



Evaluasi Kapasitas Aksial Pondasi Tiang Pancang Tunggal Menggunakan Pendekatan Rumus Dinamik

Tri Susanto^{1✉}, Anno Mahfuda², Andi Muflih Marsuq Muthaher³

Universitas Diponegoro

Email: tsusanto@live.undip.ac.id^{1✉}

Abstrak

Daya dukung tiang pancang dapat diperoleh melalui pendekatan statis maupun dinamik. Perhitungan secara statis dilakukan dengan menganalisis sifat-sifat teknis tanah, sedangkan pendekatan dinamik dilakukan dengan menghitung kapasitas ultimit berdasarkan data hasil pemancangan tiang. Penelitian ini bertujuan untuk memperoleh perbandingan dukung tiang dengan menggunakan pendekatan dinamik berbasis data kalendering. Data yang digunakan dalam analisis ini berasal dari proyek konstruksi elevated X di Jakarta, tepatnya pada lokasi titik T38 yang terdiri atas 12 tiang pancang. Perhitungan dilakukan menggunakan empat metode kalendering, yaitu Hiley, ENR, WKA, dan Navy-McKay. Hasil perhitungan dari keempat metode tersebut dibandingkan untuk melihat variasi nilai kapasitas dan mengevaluasi metode mana yang memberikan hasil paling realistis atau konservatif. Pada perhitungan daya dukung ultimit (Q_u) di lokasi proyek X, metode perhitungan kapasitas ultimit tiang pancang memberikan hasil yang bervariasi, dengan metode Hiley menghasilkan nilai tertinggi dan metode ENR paling rendah. Perbedaan ini menekankan pentingnya pemilihan metode yang sesuai dengan kondisi lapangan untuk memperoleh estimasi kapasitas tiang yang akurat dan andal.

Kata Kunci: *Daya Dukung, Dinamik, Kalendering.*

Abstract

The bearing capacity of piles can be obtained through static or dynamic approaches. Static calculations are carried out by analyzing the technical properties of the soil, while the dynamic approach is carried out by calculating the ultimate capacity based on pile driving data. This study aims to obtain a comparison of pile bearing capacity using a dynamic approach based on calendaring data. The data used in this analysis comes from the elevated X construction project in Jakarta, precisely at the location of point T38, which consists of 12 piles. The calculations were carried out using four calendaring methods, namely Hiley, ENR, WIKA, and Navy-McKay. The calculation results from the four methods were compared to see the variation in capacity values and to evaluate which method gave the most realistic or conservative results. The calculation methods for the ultimate bearing capacity (Q_u) at project location X yielded varying results, with the Hiley method providing the highest value and the ENR method the lowest. This difference emphasizes the importance of choosing a method that is appropriate to field conditions to obtain accurate and reliable pile capacity estimates.

Keywords: *Bearing Capacity, Dinamic, Calendering.*

PENDAHULUAN

Berfungsi untuk menyalurkan beban dari superstruktur (bagian atas bangunan) ke substruktur (bagian bawah bangunan), pondasi adalah komponen penting dari struktur bangunan (Sari et al., 2023; Żarkiewicz, 2019). Pondasi tiang pancang sangat cocok untuk tanah keras yang dalam karena dapat mentransfer beban ke lapisan tanah yang memiliki kapasitas dukung yang cukup. Salah satu cara yang efektif untuk mengetahui seberapa besar daya dukung tiang pancang di lapangan adalah dengan menggunakan data kalendering, yang diperoleh selama proses pemancangan dengan mencatat penurunan (penetrasi) tiang untuk setiap sejumlah pukulan (Khalisa et al., 2022; Simanjuntak et al., 2018; Tanjung et al., 2024).

Metode kalendering adalah metode pengujian dinamik yang telah banyak digunakan di Indonesia dan di seluruh dunia untuk menilai kapasitas ultimit tiang. Nilai final set, yaitu jumlah penurunan tiang dalam satuan milimeter per pukulan, dicatat untuk mengelilingi, terutama pada tahap akhir pemancangan saat tiang mendekati lapisan tanah keras (Hardiyatmo, 2022). Selanjutnya, nilai ini dievaluasi menggunakan berbagai rumus empiris, termasuk metode Hiley, ENR (Engineering News Record), Janbu, Danish, Navy-McKay, dan WIKA, untuk menghitung daya dukung ultimit atau izin tiang (Lukman, 2017; Sandi et al., 2022; Tanjung et al., 2024).

Daya dukung tiang pancang yang dapat dihitung biasanya lebih besar jika nilai penetrasi yang terjadi selama kalendering lebih kecil. Ini disebabkan oleh fakta bahwa penetrasi kecil menunjukkan bahwa tahanan tanah terhadap tiang sudah tinggi, yang

menunjukkan bahwa tiang telah mencapai lapisan tanah yang lebih kuat dan keras. Nilai akhir set berkisar antara 3 dan 8 mm/10 pukulan, menurut penelitian pada proyek Icon City di Bekasi. Hasil perhitungan daya dukung sangat berbeda tergantung pada rumus yang digunakan. Metode WIKA memberikan hasil tertinggi, diikuti oleh ENR dan Hiley, menunjukkan bahwa pilihan metode sangat mempengaruhi nilai akhir perhitungan daya dukung (Lukman, 2017).

Penelitian lain yang dilakukan oleh Dora Melati N.S. dkk. (2022) pada proyek jalan tol Gempol–Pasuruan dan Jembatan Widuri menunjukkan bahwa hasil perhitungan kalendering dengan metode Danish dan ENR mendekati nilai aktual dari tes PDA, yaitu pengujian dinamik yang dianggap lebih akurat karena mempertimbangkan respons gelombang tegangan dan kecepatan pada tiang. Dalam konteks ini, nilai rasio antara daya dukung hasil kalendering dan PDA menjadi parameter penting untuk menilai akurasi metode. Rasio yang mendekati angka 1 menunjukkan tingkat kesesuaian yang tinggi antara metode empiris dan kondisi lapangan (Sandi et al., 2022).

Konsistensi hubungan antara nilai penetrasi dan kapasitas dukung tiang juga ditemukan dalam studi pembangunan underpass STA 2+550 Binjai–Stabat. Penelitian ini menggunakan beberapa metode kalendering, termasuk Sanders, Hiley, Janbu, dan Navy-McKay. Meskipun sebagian besar metode memberikan hasil yang sebanding, metode Sanders menghasilkan nilai yang jauh lebih besar karena hanya mempertimbangkan berat tiang dan tidak memasukkan faktor lain seperti efisiensi energi pukulan (Tanjung et al., 2024). Hal ini menegaskan pentingnya pemilihan metode yang mempertimbangkan berbagai parameter pemancangan dan kondisi lapangan.

Penggunaan data kalendering sebagai alat evaluasi kapasitas pondasi tiang memiliki berbagai keunggulan. Di antaranya adalah sifatnya yang praktis, ekonomis, dan dapat dilakukan langsung di lapangan tanpa memerlukan peralatan pengujian lanjutan yang mahal. Namun demikian, akurasi metode kalendering sangat bergantung pada rumus yang digunakan, jenis alat pemukul, efisiensi energi, dan karakteristik tanah setempat, sehingga diperlukan kajian lebih mendalam mengenai metode mana yang paling sesuai dengan kondisi lapangan yang berbeda-beda (Khalisa et al., 2022; Sandi et al., 2022).

Berdasarkan berbagai temuan dari studi sebelumnya, penggunaan data kalendering untuk mengevaluasi daya dukung tiang pancang tetap relevan, khususnya dalam konteks pembangunan infrastruktur di Indonesia yang memiliki keragaman kondisi tanah. Penelitian ini secara khusus memilih empat metode kalendering, yaitu Hiley, ENR, WIKA, dan Navy-McKay. Keempat metode ini dipilih karena merupakan rumus dinamik yang paling umum digunakan di Indonesia, serta telah terbukti memiliki kecocokan tinggi dengan kondisi dan

data lapangan yang tersedia. Pemilihan keempat metode ini diharapkan dapat memberikan gambaran komprehensif dan akurat dalam mengevaluasi kapasitas pondasi tiang pancang.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi daya dukung ultimit dan izin pondasi tiang pancang dengan pendekatan metode dinamik berdasarkan data kalendering. Kalendering merupakan metode evaluasi empiris yang dilakukan saat proses pemancangan, dengan mengukur nilai penetrasi tiang dalam satuan mm per 10 pukulan hammer. Penelitian ini tidak menggunakan data SPT, sondir, maupun hasil uji PDA, dan sepenuhnya berfokus pada data hasil kalendering. Data yang digunakan dalam analisis diambil dari proyek konstruksi elevated X yang dikerjakan pada tahun 2016 di Jakarta, tepatnya pada lokasi titik T38 yang terdiri atas 12 tiang pancang.

Tabel 1 menunjukkan spesifikasi teknis dari tiang pancang yang digunakan dalam analisis. Jenis tiang yang digunakan adalah spun pile dengan mutu beton sebesar 52 MPa. Tiang ini memiliki diameter 1000 mm dan tebal dinding 140 mm, menghasilkan luas penampang sebesar 3781 cm². Berat tiang mencapai 946 kg per meter, sementara modulus elastisitasnya tercatat sebesar 33.892 MPa, menunjukkan kemampuan material untuk menahan deformasi elastis saat diberi beban. Tabel 2 memuat spesifikasi alat pemancang yang digunakan, yaitu diesel hammer tipe DD83. Alat ini memiliki berat hammer sebesar 8,30 ton dan berat cap sebesar 0,50 ton. Energi pemancangan dihasilkan dari tinggi jatuhan sebesar 2500 mm, yang berperan penting dalam menentukan daya dukung tiang saat proses pemancangan.

Tabel 1. Spesifikasi tiang pancang

Spesifikasi	Nilai
Jenis tiang	Spun pile
Mutu beton	52 MPa
Diameter	1000 mm
Tebal	140 mm
Luas penampang	3781 cm ²
Berat tiang	946 kg/m
Modulus elastisitas	33892 MPa

Tabel 2. Spesifikasi alat pemancang

Spesifikasi	Nilai
Tipe hammer	Diesel hammer DD83
Berat hammer	8,30 ton
Berat cap	0,50 ton
Tinggi jatuhan	2500 mm

Tabel 3 menyajikan data kalendering untuk 12 tiang dengan kode T38. Panjang tiang bervariasi antara 30,50 meter hingga 32,50 meter, dengan jumlah pukulan total (total blow) berkisar antara 1272 hingga 1590. Nilai rebound tercatat antara 10 hingga 34 mm, sedangkan final set berada pada rentang 3 hingga 6 mm. Data ini merupakan hasil pengukuran selama proses pemancangan untuk mengevaluasi kinerja dan penetrasi tiap tiang. Hasil data pengukuran tersebut digunakan sebagai dasar untuk analisis.

Tabel 3. Data kalendering

Kode tiang	Panjang tiang (m)	Total blow	Rebound (mm)	Final set (mm/pukulan)
T38 1	32,00	1293	18	3
T38 2	30,50	1272	16	4
T38 3	32,00	1290	19	3
T38 4	32,00	1491	12	3
T38 5	32,00	1327	18	3
T38 6	32,00	1325	15	4
T38 7	32,00	1390	13	6
T38 8	32,00	1590	14	6
T38 9	32,00	1407	10	3
T38 10	32,00	1395	16	3
T38 11	31,00	1474	27	6
T38 12	32,50	1477	34	6

Tahapan analisis dalam penelitian ini diawali dengan pengumpulan dan pengolahan data kalendering yang mencakup nilai penetrasi tiang (final set), berat hammer, tinggi jatuh hammer, berat tiang, panjang tiang, serta dimensi penampang tiang. Nilai efisiensi hammer (eh) mengacu dari Tabel 5, nilai koefisien restitusi (n) dari Tabel 6, dan nilai kompresi elastis blok penutup ($k1$) dari Tabel 7. Seluruh parameter tersebut bersumber dari dokumentasi pemancangan di lapangan yang telah tersedia dalam laporan proyek. Langkah selanjutnya adalah menghitung kapasitas daya dukung ultimit (Q_u) untuk masing-masing tiang pancang menggunakan beberapa metode dinamik berbasis kalendering, yaitu metode Hiley, ENR,

WIKa, dan Navy-McKay sebagaimana tercantum dalam Tabel 4.

Hasil perhitungan dari keempat metode dibandingkan untuk mengamati perbedaan nilai kapasitas yang dihasilkan dan mengevaluasi metode mana yang memberikan hasil paling realistis atau konservatif. Selain itu, dilakukan analisis perbandingan kapasitas daya dukung tiang maksimal, minimal dan rata-rata, guna menilai konsistensi dari keempat metode dinamik. Seluruh hasil analisis disajikan dalam bentuk tabel dan grafik untuk mempermudah interpretasi serta penarikan kesimpulan terkait kinerja masing-masing metode dinamik yang digunakan.

Tabel 4. Perbandingan rumus dinamik

Sumber		Rumus dinamik	Keterangan
(Hardiyatmo, 2022; Lukman, 2017)	Hiley	$Q_u = \frac{eh \cdot W_r \cdot h}{s + \frac{1}{2}(k_1 + k_2 + k_3)} \cdot \frac{W_r + n^2 \cdot W_p}{W_r + W_p}$	Nilai eh , n , k_1 dari tabel
(Hardiyatmo, 2022; Lukman, 2017)	ENR	$Q_u = \frac{eh \cdot W_r \cdot h \cdot (W_r + n^2 W_p)}{(s + 0,25) \cdot (W_r + W_p)}$	Nilai eh , n dari tabel
(Dhana et al., 2023; Lukman, 2017)	WIKa	$Q_u = \frac{2 \cdot W_r \cdot h}{s + k} \cdot \frac{W_r + n^2 \cdot W_p}{W_r + W_p}$	Nilai n dari tabel; safety factor = 3
(Dhana et al., 2023; Hardiyatmo, 2022)	Navy-McKay	$Q_u = \frac{2 \cdot W_r \cdot h}{s + k} \cdot \frac{W_r + n^2 \cdot W_p}{W_r + W_p}$	Nilai n dari tabel; safety factor = 6

Keterangan:

- Q_u = kapasitas tiang ultimit (ton)
- s = final set/penetrasi per pukulan (mm/pukulan)
- W_p = berat tiang termasuk berat pentup tiang (ton)
- W_r = berat pemukul/hammer (ton)
- eh = efisiensi pemukul/*hammer efficiency*
- Eh = besaran energi pemukul ($Eh = W_r \cdot h$)
- A = luas penampang (cm^2)
- E = modulus elastisitas (MPa)
- h = tinggi jatuh hammer (mm)
- k_1 = kompresi elastis blok penutup (mm)
- k_2 = kompresi elastis tiang, $Q_u \cdot L / A \cdot E$ (mm)
- k_3 = kompresi elastis tanah (2,50-5,00 mm)
- L = panjang tiang (m)
- k = rebound (mm)

Tabel 5. Nilai efisiensi eh (Hardiyatmo, 2022; Kementerian PUPR, 2015)

Jenis palu	eh
Palu jatuh	0,75-1,00
Palu single acting	0,75-0,85
Palu double acting	0,85
Palu diesel	0,85-1,00

Tabel 6. Nilai koefisien restitusi n (Hardiyatmo, 2022; Kementerian PUPR, 2015)

Material	n
Tiang pancang kayu	0,25
Bantalan kayu diatas tiang pancang baja	0,32
Bantalan kayu diatas tiang pancang baja	0,40
Tiang pancang baja tanpa bantalan kayu / tiang beton dengan bantalan	0,50
Palu besi cor diatas tiang pancang beton tanpa topi	0,40

Tabel 7. Nilai kompresi elastis blok penutup $k1$ (Hardiyatmo, 2022)

Bahan	Tegangan akibat pukulan pemancangan pada kepala tiang (mm)			
	3,50 MPa	7,00 MPa	10,50 MPa	14,00 MPa
Tiang atau pipa baja				
- Langsung pada kepala tiang	0	0	0	0
- Langsung pada kepala tiang kayu	1,30	2,50	3,80	5,00
Tiang pancang beton pracetak dengan topi setebal (75 - 100) mm	3,00	6,00	9,00	12,50
Topi baja yang mengandung paking kayu untuk tiang baja H atau tiang baja pipa	1,00	2,00	3,00	4,00
Cap Block terdiri dari 5 mm bahan fiber di antara dua plat baja 10 mm	0,50	1,00	1,50	2,00

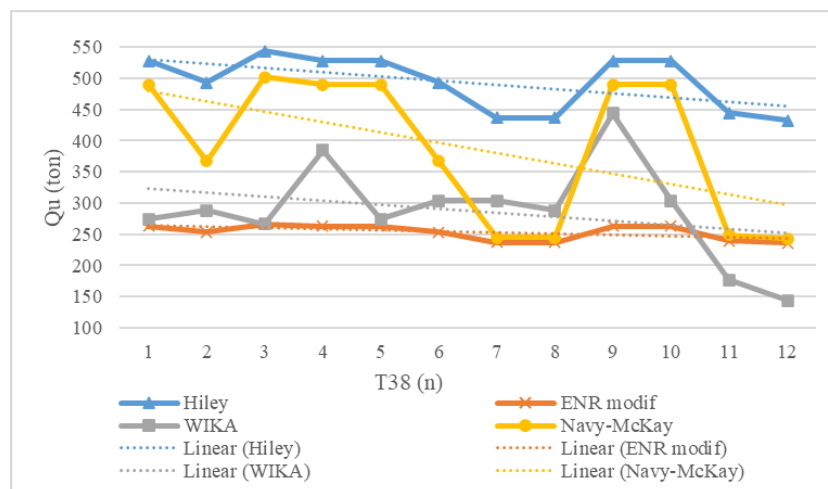
HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 8 menyajikan data hasil analisis kapasitas ultimit tiang berdasarkan hasil kalendering dibandingkan dengan data final set. Masing-masing baris menunjukkan hasil untuk satu tiang, dengan nilai kapasitas ultimit yang bervariasi tergantung pada rumus dinamik yang digunakan. Kapasitas ultimit hasil analisis tercantum dalam satuan ton.

Tabel 8. Hasil analisis kapasitas ultimit tiang

Kode tiang	Final set	Kapasitas ultimit tiang (ton)			
		Hiley	ENR	WIKa	Navy-McKay
T38 1	3	527,71	262,51	274,52	489,63
T38 2	4	493,37	253,45	288,24	367,22
T38 3	3	543,49	266,48	266,00	501,67
T38 4	3	527,71	262,51	384,32	489,63
T38 5	3	527,71	262,51	274,52	489,63
T38 6	4	493,37	253,45	303,41	367,22
T38 7	6	436,57	237,10	303,41	244,82
T38 8	6	436,57	237,10	288,24	244,82
T38 9	3	527,71	262,51	443,45	489,63
T38 10	3	527,71	262,51	303,41	489,63
T38 11	6	444,44	239,46	176,43	248,80
T38 12	6	432,76	235,96	143,43	242,87

Gambar 1 menyajikan grafik perbandingan kapasitas daya dukung ultimit (Q_u) tiang pancang yang dihitung menggunakan empat metode kalendering, yaitu Hiley, ENR, WIKa, dan Navy-McKay. Grafik ini menggambarkan variasi hasil perhitungan antar metode untuk setiap tiang, sehingga dapat digunakan untuk mengidentifikasi metode yang menghasilkan nilai paling konservatif maupun yang paling tinggi. Perbandingan ini juga memberikan gambaran tentang konsistensi dan kesesuaian metode terhadap kondisi lapangan.

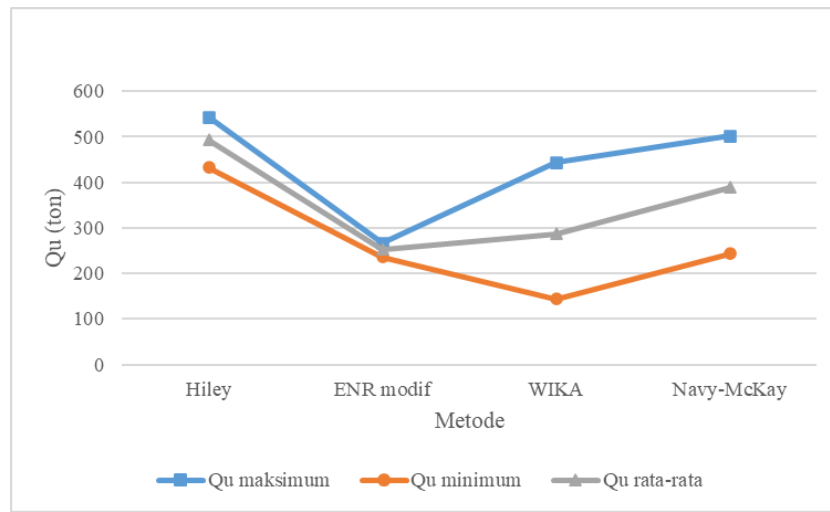


Gambar 1. Grafik perbandingan analisis kapasitas ultimit tiang

Analisis data kalendering pada proyek X, seperti yang disajikan dalam Tabel 8 dan Gambar 1, mengungkapkan adanya tren sistematis dan pola variasi yang konsisten di antara metode perhitungan kapasitas ultimit tiang pancang. Secara umum, metode Hiley dan Navy-McKay secara konsisten menghasilkan estimasi kapasitas ultimit yang lebih tinggi

dibandingkan metode ENR dan WIKA. Rata-rata kapasitas yang dihitung menggunakan metode Hiley berada pada kisaran tertinggi, dengan deviasi positif yang signifikan terhadap metode lainnya, yang mengindikasikan kecenderungan metode ini untuk memberikan estimasi yang lebih optimistik. Sebagai contoh, pada tiang T38 1, Hiley mencatat kapasitas sebesar 527,71 ton, sedangkan WIKA dan ENR menunjukkan nilai jauh lebih rendah masing-masing sebesar 274,52 ton dan 262,51 ton. Hal ini menunjukkan deviasi lebih dari 50% antara metode Hiley dan ENR, serta lebih dari 90% jika dibandingkan antara Hiley dan WIKA pada tiang tersebut.

Pola serupa dapat diamati pada sebagian besar tiang lainnya, di mana perbedaan antara metode tidak bersifat acak melainkan konsisten, mengindikasikan bahwa tiap metode memiliki basis pendekatan teknis yang menghasilkan bias tertentu. Metode WIKA, misalnya, secara umum menunjukkan estimasi paling konservatif, yang tampak dari nilai kapasitasnya yang hampir selalu berada pada batas bawah dibanding metode lain. Hal ini mencerminkan pendekatan empiris dari metode WIKA yang cenderung memperhitungkan faktor keamanan lebih tinggi, atau mungkin lebih sensitif terhadap efisiensi energi tumbukan yang rendah. Sebaliknya, Navy-McKay menempati posisi tengah dalam hampir semua kasus, memberikan estimasi yang relatif moderat antara Hiley, WIKA dan ENR. Adanya tren yang konsisten ini memberikan implikasi penting dalam pemilihan metode evaluasi kapasitas tiang. Deviasi antara metode tidak hanya sekadar perbedaan angka, tetapi berpotensi memengaruhi keputusan teknis dan ekonomi dalam proyek. Misalnya, overestimasi kapasitas oleh metode Hiley dapat menyebabkan desain yang tidak konservatif dan berisiko terhadap kestabilan jangka panjang, sementara estimasi rendah oleh metode WIKA dapat mengarah pada pembesaran desain yang tidak perlu, yang berdampak pada efisiensi biaya. Oleh karena itu, selain mempertimbangkan nilai kapasitas itu sendiri, penting untuk menganalisis arah dan besar deviasi dari tiap metode terhadap konteks kondisi lapangan yang sebenarnya seperti jenis tanah, energi palu, dan panjang tiang, sehingga bisa digunakan untuk menentukan metode yang paling representatif. Dengan demikian, Tabel 8 tidak hanya memberikan informasi numerik, tetapi juga menjadi dasar kritis dalam analisis komparatif antar pendekatan dan sebagai pedoman strategis dalam pengambilan keputusan desain pondasi.



Gambar 2. Grafik rekapitulasi kapasitas ultimit tiang

Tabel 9. Rekapitulasi kapasitas ultimit tiang

Uraian	Kapasitas ultimit tiang (ton)			
	Hiley	ENR	WIKA	Navy-McKay
Qu tertinggi	543,49	266,48	443,45	501,67
Qu terendah	432,76	235,96	143,43	242,87
Qu rata-rata	493,26	252,96	287,45	388,80

Apabila analisis dilakukan lebih detail, pada Tabel 9 dan Gambar 2 memperlihatkan hasil perhitungan kapasitas ultimit tiang pancang (Q_u) berdasarkan empat metode, yaitu metode Hiley, ENR, WIKA, dan Navy-McKay. Dari keempat metode tersebut, metode Hiley memberikan estimasi kapasitas ultimit tertinggi, dengan nilai Q_u rata-rata sebesar 493,26 ton. Nilai kapasitas ultimit maksimum pada metode ini mencapai 543,49 ton, sedangkan nilai terendahnya adalah 432,76 ton. Metode Hiley dikenal memberikan hasil konservatif dengan pendekatan energi dan efisiensi pemancangan yang cukup rinci, sehingga hasilnya relatif tinggi dibandingkan metode lain.

Metode Navy-McKay menempati urutan kedua dalam hal rata-rata kapasitas ultimit, yaitu sebesar 388,80 ton, dengan Q_u maksimum 501,67 ton dan minimum 242,87 ton. Metode ini mempertimbangkan faktor redaman energi dan kecepatan rambat gelombang dalam tiang, sehingga memberikan hasil yang lebih moderat. Sementara itu, metode WIKA menghasilkan kapasitas ultimit rata-rata sebesar 287,45 ton, dengan nilai tertinggi 443,45 ton dan terendah hanya 143,43 ton. Di sisi lain, metode ENR memberikan hasil yang paling rendah dibanding ketiga metode lainnya, dengan nilai rata-rata 252,96 ton, nilai maksimum 266,48 ton, dan nilai minimum 235,96 ton. Hal ini menunjukkan bahwa metode ENR sangat konservatif dalam memperkirakan daya dukung tiang, yang mungkin disebabkan oleh kesederhanaan pendekatannya dan tidak mempertimbangkan secara menyeluruh

karakteristik dinamik sistem pemancangan. Secara umum, data dalam tabel menunjukkan adanya variasi yang cukup signifikan antar metode, yang mencerminkan perbedaan asumsi teknis, parameter yang digunakan, serta tingkat konservatisme dari masing-masing pendekatan (Dhana et al., 2023). Oleh karena itu, dalam praktik rekayasa, pemilihan metode yang tepat sangat penting agar kapasitas ultimit tiang dapat diestimasi dengan akurat dan sesuai dengan kondisi lapangan sebenarnya (Julfah & Siregar, 2023).

Hasil analisis menunjukkan bahwa semakin kecil nilai final set yang diperoleh selama proses pemancangan, maka daya dukung pondasi tiang cenderung semakin besar (Khalisa et al., 2022). Hal ini menunjukkan bahwa tiang semakin sulit untuk menembus tanah pada pukulan terakhir, yang mengindikasikan bahwa tanah di lokasi tersebut memiliki kekuatan dan kepadatan yang tinggi (Tanjung et al., 2024; Waruwu et al., 2022). Untuk menguatkan hubungan ini, dilakukan analisis regresi linear sederhana antara nilai final set dan kapasitas ultimit. Hasil regresi menunjukkan adanya korelasi negatif yang cukup kuat, dengan garis tren yang menurun, yang menandakan bahwa penurunan nilai final set berkaitan dengan peningkatan kapasitas ultimit tiang. Dengan kata lain, final set dapat digunakan sebagai indikator lapangan yang cukup andal untuk memperkirakan daya dukung pondasi secara cepat dan praktis, khususnya ketika pengujian laboratorium terbatas atau tidak tersedia (Julfah & Siregar, 2023; Tanjung et al., 2024).

SIMPULAN

Dari hasil analisis dapat disimpulkan bahwa terdapat variasi yang cukup signifikan dalam estimasi kapasitas ultimit tiang pancang (Q_u) berdasarkan metode perhitungan yang digunakan. Metode Hiley memberikan nilai kapasitas tertinggi, baik dari sisi rata-rata maupun nilai maksimum, menunjukkan bahwa metode ini cenderung menghasilkan estimasi yang besar karena mempertimbangkan secara rinci energi dan efisiensi pemancangan. Metode Navy-McKay berada di posisi kedua dengan estimasi yang lebih moderat, mencerminkan pendekatan yang seimbang dalam memperhitungkan faktor-faktor dinamik selama proses pemancangan. Di sisi lain, metode WKA menghasilkan estimasi yang lebih rendah, yang kemungkinan besar disebabkan oleh pendekatan praktis yang disesuaikan dengan kondisi lokal di lapangan. Metode ENR menunjukkan hasil paling konservatif dengan estimasi kapasitas ultimit terendah di antara keempat metode, yang mencerminkan pendekatan sederhana dalam perhitungannya. Perbedaan hasil ini menegaskan pentingnya pemilihan metode yang tepat dalam perencanaan pondasi, agar kapasitas tiang yang diperoleh sesuai dengan kondisi aktual di lapangan serta mampu memberikan jaminan keamanan dan efisiensi dalam pelaksanaan konstruksi. Tetapi secara umum semua metode

menunjukkan bahwa semakin kecil nilai final set yang diperoleh selama proses pemancangan, maka daya dukung pondasi tiang cenderung semakin besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Dhana, R. R., Kartikasari, D., & Pratiwi, T. T. (2023). Analisa Daya Dukung Tiang Pancang Berdasarkan Hasil Kalendering Pada Proyek Simpang Susun Romokalisari Zona 2 STA 0+900. *Teras Jurnal: Jurnal Teknik Sipil*, 13(1), 75. <https://doi.org/10.29103/tj.v13i1.815>
- Hardiyatmo, H. C. (2022). *Analisis dan Perancangan Fondasi II Edisi 5* (UGM Press, Ed.; 5th ed.). UGM Press. <https://ugmpress.ugm.ac.id/id>
- Julfah, N., & Siregar, C. A. (2023). Analisis Kapasitas Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Pada Proyek Pembangunan Jembatan Rancabeureum Sungai Cimande Kabupaten Bandung Dengan Menggunakan Dynamic Formula. *Sistem Infrastruktur Teknik Sipil (SIMTEKS)*, 3(2), 249. <https://doi.org/10.32897/simteks.v3i2.1069>
- Kementerian PUPR. (2015). *Pedoman Pemilihan Alat Pemancang Tiang Fondasi Jembatan. Nomor 31/SE/M/2015*.
- Khalisa, C. L., Yunita, H., & Sungkar, M. (2022). Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Menggunakan Data Kalendering Dan Data SPT. *Journal of The Civil Engineering Student*, 4(1), 15–21. <https://doi.org/10.24815/journalces.v4i1.17725>
- Lukman, H. (2017). Rasio Daya Dukung Tiang Pancang Berdasarkan Hasil Kalendering. *Jurnal Teknik / Majalah Ilmiah Fakultas Teknik UNPAK*, 18(1). <https://doi.org/10.33751/teknik.v18i1.1539>
- Sandi, D. M. N., Maldini, A. R., & Rachmayu, F. A. (2022). Rasio Daya Dukung Tiang Pancang Tunggal Berdasarkan Data Kalendering dengan Data Test PDA. *J-RITEKS*, 1(1), 28–34. <https://doi.org/10.57203/jriteks.v1i1.2022.28-34>
- Sari, U. C., Mirza Abdillah Pratama, M., Atpriyanti, D. N., & Negoro, N. A. (2023). The Bearing Capacity Analysis of Deep Foundation based on In-situ Dynamic Penetration Test Compared to Pile Driving Analyzer (PDA). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1203(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1203/1/012017>
- Simanjuntak, J. O., Suita, D., & Pasaribu, H. (2018). Study of Pile Bearing Capacity Based on Calendering and Pile Driving Analyzer at The Faspel Development Project of Ketek Sikara-Kara Mandailing Natal District (North Sumatera, Indonesia). *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 420(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/420/1/012005>
- Tanjung, D., Sarifah, J., & Rambe, V. H. (2024). Evaluasi Kapasitas Fondasi Tiang Pancang Menggunakan Data Kalendering Pada ABT1-ABT 2 Underpass STA 2+550 Binjai-

Stabat. In *Journal of Basic Educational Studies* (Vol. 4, Issue 3).
<https://doi.org/10.47467/edu.v4i3.4587>

Waruwu, A., Frenky, D. J., & Sirait, L. (2022). Analisis Kapasitas Dukung Tiang Tunggal Berdasarkan Data Kalendering. In *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil* (Vol. 5, Issue 1).
<https://doi.org/10.24912/jmts.v5i1.12534>

Żarkiewicz, K. (2019). Pile Bearing Analysis Based Upon Ultimate Values of Toe and Skin Resistance As Well As Their Mobilization With Settlement. *MATEC Web of Conferences*, 284, 03011. <https://doi.org/10.1051/matecconf/201928403011>