

ANALISIS DAYA DUKUNG TIANG PANCANG STEEL PIPE PILE BERDASARKAN DATA KALENDERING DAN PDA TEST (Studi Kasus: Project Strengthening Jetty 1 & Jetty 2 PLH Existing, Desa Paring Lahung, Kec. Montallat, Kab. Barito Utara, Kalimantan Tengah)

Kukuh Kurniawan Dwi Sungkono¹, *Reki Arbiyanto², Paska Wijayanti³, Erwin Aji Prasetyo⁴, Rizal Kurniawan⁵

^{1,2,3,5}Fakultas Teknik, Universitas Tunas Pembangunan Surakarta, Surakarta, Indonesia

⁴PT. Sukses Karya Indoteknik, Jakarta, Indonesia

^{*}) Email: reki.arbiyanto@lecture.utp.ac.id

ABSTRACT

In the field of construction, particularly in geotechnical engineering, uncertainties in foundation design approaches are frequently encountered. Geotechnical uncertainties, especially in foundation design, pose complex challenges due to the heterogeneous nature of soil and data limitations. Dynamic load testing on pile foundations is an alternative method to static load testing in geotechnical engineering for evaluating pile capacity and behavior. The results of this analysis will be compared to the design capacity of pile foundations in the breasting dolphin structure. This study on a breasting dolphin structure utilizing Steel Pipe Pile (SPP) foundations with a diameter 610 mm. PDA tests were conducted on piles at points G6-23, G7-33, G7-38, and G8-46. The study begins with a literature review to comprehend methods and theories related to pile capacity analysis based on calendaring and PDA testing. Calendaring data were analyzed using empirical methods such as the Hiley Formula to estimate the dynamic bearing capacity of each pile. The pile capacity calculated using the Hiley Formula is generally higher than the results obtained from the Case Method and CAPWAP Analysis. The relationship between pile capacity based on the Hiley Formula (calendaring) and the Case Method (PDA test) yielded a linear regression equation of $y = 1.0785x - 983.07$ with $R^2 = 0.2385$, indicating a weak correlation. Meanwhile, the relationship between pile capacity from the Hiley Formula (calendaring) and CAPWAP Analysis (PDA test) resulted in a linear regression equation of $y = -0.006x + 2909.8$ with $R^2 = 1 \times 10^{-1}$, indicating almost no linear correlation between the two.

Keyword: calendaring, PDA test, steel pile

ABSTRAK

Dalam dunia konstruksi khususnya bidang geoteknik sering kali menghadapi berbagai ketidakpastian dan kesalahan pendekatan dalam perencanaan pondasi. Ketidakpastian dalam geoteknik, terutama dalam perencanaan pondasi, merupakan tantangan yang kompleks karena sifat alami tanah yang bervariasi dan keterbatasan data. Pengujian dengan beban dinamis pada tiang pancang menjadi salah satu metode lain selain statik dalam bidang geoteknik untuk menilai kapasitas dan perilaku tiang pancang. Hasil analisis ini akan dibandingkan dengan kapasitas desain rencana tiang pancang pada struktur breasting dolphin. Studi ini ditinjau struktur breasting dolphin yang menggunakan tiang pancang Steel Pipe Pile (SPP) dengan diameter 610 mm. PDA test tiang pancang dilakukan pada titik tiang G6-23, G7-33, G7-38 dan G8-46. Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk memahami metode dan teori terkait analisis daya dukung tiang pancang berbasis kalendering dan PDA test. Data kalendering dianalisis menggunakan metode empiris seperti Hiley Formula untuk memperkirakan kapasitas daya dukung dinamis setiap tiang pancang. Kapasitas dukung tiang yang dihitung menggunakan Hiley Formula umumnya lebih tinggi dibandingkan dengan Case Methode dan CAPWAP Analysis. Hubungan antara kapasitas tiang berdasarkan perhitungan Hiley Formula (kalendering) dengan hasil dari Case Method (PDA test). Regresi liniernya memiliki persamaan: $y = 1.0785x - 983.07$ dengan $R^2 = 0.2385$ yang artinya hubungan keduanya lemah. Hubungan antara kapasitas tiang berdasarkan Hiley Formula (kalendering) dengan hasil dari CAPWAP Analysis (PDA test) diperoleh regresi liniernya $y = -0.006x + 2909.8$ dengan $R^2 = 1 \times 10^{-1}$ yang artinya hamper tidak ada hubungan linier diantara keduanya.

Kata kunci: kalendering, PDA test, steel pile

1. PENDAHULUAN

Dalam dunia konstruksi, analisis empiris dan non-empiris diusulkan dalam kegiatan konstruksi untuk menyelesaikan berbagai permasalahan yang muncul di proyek. Pendekatan-pendekatan melalui pemodelan didasarkan pada berbagai asumsi yang terjadi di proyek melalui pemodelan numerik, sehingga dapat diperoleh sebuah analisis yang komprehensif sebagai dasar dalam mengambil keputusan [1]. Dalam dunia konstruksi khususnya bidang geoteknik sering kali menghadapi berbagai ketidakpastian dan kesalahan pendekatan dalam perencanaan pondasi. Ketidakpastian ini muncul dari beberapa faktor utama yang berkaitan dengan sifat tanah dan kondisi di lapangan yang tidak sepenuhnya dapat direpresentasikan oleh data tanah yang ada. Ketidakpastian dalam geoteknik, terutama dalam perencanaan pondasi, merupakan tantangan yang kompleks karena sifat alami tanah yang bervariasi dan keterbatasan data. Untuk mengatasinya, diperlukan kombinasi antara teknologi canggih, pendekatan investigasi yang holistik, dan kehati-hatian dalam interpretasi data untuk memastikan desain pondasi

yang aman, efisien, dan andal. Salah satu permasalahan penting dalam geoteknik adalah prediksi kapasitas beban ultimate pada pondasi tiang pancang [2].

Pengujian beban statis dan dinamis sering digunakan untuk menentukan kapasitas daya dukung pondasi tiang pancang. Dalam pelaksanaan uji beban statis (*static load tests*) sebagai cara untuk memverifikasi sebuah pondasi dalam, instrument yang digunakan cukup sederhana. Pada pengujian statis tiang pancang biasanya menggunakan *load cell*, alat pengukur perpindahan atau LVDT dan alat lainnya yang bisa mengukur perpindahan vertikal [3]. Pengujian dan pemantauan beban dinamis bergantung pada data yang dikumpulkan selama tumbukan palu, dengan menggunakan akselerometer dan transduser regangan yang dipasang pada kepala tiang.

Pengujian dengan beban dinamis pada tiang pancang menjadi salah satu metode lain selain statik dalam bidang geoteknik untuk menilai kapasitas dan perilaku tiang pancang [4]. Pengujian ini melibatkan pembebanan dinamik pada tiang pancang dengan menggunakan peralatan *hammer* tiang pancang untuk mengukur kapasitas beban, integritas dan respon dinamis tiang. Metode dinamis dibandingkan dengan metode statis memberikan keuntungan dalam hal efisiensi waktu, biaya dan praktis, terutama untuk proyek-proyek dengan skala besar.

Tiang pancang sering kali digunakan pada pondasi dilokasi dengan daya dukung yang sangat dalam dan memiliki jenis tanah liat dan pasir yang tebal di mana *set up* akibat disipasi tekanan pori berlebih setelah pemancangan menghasilkan peningkatan kekuatan yang signifikan seiring berjalannya waktu [5], [6].

Steel Pipe Pile (SPP) atau tiang pancang baja umumnya digunakan pada struktur di proyek pembangunan dermaga dan jetty. Penggunaan SPP yang memiliki berat lebih ringan dibanding tiang pancang beton (Concrete Spun Pile/CSP) menjadi pilihan sebagai material tiang pancang di laut atau Sungai, selain kemudahan pemancangan juga memiliki kapasitas yang relative tinggi [6]. Ukuran tiang pancang yang diproduksi di Indonesia memiliki berbagai diameter. Pada proyek pekerjaan pembangunan Strengthening Jetty 1 & Jetty 2 PLH Existing, Desa Paring Lahung, Kec. Montallat, Kab. Barito Utara, Kalimantan Tengah ini menggunakan tiang diameter 406 mm, 610 mm dan 812 mm. Tiang pancang SPP pada proyek ini berada pada stuktur bresting dolphin dan moring dolphin. Seperti terlihat pada Gambar 1 berikut.



Gambar 1. Tiang pancang SPP pada bresting dolphin

Pada makalah ini, akan dibahas korelasi hasil pengujian kalendering dan *Pile Driving Analyzer* (PDA) test yang dilakukan pada pada tiang pancang 610 mm. Hasil analisis ini akan dibandingkan dengan kapasitas desain rencana tiang pancang pada struktur bresting dolphin. Nantinya hasil analisis ini dapat memberikan evaluasi nilai daya dukung tiang berdasarkan kalendering.

2. RUANG LINGKUP

Penelitian ini dilakukan pada proyek Strengthening Jetty 1 & Jetty 2 PLH Existing di Desa Paring Lahung, Kecamatan Montallat, Kabupaten Barito Utara, Kalimantan Tengah. Fokus penelitian adalah pada struktur bresting dolphin yang menggunakan tiang pancang *Steel Pipe Pile* (SPP) dengan diameter 610 mm. PDA test tiang pancang dilakukan pada titik tiang G6-23, G7-33, G7-38 dan G8-46. Penelitian ini menggunakan data primer yang mencakup data kalendering, data PDA test, spesifikasi teknis tiang pancang, dan desain proyek. Data kalendering meliputi rekaman jumlah pukulan per kedalaman (*blow count per depth*), energi *hammer* (*hammer energy*), dan kedalaman penetrasi per pukulan (*penetration per blow*), sedangkan data PDA test terdiri dari hasil analisis

gelombang dinamis (*stress wave analysis*), kapasitas daya dukung dinamis, integritas tiang, serta parameter gaya, percepatan, dan perpindahan.

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini diawali dengan studi literatur untuk memahami metode dan teori terkait analisis daya dukung tiang pancang berbasis kalendering dan PDA test. Data kalendering dianalisis menggunakan metode empiris seperti Hiley Formula untuk memperkirakan kapasitas daya dukung dinamis setiap tiang pancang. Selanjutnya, data PDA test dianalisis menggunakan metode *signal matching* melalui perangkat lunak CAPWAP guna mendapatkan estimasi kapasitas daya dukung dinamis yang lebih akurat, serta untuk menganalisis integritas tiang pancang. Hasil dari kedua metode ini kemudian dibandingkan untuk menentukan korelasi antara data kalendering dan PDA test. Korelasi ini bertujuan untuk menilai keakuratan kalendering sebagai metode monitoring dalam proyek pemancangan.

Hiley Formula adalah metode empiris yang digunakan untuk menghitung kapasitas daya dukung dinamis (*dynamic bearing capacity*) tiang pancang berdasarkan data kalendering. Metode ini mempertimbangkan berbagai parameter seperti energi palu, efisiensi sistem pemancangan, berat tiang, serta penetrasi per pukulan. Hiley Formula dapat dinyatakan pada Persamaan (1) berikut:

$$Q_u = \frac{E_h \cdot \eta}{S + \frac{c}{2}} \quad (1)$$

Keterangan:

- Q_u Kapasitas daya dukung dinamis tiang pancang (kN)
- E_h Energi efektif palu per pukulan (kNm)
- η Efisiensi sistem pemancangan (dari hammer, blok, dan tiang)
- S Penetrasi akhir per pukulan (*set per blow*) (m)
- c Konstanta elastisitas total, yang bergantung pada deformasi elastis tiang dan blok

Pengujian Dinamis Daya Dukung Fondasi-Tiang (*Pile Dynamic Load Testing*), dilakukan sesuai dengan standar ASTM D4945 (Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations) [7]. Karena fondasi-tiang yang akan diuji sudah tertanam, maka untuk pengujian dilakukan dengan menumbuk ulang fondasi-tiang tersebut dengan sumber tumbukan/impact yang memadai. Proses tumbukan atau *impacting* dihentikan setelah diperoleh kualitas rekaman yang cukup baik dan energy tumbukan yang relatif tinggi. Dengan demikian, jumlah tumbukan yang diperlukan ditentukan oleh fluktuasi besarnya energi yang sesungguhnya diterima oleh fondasi-tiang, hal ini sepenuhnya tergantung dari efisiensi sumber tumbukan atau *impact* yang digunakan. Pengujian PDA test disajikan pada Gambar 2.



Gambar 2. Pengujian PDA Test SPP dia. 610 mm

Interpretasi Dari Data Rekaman PDA Test

a. Metode CASE (CASE Method)

Berdasarkan rekaman sensor *strain transducer* yang berupa regangan dan dikonversi berdasarkan Hukum Hooke menjadi gaya (F) dan rekaman sensor *accelerometer* yang berupa percepatan dan diintegrasikan terhadap waktu menjadi kecepatan (V) serta dikalikan terhadap impedansi (Z) sebagai konstanta sebanding (*proportionality*) yang kemudian dikenal dengan teori 'CASE Method', maka Daya dukung fondasi-tiang dapat diperkirakan di lapangan.

b. Analisis CAPWAP (CAPWAP Analysis)

Sebelum menjalankan Capwap program, ada beberapa prosedur yang harus dilakukan seperti pengecekan semua data yang di-input pada saat pengujian, koreksi kecepatan gelombang (WS), proporsionalitas (FVZ), keselarasan (Vt) dan faktor damping-tanah (Jc) serta penurunan (DFN). Rekaman dinamis yang diperoleh dari pengujian (Case Method) dianalisis lebih lanjut dengan menggunakan program software 'Case Pile Wave Analysis Program' (CAPWAP). Metode ini menggabungkan persamaan gelombang (wave equation) dari model tiang dan tanah berdasarkan pengukuran dari Metode 'CASE'. Sehingga, analisis ini memberikan prediksi daya dukung fondasi-tiang lebih akurat serta distribusi kekuatan lapisan tanah (lengketan), dan tahanan-ujung dan simulasi pembebanan statik.

Parameter utama yang dianalisis dalam penelitian ini adalah kapasitas daya dukung dinamis tiang pancang berdasarkan kalendering dan PDA test, integritas tiang pancang selama pemancangan, serta tingkat korelasi antara kedua metode tersebut. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan gambaran menyeluruh tentang daya dukung tiang pancang SPP pada struktur bresting dolphin, menghasilkan korelasi yang valid antara data kalendering dan PDA test, serta memberikan rekomendasi teknis terkait pemancangan tiang pancang di proyek-proyek sejenis.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Kalendering

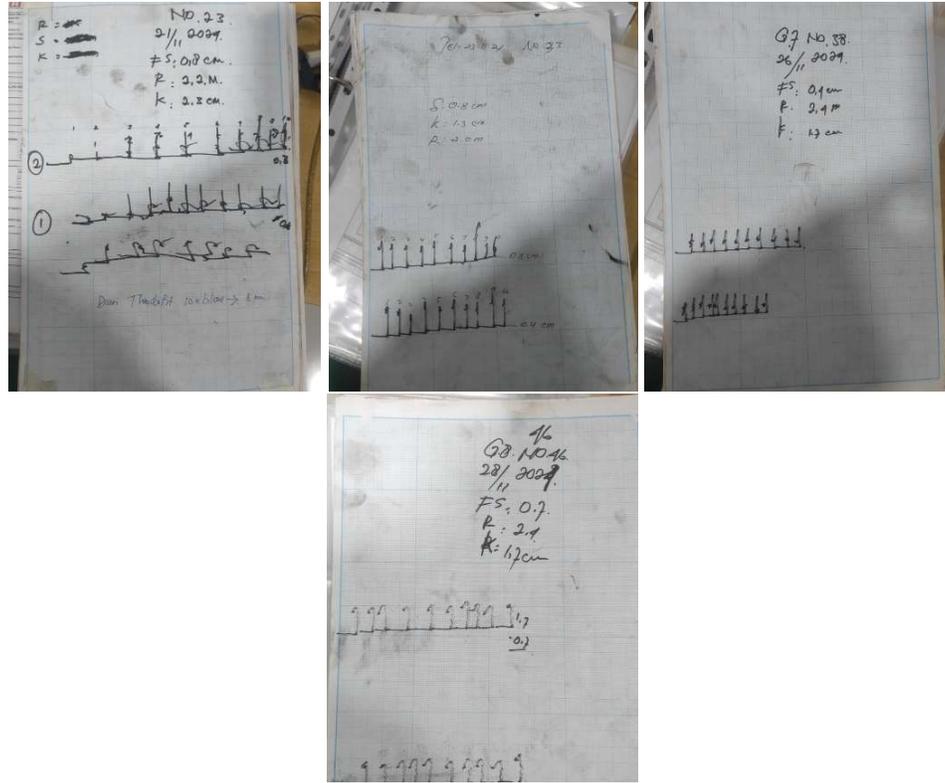
Proses kalendering merupakan metode pengawasan yang dilakukan selama pemasangan tiang pancang untuk memantau performa pemancangan serta estimasi daya dukung dinamis. Dalam proyek ini, data kalendering telah dicatat secara rinci untuk setiap tiang pancang yang digunakan pada struktur bresting dolphin dengan diameter 610 mm. Spesifikasi tiang pancang *steel pipe pile* sebagai berikut:

- a) Diameter SPP : 610 mm
- b) Tebal SPP : 14.3 mm
- c) Spesifikasi SPP : ASTM A252 Grade 2
- d) Berat SPP : 210.08 kg/m

Pada pemancangan digunakan disesel pile hammer Arcon type D55 dengan spesifikasi sebagai berikut:

- a) Berat hammer : 5500 kg
- b) Maksimum stroke : 3000 mm
- c) Frekuensi : 35 – 50 per minute
- d) Energy max : 159 kJ

Parameter yang dicatat meliputi jumlah pukulan per kedalaman, kedalaman penetrasi per pukulan, serta energi yang dihasilkan oleh palu selama proses pemancangan. Hasil kalendering tiang pancang G6-23, G7-33, G7-38 dan G8-46 disajikan pada Gambar 3.



Gambar 3. Kalendering tiang pancang SPP dia. 610 mm

Pengambilan data kalendering tiang SPP dilakukan pada fase akhir pemancangan saat mencapai tanah keras untuk memastikan bahwa tiang telah mencapai kedalaman dan kapasitas daya dukung yang direncanakan. Data pengujian kalendering disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Data pengujian kalendering SPP dia. 610 mm

No	Pile	Total Length (m)	Depth Penetration (m)	Final set (cm/blow)	Rebound, K (m)
1	G6-23	25	13	0,80	2,20
2	G7-33	25	12	0,80	2,00
3	G7-38	37	17	0,40	1,70
4	G8-46	26	14	0,70	2,40

Berdasarkan data kalendering dilakukan perhitungan daya dukung menurut Hiley Formula disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2. Daya dukung tiang berdasarkan kalendering Hiley Formula

No	Pile	SPP	FS	Daya dukung ultimate, Qu (kN)	Daya dukung ijin, Qr (kN)
1	G6-23	Dia. 610 – 14.3mm	4	4156	1039
2	G7-33	Dia. 610 – 14.3mm	4	3809	952
3	G7-38	Dia. 610 – 14.3mm	4	4183	1046
4	G8-46	Dia. 610 – 14.3mm	4	4488	1122

Pile Driving Analyzer (PDA) test

Hasil pengujian PDA test pada tiang pancang SPP disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Daya dukung tiang berdasarkan PDA Test

No	Pile	Total Length (m)	Depth Penetration (m)	Case Methode		CAPWAP Analysis		
				RMX/RSU (kN)	Keutuhan tiang	Lengketan, Rs (kN)	Tahanan ujung, Rt (kN)	Daya dukung aktual, Ru (kN)
1	G6-23	25	13	3350/3970	OK	1360	1960	3320
2	G7-33	25	12	3080/3240	OK	1020	1980	3000
3	G7-38	37	17	2140/2760	OK	1510	650	2160
4	G8-46	26	14	3150/4040	OK	1930	1130	3060

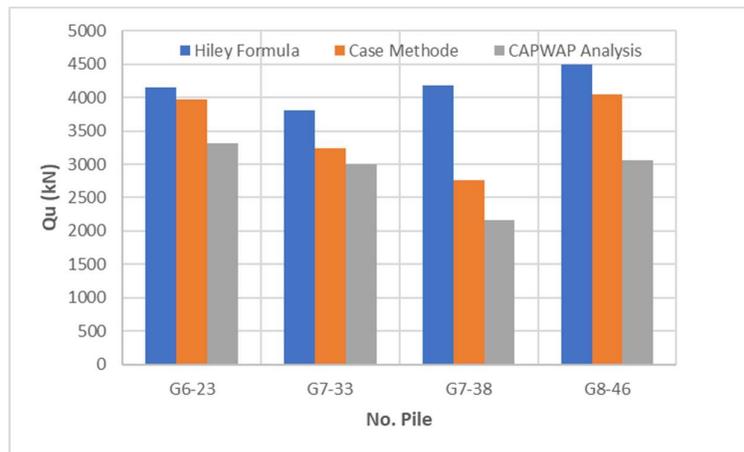
Korelasi kalendering dan PDA Test

Berdasarkan hasil perhitungan diperoleh perbandingan kapasitas dukung ultimate dari metode kalendering dan PDA test. Adapun hasil perbandingannya adalah sebagai berikut :

Tabel 3. Perbandingan Daya dukung tiang Ultimate

No	Pile	Total Length (m)	Depth Penetration (m)	Kalendering		PDA Test	
				Hiley Formula (kN)	Case Methode (kN)	CAPWAP Analysis (kN)	
1	G6-23	25	13	4156	3970	3320	
2	G7-33	25	12	3809	3240	3000	
3	G7-38	37	17	4183	2760	2160	
4	G8-46	26	14	4488	4040	3060	

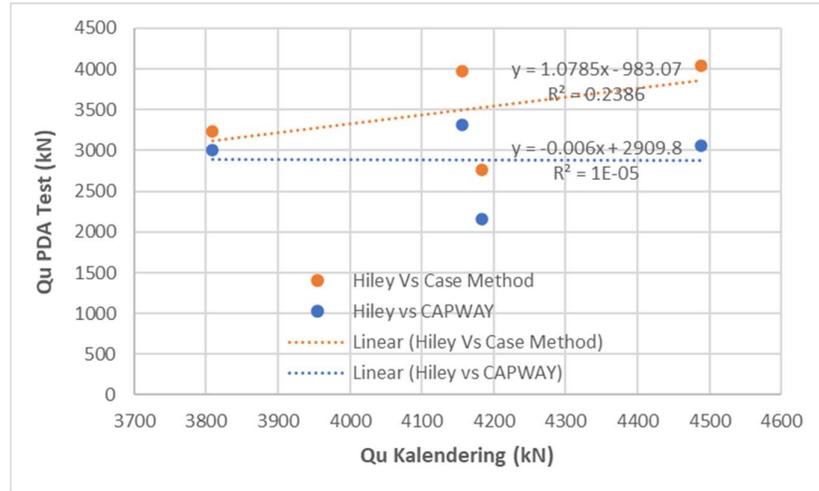
Tabel 3 menunjukkan bahwa nilai kapasitas dukung ultimate berdasarkan metode kalendering lebih besar dibandingkan dengan metode PDA test. Agar dapat memperjelas perbandingan kapasitas dukung ultimate dapat di lihat pada gambar sebagai berikut:



Gambar 3. Perbandingan Kapasitas dukung Ultimate

Gambar 3 menunjukkan Kapasitas dukung tiang yang dihitung menggunakan Hiley Formula umumnya lebih tinggi dibandingkan dengan Case Methode dan CAPWAP Analysis. Hal ini mungkin karena Hiley Formula cenderung memberikan estimasi konservatif tanpa mempertimbangkan banyak variabel dinamis seperti efek gelombang atau deformasi tanah. Case Methode memberikan hasil yang sedikit lebih rendah dibandingkan Hiley Formula, tetapi lebih tinggi dari CAPWAP Analysis. CAPWAP Analysis memberikan nilai kapasitas dukung paling rendah di antara ketiganya, yang mencerminkan analisis yang lebih rinci dan realistis.

Grafik ini menunjukkan variasi hasil kapasitas dukung tiang berdasarkan metode yang digunakan. Perbedaan ini biasanya terjadi karena asumsi yang berbeda pada setiap metode. CAPWAP Analysis sering dianggap sebagai pendekatan yang lebih akurat karena mempertimbangkan lebih banyak parameter dan kondisi aktual lapangan, sedangkan Hiley Formula memberikan pendekatan awal yang lebih cepat dan sederhana.



Gambar 4. Korelasi Kapasitas dukung Ultimate Kalendering VS PDA Test

Gambar 4 menunjukkan hubungan antara kapasitas dukung tiang (Q_u) yang diperoleh dari hasil kalkulasi kalendering (sumbu X) dengan kapasitas dukung tiang yang diperoleh dari hasil uji PDA (sumbu Y). Grafik ini juga dilengkapi dengan regresi linier untuk dua perbandingan berbeda: (1) Hiley vs Case Method (Titik oranye): Menunjukkan hubungan antara kapasitas tiang berdasarkan perhitungan Hiley Formula (kalendering) dengan hasil dari Case Method (PDA test). Regresi liniernya memiliki persamaan: $y = 1.0785x - 983.07$ dengan $R^2 = 0.2385$ yang artinya hubungan keduanya lemah. (2) Menunjukkan hubungan antara kapasitas tiang berdasarkan Hiley Formula (kalendering) dengan hasil dari CAPWAP Analysis (PDA test). Regresi liniernya $y = -0.006x + 2909.8$ dengan $R^2 = 1 \times 10^{-1}$ yang artinya hampir tidak ada hubungan linier diantara keduanya.

5. KESIMPULAN

Berdasarkan penelitian dapat disimpulkan bahwa :

1. Kapasitas dukung tiang yang dihitung menggunakan Hiley Formula umumnya lebih tinggi dibandingkan dengan Case Method dan CAPWAP Analysis
2. CAPWAP Analysis sering dianggap sebagai pendekatan yang lebih akurat karena mempertimbangkan lebih banyak parameter dan kondisi aktual lapangan, sedangkan Hiley Formula memberikan pendekatan awal yang lebih cepat dan sederhana.
3. Hubungan Hiley vs Case Method: Terdapat hubungan yang lemah antara kapasitas dukung yang dihitung menggunakan Hiley Formula dan hasil dari Case Method. Perbedaan ini mungkin disebabkan oleh perbedaan pendekatan dalam mempertimbangkan parameter lapangan.
4. Hubungan Hiley vs CAPWAP: Tidak ada korelasi yang signifikan antara kapasitas dukung hasil Hiley Formula dan CAPWAP Analysis. Hal ini menunjukkan bahwa CAPWAP, yang menggunakan analisis gelombang dan simulasi lebih mendetail, cenderung memberikan hasil yang berbeda secara signifikan dari metode kalendering

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Pessoa, G. Carlos, L. Sousa, G. Anjos, and R. Araujo, "Analysis Over the Accuracy of Dynamic Formulas for Predicting Ultimate Load Capacity in Deep Foundations," *Am. Sci. Res. J. Eng. Technol. Sci.*, vol. 79, pp. 66–78, May 2021.
- [2] K. Johnson, P. Lemcke, W. Karunasena, and N. Sivakugan, "Modelling the load–deformation response of deep foundations under oblique loading," *Environ. Model. Softw.*, vol. 21, no. 9, pp. 1375–1380, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2005.04.015>.
- [3] F. Han, E. Ganju, R. Salgado, and M. Prezzi, "Comparison of the load response of closed-ended and open-ended pipe piles driven in gravelly sand," *Acta Geotech.*, vol. 14, pp. 1–19, Dec. 2019, doi: 10.1007/s11440-019-00863-1.
- [4] M. Cosic, N. Susic, M. Prica, and N. Bozovic, *Some Aspects of Pile Testing Using Dynamic Load Test (DLT)*.

- 2021.
- [5] K. Karlsrud, T. G. Jensen, E. Lied, F. Nowacki, and A. Simonsen, "Significant Ageing Effects for Axially Loaded Piles in Sand and Clay Verified by New Field Load Tests," vol. 2, May 2014, doi: 10.4043/25197-MS.
 - [6] R. Tweedie and R. Clementino, "Comparison of static and high strain dynamic tests on driven steel piles at several industrial sites in Alberta," *GeoVancouver 2016*, pp. 214–221, 2016.
 - [7] American Society for Testing and Materials, "Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Piles," 2017, *ASTM International, West Conshohocken, PA, USA*. [Online]. Available: <https://www.astm.org/d4945-17.html>