jumlah Pukulan	Final Set		Berat Hammer (ton)	Ramstroke (cm)
		Bottom	Middle 1	Middle 2	Middle 3		K (cm)	S (cm)		
25	60	8	8	12		645	1,7	1,5	6,5	250
26	60	8	8	12		722	1,6	1,5	6,5	250
24	60	8	12	12		669	1,7	1,3	6,5	250
23	60	8	12	12		672	1,7	1,6	6,5	250
22	60	8	12	12		718	1,8	1,5	6,5	250
21	60	8	12	12		692	1,5	1,4	6,5	250
17	60	8	8	12		640	2,1	1,7	6,5	250
18	60	8	8	12		630	1,6	1,4	6,5	250
19	60	8	8	12		660	1,7	1,5	6,5	250
20	60	8	8	8	12	755	1,7	1,6	6,5	250
14	60	8	8	8	12	732	1,8	1,7	6,5	250
13	60	8	8	12		630	1,6	1,5	6,5	250
15	60	8	8	12		643	1,8	1,7	6,5	250
12	60	8	8	8	12	632	1,7	1,6	6,5	250
11	60	8	8	8	12	744	1,7	1,6	6,5	250
16	60	8	12	12		698	1,5	1,4	6,5	250
5	60	12	12	12		492	2,0	1,4	6,5	250
6	60	12	12	12		468	2,1	1,5	6,5	250

Tabel 6. Data hasil uji kalendering pada ABT-A2

Titik Pancang	Diameter Spun Pile (cm)	Konfigurasi Tiang Pancang				Jumlah Pukulan	Final Set		Berat Hammer (ton)	Ramstroke (cm)
		Bottom	Middle 1	Middle 2	Middle 3		K (cm)	S (cm)		
1	60	8	12	12		650	1,3	1,5	6,5	250
2	60	12	12	12		786	1,5	1,6	6,5	250
5	60	8	12	12		638	1,4	1,1	6,5	250
3	60	8	12	12		728	1,9	1,5	6,5	250
9	60	8	8	8	12	776	1,5	1,2	6,5	250
6	60	8	8	8	12	765	1,7	1,3	6,5	250
7	60	8	8	12		653	1,9	1,6	6,5	250
8	60	8	8	12		658	1,8	1,5	6,5	250
13	60	8	8	8	12	785	1,6	1,8	6,5	250
10	60	8	8	8	12	811	1,7	1,4	6,5	250
11	60	8	8	12		678	1,5	1,6	6,5	250
12	60	8	8	12		637	1,7	1,6	6,5	250
17	60	8	8	12	8	927	1,7	1,6	6,5	250
14	60	8	8	8	12	837	1,7	1,7	6,5	250
15	60	8	8	12		639	1,8	1,5	6,5	250
16	60	8	8	12		708	1,7	1,6	6,5	250
21	60	8	8	8	12	743	2,0	1,7	6,5	250
18	60	8	8	8	12	820	1,6	1,4	6,5	250
19	60	8	8	12		687	1,8	1,7	6,5	250
20	60	8	8	8	8	782	1,6	1,4	6,5	250
25	60	8	8	8	12	868	1,7	1,6	6,5	250
22	60	8	8	8	12	653	1,6	1,5	6,5	250
23	60	8	8	12		681	1,7	1,7	6,5	250
24	60	8	8	12		638	2,1	1,7	6,5	250
26	60	8	8	8	8	751	2,0	1,6	6,5	250
29	60	8	8	8	12	720	1,9	1,8	6,5	250
27	60	8	8	12		633	1,5	1,4	6,5	250
28	60	8	8	12		660	1,8	1,5	6,5	250

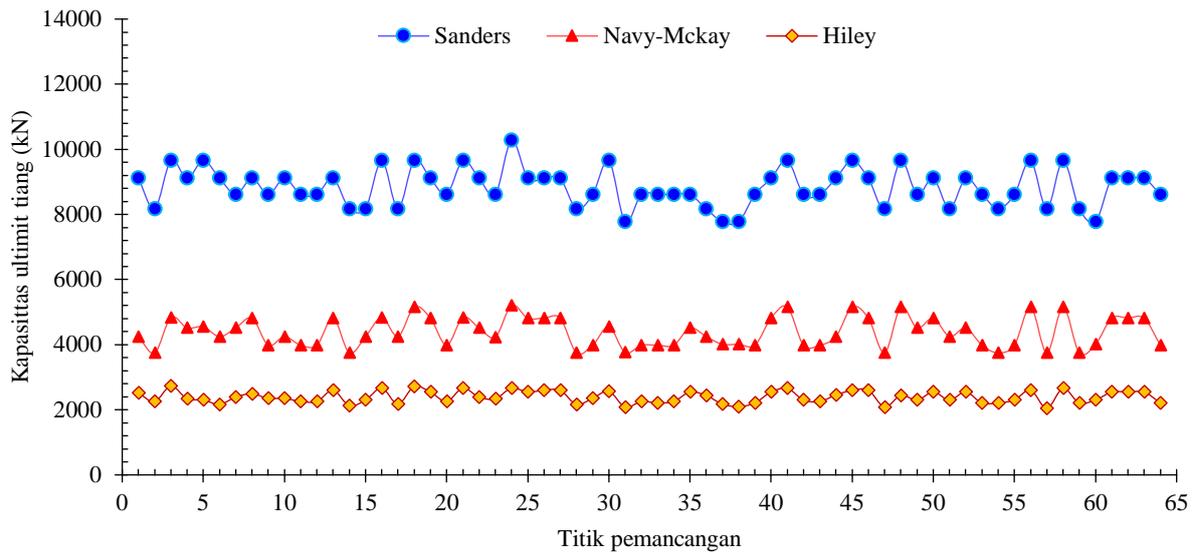
Tabel 6 (lanjutan). Data hasil uji kalendering pada ABT-A2

Titik Pancang	Diameter Spun Pile (cm)	Konfigurasi Tiang Pancang				Jumlah Pukulan	Final Set		Berat Hammer (ton)	Ramstroke (cm)
		Bottom	Middle 1	Middle 2	Middle 3		K (cm)	S (cm)		
33	60	8	8	8	12	755	1,5	1,5	6,5	250
30	60	8	8	8	12	827	1,5	1,6	6,5	250
31	60	8	8	12		639	1,7	1,5	6,5	250
32	60	8	8	12		652	1,9	1,4	6,5	250
37	60	8	8	8	12	792	1,6	1,4	6,5	250
34	60	8	8	8	12	778	1,8	1,6	6,5	250
35	60	8	8	12		672	1,9	1,8	6,5	250
36	60	8	8	12		628	2,1	1,8	6,5	250
41	60	8	8	8	12	688	1,7	1,6	6,5	250
38	60	8	8	8	12	722	1,7	1,5	6,5	250
39	60	8	8	12		650	1,5	1,7	6,5	250
40	60	8	8	12		639	1,5	1,6	6,5	250
45	60	8	8	8	12	776	1,7	1,5	6,5	250
42	60	8	8	8	8	728	1,8	1,8	6,5	250
43	60	8	8	12		648	1,6	1,6	6,5	250
61	60	8	8	8	12	788	1,6	1,7	6,5	250
57	60	8	8	8	12	742	1,5	1,5	6,5	250
46	60	8	8	8	12	740	1,5	1,5	6,5	250
47	60	8	8	12		645	1,6	1,5	6,5	250
62	60	8	8	8	12	722	1,6	1,3	6,5	250
63	60	8	12	12		698	1,7	1,5	6,5	250
59	60	8	12	12		672	1,6	1,6	6,5	250
55	60	8	12	12		718	1,8	1,3	6,5	250
48	60	8	12	12		692	1,5	1,3	6,5	250
60	60	8	8	12		630	2,1	1,6	6,5	250
56	60	8	8	12		630	1,6	1,3	6,5	250
52	60	8	8	12		660	1,6	1,5	6,5	250
49	60	8	8	8	12	745	1,7	1,5	6,5	250
50	60	8	8	8	12	732	1,8	1,6	6,5	250
51	60	8	8	12		622	1,6	1,6	6,5	250
53	60	8	8	12		643	1,8	1,5	6,5	250
54	60	8	8	12		632	1,7	1,5	6,5	250
58	60	8	8	8	12	744	1,5	1,5	6,5	250
44	60	8	12	12		698	1,5	1,3	6,5	250
4	60	12	12	12		489	2,0	1,4	6,5	250
64	60	12	12	12		429	2,1	1,2	6,5	250

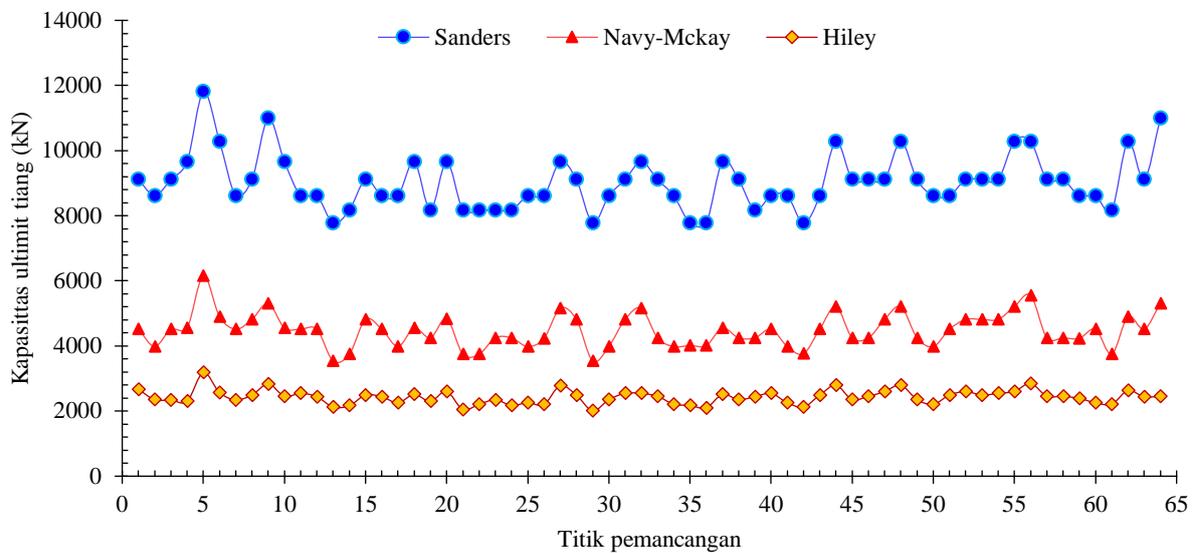
Analisis Kapasitas Tiang Tunggal

Berdasarkan metode yang digunakan didapat kapasitas dukung ultimit tiang (Q_u) untuk tiang-tiang di ABT-A1 ditunjukkan pada Gambar 2 dan untuk tiang-tiang di ABT-A2 ditunjukkan pada Gambar 3. Nilai-nilai kapasitas dukung ultimit masing-masing tiang dihitung berdasarkan data-data yang diuraikan pada Tabel 5 dan Tabel 6, dengan menggunakan persamaan-persamaan yang telah dipaparkan sebelumnya. Dari kedua lokasi ABT-A1 dan ABT-2 terlihat bahwa hasil hitungan pada satu metode, hampir sama di titik yang satu dengan yang lainnya. Perbedaan yang ada dipengaruhi oleh kondisi lapisan tanah di titik yang satu dengan yang lainnya.

Berdasarkan analisis kapasitas dukung ultimit tiang didapatkan bahwa metode Sanders selalu lebih tinggi dari metode lainnya baik di lokasi ABT-A1 maupun ABT-2. Hasil analisis metode Hiley mendekati sama dengan metode Navy-Mckay. Nilai kapasitas dukung ultimit tiang yang paling kecil adalah hasil analisis metode Hiley. Kapasitas dukung tiang metode Navy-Mckay lebih besar 1,83 untuk lokasi ABT-A1 dan 1,84 untuk lokasi ABT-A2, sedangkan kapasitas dukung tiang metode Sanders lebih besar 3,70 untuk lokasi ABT-A1 dan 3,72 untuk lokasi ABT-A2 dibandingkan kapasitas dukung ultimit tiang metode Hiley.



Gambar 2. Kapasitas ultimit tiang pada ABT-1



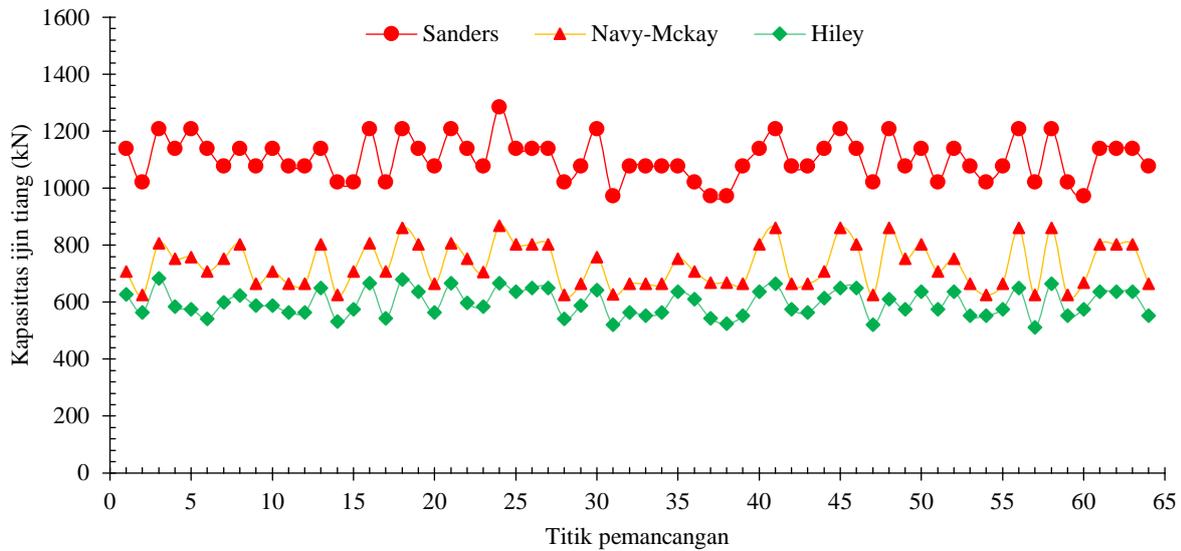
Gambar 3. Kapasitas ultimit tiang pada ABT-2

Kapasitas dukung ijin tiang (Q_a) setelah dibagi faktor aman untuk tiang-tiang di ABT-A1 ditunjukkan pada Gambar 4 dan untuk tiang-tiang di ABT-A2 ditunjukkan pada Gambar 5. Nilai kapasitas dukung ijin tiang didapatkan dari kapasitas dukung ultimit masing-masing tiang dibagi faktor aman masing-masing $F = 4$ untuk metode Hiley, $F = 6$ untuk metode Navy-Mckay, dan $F = 8$ untuk metode Sanders. Berdasarkan hasil yang didapatkan, nilai kapasitas dukung ijin tiang dari metode Navy-Mckay dan Sanders masih lebih tinggi daripada metode Hiley. Kapasitas dukung ijin tiang metode Navy-Mckay lebih besar 1,22 untuk lokasi ABT-A1 dan 1,23 untuk lokasi ABT-A2, sedangkan kapasitas dukung tiang metode Sanders lebih besar 1,85 untuk lokasi ABT-A1 dan 1,86 untuk lokasi ABT-A2 dibandingkan kapasitas dukung ijin tiang metode Hiley.

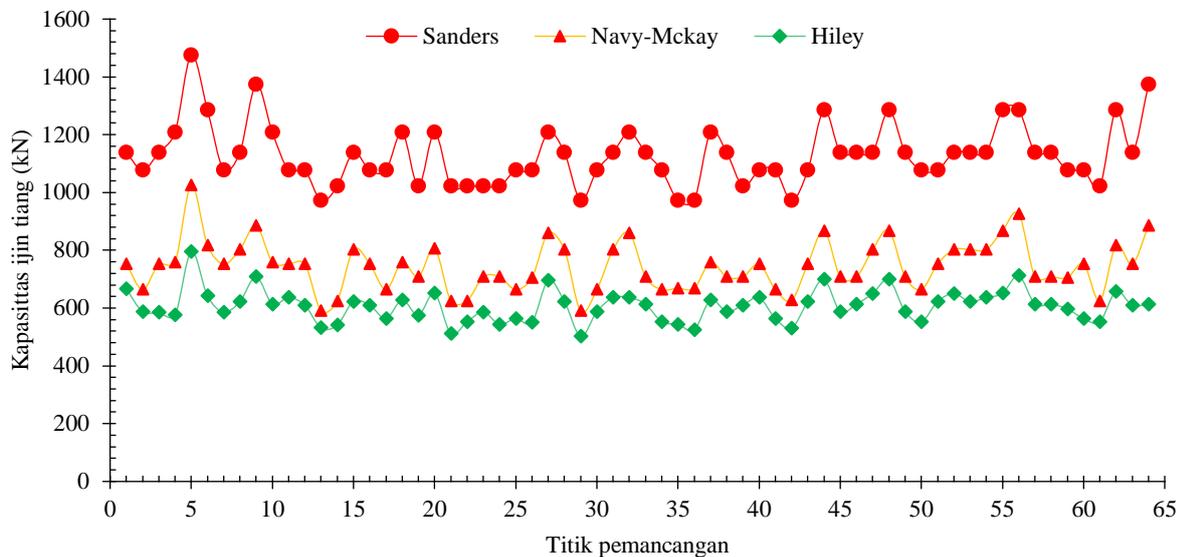
Berdasarkan hasil analisis didapatkan bahwa metode Hiley selalu lebih rendah daripada metode lainnya dan mendekati sama dengan metode Navy-Mckay. Perbedaan satu sama lainnya hanya sekitar 20% metode Navy-Mckay lebih besar, perbedaan ini masih bisa ditolerir. Akan tetapi metode Sanders menunjukkan perbedaan yang cukup jauh, yaitu sekitar 85% lebih tinggi dari metode Hiley.

Beberapa metode memiliki kesamaan dalam menurunkan rumus dalam analisis kapasitas tiang tunggal yang terlihat pada persamaan Sanders dengan mempertimbangkan berat tiang (W_t), namun tidak mempertimbangkan seperti luas

penampang tiang (A), panjang tiang (L), dan bantalan kepala tiang untuk menentukan koefisien restitusi. Persamaan Navy-Mckay dan persamaan Janbu terlihat mempertimbangkan berat tiang (W_r) dan panjang tiang (L), namun tidak mempertimbangkan bantalan kepala tiang untuk menentukan koefisien restitusi.



Gambar 4. Kapasitas ijin tiang pada ABT-1

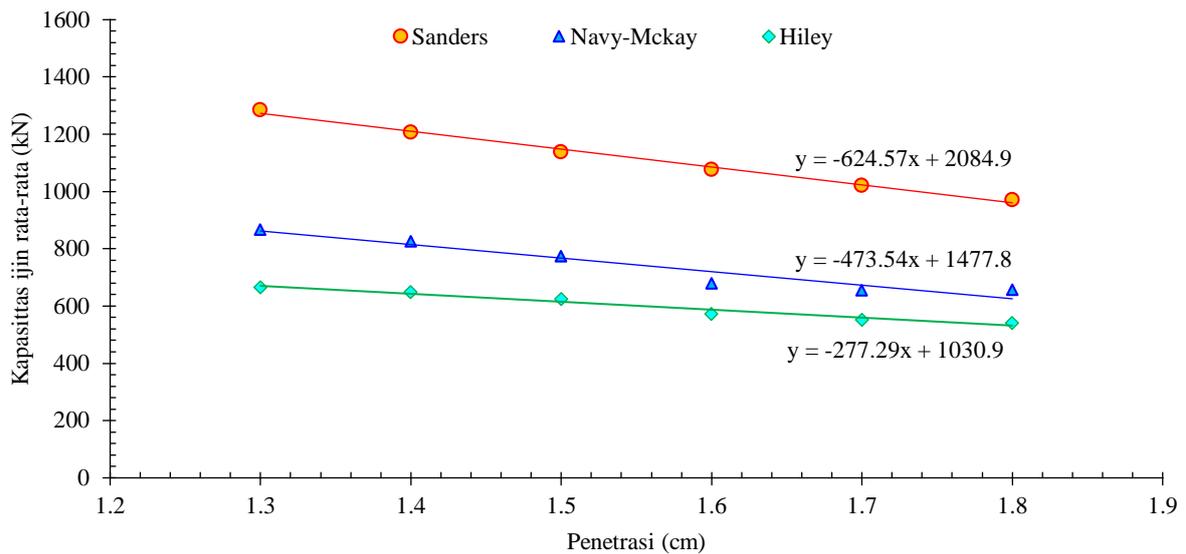


Gambar 5. Kapasitas ijin tiang pada ABT-2

Perbedaan penggunaan parameter-parameter ini dapat menjadi penyebab hasil analisis yang berbeda satu sama lainnya. Metode-metode ini tidak dibatasi berdasarkan kondisi tanah, alat pancang, dan bahan tiang pancang, namun ada beberapa nilai parameter yang dipengaruhi oleh jenis tanah, jenis pemukul, jenis mesin, dan bahan tiang pancang.

Hubungan Kapasitas Tiang Tunggal dengan Penetrasi Tiang

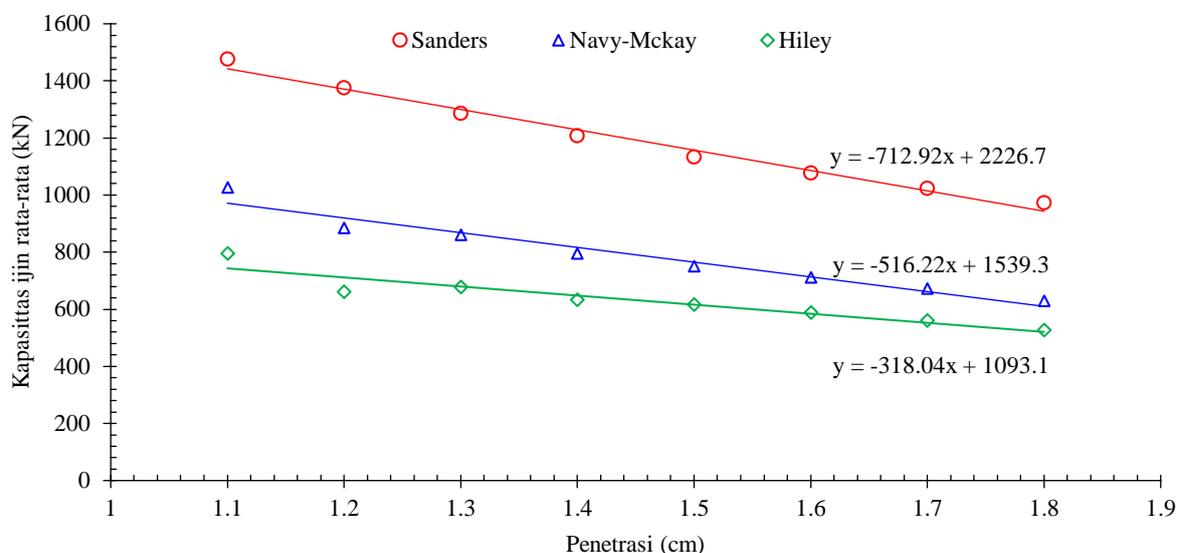
Hubungan kapasitas ijin tiang tunggal rata-rata dengan penetrasi tiang pada titik-titik tiang di ABT-A1 ditunjukkan pada Gambar 6. Hubungan kapasitas ijin tiang tunggal rata-rata dengan penetrasi tiang pada titik-titik tiang di ABT-A2 ditunjukkan pada Gambar 7. Kapasitas ijin tiang tunggal rata-rata dari sejumlah kapasitas ijin tiang tunggal yang mempunyai nilai penetrasi yang sama. Penetrasi pada titik-titik tiang di ABT-A1 terdiri dari 1,1 cm, 1,2 cm, 1,3 cm, 1,4 cm, 1,5 cm, 1,6 cm, 1,7 cm, dan 1,8 cm, sedangkan penetrasi pada titik-titik tiang di ABT-A2 terdiri dari 1,3 cm, 1,4 cm, 1,5 cm, 1,6 cm, 1,7 cm, dan 1,8 cm. Nilai penetrasi dihubungkan dengan kapasitas ijin tiang tunggal rata-rata.



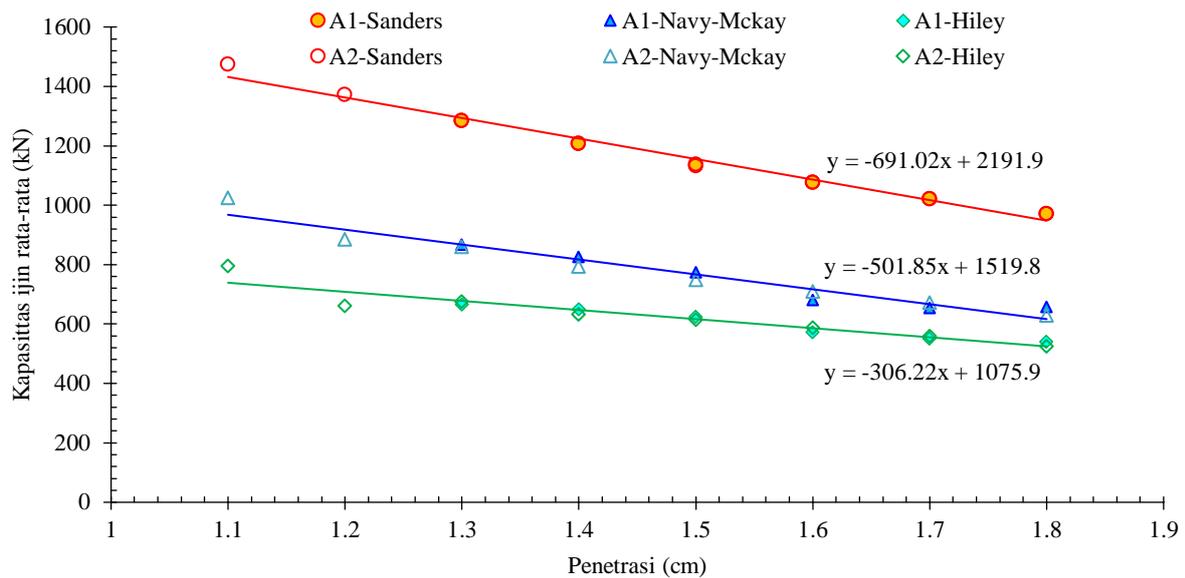
Gambar 6. Hubungan kapasitas ijin tiang tunggal rata-rata dengan penetrasi tiang pada ABT-A1

Hubungan nilai penetrasi dengan kapasitas ijin tiang tunggal rata-rata membentuk pola linier. Penetrasi yang semakin kecil memberikan nilai kapasitas ijin tiang tunggal rata-rata yang semakin tinggi. Hal ini berkaitan dengan tingkat kepadatan tanah, tanah yang keras dan kokoh memberikan penetrasi yang kecil, sehingga kapasitas dukung tiang semakin tinggi. Hal ini yang menjadi dasar dalam perencanaan kedalaman tiang pancang. Kedalaman tiang pancang menyesuaikan kedalaman tanah keras dan kokoh.

Hubungan kapasitas ijin tiang tunggal rata-rata dengan penetrasi tiang pada kedua titik-titik tiang di ABT-A1 dan ABT-A2 ditunjukkan pada Gambar 8. Hubungan kapasitas ijin tiang tunggal rata-rata dengan penetrasi antara lokasi ABT-A1 dengan ABT-A2 tidak memiliki perbedaan yang berarti, bahkan titik-titiknya sebagian besar sama dan berimpit, hal ini menunjukkan bahwa dengan metode yang sama didapatkan hasil yang sama pada hubungan penetrasi, pada titik berbeda sekalipun. Berdasarkan Gambar 8 dapat dilihat bahwa semakin kecil nilai penetrasi tiang (s), maka nilai kapasitas tiang semakin besar dan sebaliknya jika penetrasi semakin besar, maka nilai kapasitas tiang semakin kecil. Hal ini terlihat pada semua metode persamaan, walaupun cara perhitungan dan metode yang berbeda-beda.



Gambar 7. Hubungan kapasitas ijin tiang tunggal rata-rata dengan penetrasi tiang pada ABT-A2



Gambar 8. Hubungan kapasitas ijin rata-rata dengan penetrasi tiang

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis maka didapatkan beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Kapasitas dukung tiang tunggal berdasarkan data kelendering didapatkan bahwa metode Hiley selalu lebih rendah daripada metode lainnya dan mendekati sama dengan metode Navy-Mckay. Perbedaan satu sama lainnya hanya sekitar 20% metode Navy-Mckay lebih besar, perbedaan ini masih bisa ditolerir. Akan tetapi metode Sanders menunjukkan perbedaan yang cukup jauh, yaitu sekitar 85% lebih tinggi dari metode Hiley.
2. Semua metode menunjukkan bahwa jika semakin tinggi penetrasi, maka kapasitas tiang semakin kecil dan sebaliknya jika semakin kecil penetrasi, maka kapasitas tiang semakin tinggi. Hubungan kapasitas ijin tiang tunggal rata-rata dengan penetrasi antara lokasi ABT-A1 dengan ABT-A2 tidak memiliki perbedaan yang berarti, bahkan nilainya sebagian besar sama dan berimpit, hal ini menunjukkan bahwa pada metode yang sama didapatkan hubungan penetrasi yang sama pada titik yang berbeda sekalipun.
3. Berdasarkan hasil yang didapatkan, nilai kapasitas dukung ijin tiang dari metode Navy-Mckay dan Sanders masih lebih tinggi daripada metode Hiley. Kapasitas dukung ijin tiang metode Navy-Mckay lebih besar 1,22 untuk lokasi ABT-A1 dan 1,23 untuk lokasi ABT-A2, sedangkan kapasitas dukung tiang metode Sanders lebih besar 1,85 untuk lokasi ABT-A1 dan 1,86 untuk lokasi ABT-A2 dibandingkan kapasitas dukung ijin tiang metode Hiley.

Saran

Berdasarkan kesimpulan, maka ada beberapa hal yang disarankan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil dan kesimpulan, maka disarankan untuk menggunakan metode Hiley dan Navy-Mckay dalam menganalisis kapasitas dukung tiang pancang.
2. Analisis kapasitas dukung tiang selanjutnya dapat menggunakan data N_{spt} (Standard Penetration Test) data PDA (Pile Driving Analyzer).

DAFTAR PUSTAKA

- Basoka, I. W. (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. (2015). *Analisis dan Perancangan Fondasi II* (3 ed.). Yogyakarta: Gadjah Mada University Press.,
- Lukman, H. (2017). Rasio Daya Dukung Tiang Pancang Berdasarkan Hasil Kalendering. *Jurnal Teknik*, 18 No 1, 50-57.

- Pratama, R. R., Lukman, H., & Rahmah, A. (2016). Analisa Daya Dukung Tiang Pancang Berdasarkan Hasil Data Kalendering Pada Proyek Icon City Delta Mas, Cikarang Pusat, Bekasi. *Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik-Universitas Pakuan*, 1-7.
- 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.
- SNI 8460 (2017). Persyaratan Perancangan Geoteknik. Badan Standardisasi Nasional, Jakarta.
- Sulha, S., Sarita, U., Fitriah, F., & Sukri, M. (2019). Analisis Kapasitas Dukung Tiang Pancang Tunggal Berdasarkan Data N-SPT, CPT dan Kalendering. *Jurnal STABILITA*, 7(1), 39-46.
- Tampubolon, E. M., & Yakin, Y. A. (2017). Analisis Daya Dukung Tiang Tunggal Dinamik pada Tanah Lunak di Gedebage. *Jurnal Online Institut Teknologi Nasional*, 3 No 2, 81-92.
- Yusti, A., & Fahriani, F. (2014). Analisis Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Diverifikasi dengan Hasil Uji Pile Driving Analyzer Test dan Capwap. *Jurnal Fropil*, 2 No 1, 19-31.

