

PERBANDINGAN KOMPONEN DAYA DUKUNG PONDASI TIANG ANTARA HASIL STATIC LOAD TEST (SLT) DAN PILE DRIVING ANALYZER (PDA)

Kenny Indrajaya Kusuma¹, Vincentius Ricky Kurniawan² and Gogot Setyo Budi³

ABSTRAK: Perhitungan desain pondasi perlu diverifikasi dengan kondisi sesungguhnya di lapangan. Dua metode uji tiang pancang yang populer yaitu *Static Load Test* (SLT) dan *Pile Driving Analyzer* (PDA). Tujuan penelitian ini untuk membandingkan perbedaan kedua uji tersebut dengan perhitungan desain melalui beberapa parameter, yaitu penurunan, tahanan ujung, tahanan friksi, dan daya dukung *ultimate* tiang pancang. Beberapa analisis dilakukan terhadap hasil SLT dan PDA, yaitu analisis dengan metode van Weele, M-K, Chin, dan analisis desain dengan metode Decourt. Penelitian ini menggunakan 21 tiang pancang yang ditanam dengan cara ditekan yang berasal dari 11 proyek berbeda di Indonesia. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penurunan tiang pada beban yang sama dari hasil uji PDA dan SLT memiliki hasil yang cukup bervariasi (koefisien = 0.8835, $R^2 = 0.3756$). Tidak ditemukan korelasi yang kuat antara nilai tahanan ujung dan tahanan friksi dari metode van Weele, M-K, PDA, dan Decourt. Beban ultimit berdasarkan metode Chin dan hasil uji PDA dinilai lebih mendekati dengan perkiraan desain metode Decourt.

KATA KUNCI: *Static Load Test* (SLT), *Pile Driving Analyzer* (PDA), tahanan ujung, tahanan friksi, daya dukung *ultimate*

1. PENDAHULUAN

Salah satu yang perlu diperhatikan saat pembangunan gedung yaitu desain pondasi. Perhitungan desain perlu untuk dimonitor dan diverifikasi di lapangan. Hal ini berguna untuk memastikan bahwa pondasi yang telah dibuat memang mampu menahan beban sesuai dengan yang direncanakan. Untuk mengetahui kapasitas daya dukung pondasi tiang pancang, dilakukan tes pada pondasi untuk melihat kelayakan pondasi dan tanah pada proyek. Adapun pengujian yang sering dijumpai pada proyek menggunakan *Static Loading Test* (SLT) dan juga *Pile Driving Analyzer* (PDA).

Metode tes pondasi dengan *Static Loading Test* (SLT) dilakukan dengan cara penambahan beban secara progresif dan memiliki siklus tertentu hingga mencapai target pembebanannya. Pada umumnya pembebanan yang dilakukan dengan beban dengan kelipatan tiap 25% hingga mencapai 200% dari kapasitas beban rencana. Hasil uji pondasi dengan SLT dianggap menunjukkan kapasitas yang mendekati kapasitas sesungguhnya dibandingkan dengan pengujian metode dinamis (Huat et al., 2021). Pada metode SLT ini dibutuhkan waktu yang lebih lama dan biaya yang lebih besar daripada menggunakan metode dinamis.

Pile Driving Analyzer (PDA) merupakan sebuah pengembangan metode pengujian tiang pancang dari metode dinamis, dimana *Pile Driving Analyzer* dapat mengevaluasi secara langsung tekanan yang didapat, efisiensi *hammer* dan hal-hal lainnya. Metode ini bisa dikatakan lebih efisien karena hasil dari pengujian ini dapat langsung dilihat dalam program komputer. Dengan adanya pengembangan metode

¹ Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, b11170025@john.petra.ac.id

² Mahasiswa Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, b11170055@john.petra.ac.id

³ Dosen Program Studi Teknik Sipil Universitas Kristen Petra, gogot@petra.ac.id

dinamis ini, pengujian tiang pancang menggunakan metode PDA menjadi salah satu alternatif yang dapat dilakukan untuk memverifikasi kapasitas tiang (Rajagopal et al., 2012).

Daya dukung tiang pancang dapat dibagi menjadi dua komponen, yaitu tahanan friksi (*skin friction*) dan tahanan ujung (*end bearing*). Penjumlahan kedua nilai tersebut menghasilkan daya dukung *ultimate* dari suatu tiang pancang. Ketiga nilai tersebut (*skin friction*, *end bearing*, dan daya dukung *ultimate*) dapat diverifikasi melalui uji SLT dan PDA. Beberapa metode yang diusulkan untuk melihat komponen daya dukung melalui uji SLT berasal dari van Weele (1957) dan Meyer dan Żarkiewicz (2018). Sementara itu, nilai *skin friction* dan *end bearing* juga dapat diverifikasi secara langsung melalui uji PDA.

Beberapa penelitian telah dilakukan untuk melihat hubungan antara daya dukung tiang hasil SLT dan PDA. Budi et al. (2015) meneliti tentang hasil SLT dan PDA pondasi tiang yang tertanam di tanah lempung dan pasir. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa kapasitas tiang *ultimate* pada tanah lempung berdasarkan metode PDA lebih bervariasi dibandingkan dengan metode SLT, sementara pada tanah berpasir kapasitas tiang *ultimate* menurut PDA lebih kecil dibandingkan dengan metode SLT. Akan tetapi, penelitian lain menunjukkan prediksi kegagalan tiang menurut metode PDA dan SLT dinilai cukup konsisten, dengan nilai daya dukung SLT memiliki nilai sedikit lebih besar dibandingkan PDA (Phetteplace et al., 2019). Dari 303 sampel, hasil uji PDA dengan menggunakan CAPWAP menghasilkan nilai rata-rata rasio CAPWAP/SLT 0.98 dan memiliki variansi 0.169 (Likins dan Rausche, 2004). Penelitian lain juga menunjukkan penurunan dari hasil uji SLT dan PDA selaras pada beban yang kecil. Akan tetapi, penurunan pada hasil uji PDA menjadi lebih kecil dibanding SLT ketika beban bertambah (Rajagopal et al., 2012).

Terkait dengan perbandingan desain dan uji di lapangan, penelitian dari Ramli (2006) mencoba membandingkan nilai tahanan ujung dan friksi dari hasil desain menggunakan metode Meyerhoff, Janbu, Vessic, dan Coyle dan Castella dengan hasil dari pengujian PDA. Hasilnya, metode dari Meyerhoff atau Janbu direkomendasikan untuk menganalisa nilai *end-bearing* di tanah berpasir, dan metode Meyerhoff untuk menganalisa nilai *skin friction* di tanah berpasir. Penelitian lain dari Budi et al. (2015) mencoba menginterpretasi hasil uji SLT untuk melihat daya dukung *ultimate* tiang pancang. Penelitian tersebut menunjukkan metode dari Davisson dan Chin untuk menginterpretasi hasil uji SLT dinilai lebih akurat dengan hasil desain tiang pancang.

Walau begitu, belum ada penelitian yang mencoba untuk membandingkan komponen daya dukung tiang pancang dari hasil uji SLT, PDA, dan hasil desain perencanaan secara bersamaan. Pertama, penelitian ini ingin melihat perbedaan *settlement* dari hasil uji SLT dan PDA pada beban yang sama. Penelitian mengenai hal tersebut pernah dilakukan oleh Rajagopal et al. (2012), tetapi hanya dengan 3 sampel tiang pancang. Selain itu, penelitian ini hendak mengidentifikasi dan menganalisis hubungan komponen daya dukung pondasi tiang yaitu tahanan friksi (*skin friction*) dan tahanan ujung tiang (*end bearing*) antara hasil uji SLT, PDA dan desain perencanaan. Terakhir, penelitian ini hendak melihat daya dukung *ultimate* dari tiang pancang berdasarkan hasil uji SLT, PDA, dan desain perencanaan.

2. LANDASAN TEORI

2.1. Static Loading Test (SLT)

Uji *Static Loading Test* (SLT) dilakukan untuk menentukan kapasitas total tiang pancang dibandingkan dengan penurunan tiang tersebut. Kegagalan tiang pancang ditentukan dari nilai *creep* yang berlebih atau penurunan pada ujung atas tiang pancang sebesar 10% dari diameter dasar tiang (Vrettos, 2021). Pada beban 200%, terdapat batasan deformasi yang diijinkan oleh SNI 8460:2017, yaitu 25 mm untuk tiang dengan diameter 80 cm, dan 4% dari diameter jika diameter tiang lebih dari 80 cm. Selain itu, deformasi permanen setelah pelepasan beban tidak boleh melebihi 12 mm.

2.2. Pile Driving Analyzer (PDA)

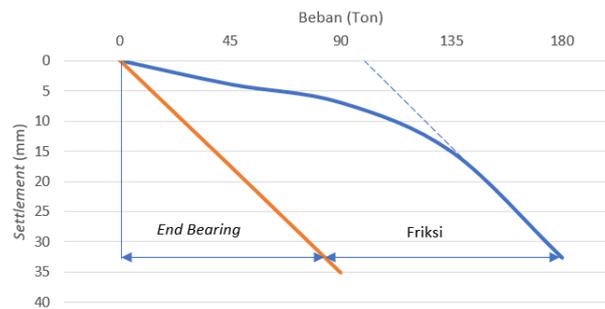
Uji *Pile Driving Analyzer* (PDA) menggunakan data digital dari komputer yang diperoleh dari *strain transducer* dan *accelerometer* (Tarigan, 2020). Pengujian PDA didasarkan pada ASTM D4945-12. Pengujian dilakukan dengan *hammer* seberat 1-2% dari beban *ultimate* rencana. Menurut SNI 8460:2017, metode pembebanan dinamik hanya digunakan sebagai pembandingan dari percobaan SLT (Badan Standardisasi Nasional, 2017). Jumlah uji tiang pada pembebanan dinamik paling tidak sebanyak 4 x 40% dari yang disyaratkan pada jumlah tiang SLT, sementara 60% tetap menggunakan metode SLT

2.3. Penentuan Daya Dukung Tiang Pancang

Pada metode PDA, nilai tahanan friksi dan tahanan ujung dapat ditunjukkan melalui alat tersebut. Sementara itu, pada metode SLT, pembacaan alat hanya memberikan nilai tahanan total saja. Pada uji *Static Loading Test* dibutuhkan analisis lebih lanjut. Untuk mengetahui nilai tahanan friksi dan tahanan ujung melalui metode SLT, terdapat beberapa usulan.

van Weele

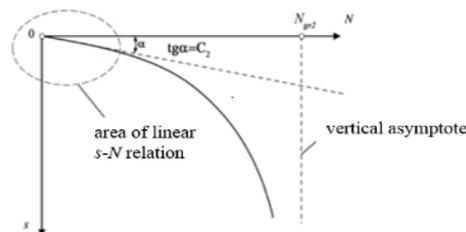
van Weele (1957) menggambarkan tahanan total dari sebuah tiang pancang dan memisahkannya menjadi tahanan friksi dan tahanan ujung tiang. Dimana tahanan friksi akan bertambah seiring dengan penambahan beban pada kepala tiang dan akan mencapai maksimal (kurva menjadi linear) sehingga tidak ada penambahan friksi melainkan tahanan ujung akan bertambah secara linear (**Gambar 1**).



Gambar 1. Contoh Ilustrasi Metode van Weele

Metode M-K

Metode yang diusulkan oleh Meyer dan Kowalów menghitung tahanan ujung berdasarkan kurva yang diusulkan oleh mereka (Meyer, 2014). Metode ini kemudian diperbaharui untuk dapat menentukan nilai tahanan ujung dan tahanan friksi dari tiang (Meyer dan Żarkiewicz, 2018). Metode tersebut membentuk sebuah kurva yang seperti yang digambarkan **Gambar 2**. Adapun kurva tersebut didasarkan pada **Persamaan 1**.



Gambar 2. Kurva M-K

$$s(N) = C \cdot N_{gr} \cdot \frac{\left(1 - \frac{N}{N_{gr}}\right)^{k-1}}{k} \quad (1)$$

Keterangan:

s : penurunan kepala tiang di tahap tertentu (mm)

- N : beban yang diberikan pada kepala tiang pondasi (kN)
 C : invers dari konstanta Winkler (mm/kN)
 N_{gr} : adalah beban kritis (kN)
 k : parameter konstanta tidak berdimensi

Persamaan 1 dapat dipecah menjadi 2 persamaan yang mengukur nilai tahanan total (**Persamaan 2**) dan tahanan ujung (**Persamaan 3**) dari suatu tiang. Pengurangan nilai tahanan total dan tahanan ujung akan memberikan nilai tahanan friksi (**Persamaan 4**) pada suatu tiang. Dalam menentukan nilai C₁, N_{gr1}, dan k₁ digunakan korelasi dengan nilai C₂, N_{gr2}, dan k₂ seperti pada **Persamaan 5**, **Persamaan 6**, dan **Persamaan 7** (Siemaszko dan Meyer, 2019).

$$N_2(s) = N_{gr2} \cdot \left(1 - \left(1 + \frac{k_2 \cdot s}{C_2 \cdot N_{gr2}}\right)^{-\frac{1}{k_2}}\right) \quad (2)$$

$$N_1(s) = N_{gr1} \cdot \left(1 - \left(1 + \frac{k_1 \cdot s}{C_1 \cdot N_{gr1}}\right)^{-\frac{1}{k_1}}\right) \quad (3)$$

$$T(s) = N_2(s) - N_1(s) \quad (4)$$

$$\frac{C_1}{C_2} = (1 + k_2)^2 \quad (5)$$

$$k_1 = \ln(1 + k_2) \quad (6)$$

$$N_{gr1} = N_{gr2} \cdot \frac{1+k_1}{(1+k_2)^2} \quad (7)$$

2.4. Perhitungan Tahanan Total

Metode Chin

Analisis tahanan total tiang pondasi dengan metode Chin dinilai lebih mendekati dengan hasil uji SLTnya (Budi et al., 2015). Pada metode Chin data yang diperlukan yaitu beban dan penurunan yang terjadi (Fellenius, 1980). Nilai penurunan dibagi dengan beban ($\frac{\Delta}{P}$) pada axis Y dan nilai penurunan (Δ) pada axis X. Hasil dari pengukuran SLT di-plot untuk menemukan persamaan garis liniernya. Setelah menentukan persamaan garis liniernya, untuk mendapatkan nilai tahanan ultimit tiang bisa didapatkan

Metode Decourt

Analisis perhitungan desain kapasitas tiang pondasi dianalisis dengan metode Decourt. Menurut Luciano Decourt, diperlukan data tanah dengan pengujian SPT (Purba et al., 2017). Adapun perhitungan total kapasitas desain tiang dihitung dari **Persamaan 8**. Sementara itu, nilai tahanan ujung dihitung dengan **Persamaan 9** dan nilai tahanan friksi dihitung dengan **Persamaan 10**.

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (8)$$

$$Q_p = N_p \cdot K \cdot A_p \quad (9)$$

$$Q_s = \left(\left(\frac{N_s}{3}\right) + 1\right) \cdot A_s \quad (10)$$

Keterangan:

- Q_u : beban ultimit (ton)
 Q_p : tahanan ujung (ton)
 Q_s : tahanan friksi (ton)
 N_p : nilai rata-rata SPT pada ujung tiang
 K : nilai koefisien tanah (ton/m²)
 A_p : luasan pada ujung tiang (mm²)
 N_s : nilai rata-rata SPT sepanjang tiang
 A_s : luasan selimut tiang (mm²)

3. METODOLOGI PENELITIAN

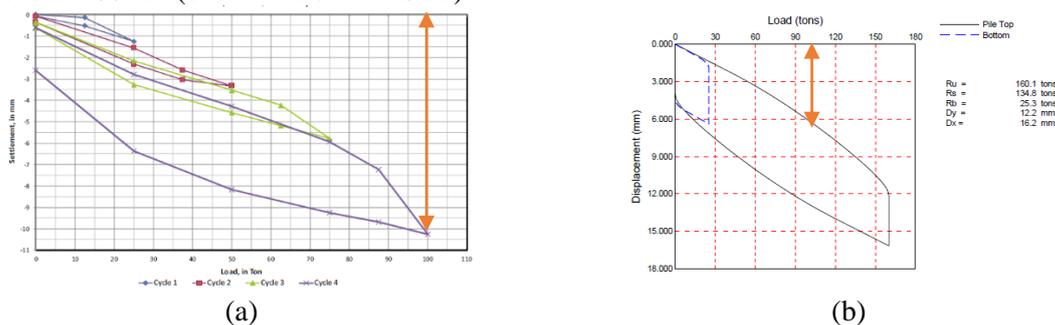
Data yang diambil berupa data sekunder dari salah satu perusahaan pemancangan di Surabaya. Data yang diambil merupakan hasil SLT dan PDA pada tiang pancang yang sama, juga data tanah di mana tes dilakukan. Penelitian ini menggunakan 21 data tiang pancang pracetak yang tersebar di 11 proyek di seluruh Indonesia. Tiang pondasi pracetak berbentuk kotak dengan ukuran 250x250 mm² sampai 450x450 mm². Untuk tiang silinder memiliki diameter 400 sampai 600 mm. Seluruh tiang pancang ditanamkan ke tanah dengan cara ditekan.

Penentuan nilai tahanan ujung dan tahanan friksi akan didasarkan pada metode dari van Weele (1957) dan metode M-K (Meyer dan Stachecki, 2020; Meyer dan Żarkiewicz, 2018). Pertama, penurunan tiang pada uji SLT dan PDA dibandingkan. Selanjutnya nilai tahanan ujung dan tahanan friksi dari kedua metode berdasarkan SLT akan dibandingkan dengan hasil yang didapat dari pembacaan alat PDA dan perhitungan desain dengan metode Decourt. Selanjutnya, membandingkan kapasitas total tiang dari metode Chin, M-K, hasil perhitungan desain dengan Decourt dan hasil uji PDA.

4. ANALISIS DAN PEMBAHASAN

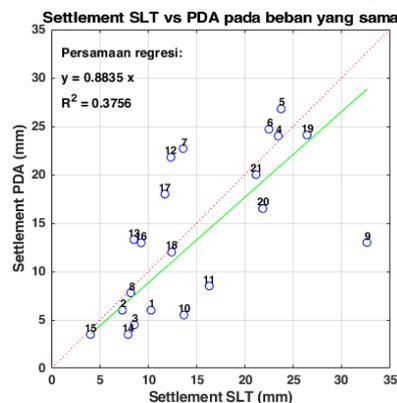
4.1. Penurunan Tiang yang Sama

Penurunan tiang pancang pada beban dan tiang yang sama diukur dengan 2 cara, yaitu penurunan total dari tes SLT dan penurunan dari tes PDA. Tiap titik penurunan diambil dari beban yang sama dari beban maksimum tes SLT atau PDA. Sebagai contoh pada **Gambar 3**, penurunan (panah warna oranye) diukur pada beban 100 ton (beban maksimum SLT).



Gambar 3. Pengambilan Titik Pembebanan dan Penurunan pada (a) Metode SLT dan (b) PDA

Dari hasil tes PDA dan SLT pada 21 data tiang pancang yang sama, didapatkan grafik kurva perbandingan penurunan pada beban yang sama dari hasil tes SLT dan PDA seperti pada **Gambar 4**. Berdasarkan gambar tersebut, terdapat 13 tiang dengan penurunan uji SLT lebih besar. Selain itu, garis hijau menunjukkan penurunan dengan tes SLT cenderung lebih besar daripada menggunakan tes PDA, dengan koefisien gradien garis sebesar 0.8835 (sudut 41.46°) dengan nilai $R^2 = 0.3756$.



Gambar 4. Perbandingan Penurunan SLT dan PDA pada Beban yang Sama

4.2. Perbandingan Komponen Daya Dukung Tiang

Hasil perhitungan daya dukung tiang pancang berdasarkan berbagai metode disajikan pada **Tabel 1**. Perhitungan menggunakan metode van Weele dan metode M-K menggambarkan relatif lebih besar tahanan ujungnya dibanding dengan tahanan friksinya. Hal ini dikarenakan uji SLT di lapangan hanya sampai dengan beban maksimum rencana, sedangkan pada literatur diisyaratkan tiang uji dibebani hingga beban runtuh (van Weele, 1957). Analisis dengan metode M-K juga menghasilkan nilai tahanan ujung yang cenderung lebih besar dibandingkan dengan tahanan friksinya karena beban pada tiang uji masih belum mendekati kapasitas maksimumnya atau beban runtuh.

Tabel 1. Pengelompokan Tiang Berdasarkan Komponen Daya Dukung

No	Van Weele		M-K		PDA		Decourt	
1	End Bearing	57%	End Bearing	99%	Friksi	84%	Friksi	81%
2	End Bearing	52%	End Bearing	98%	Friksi	87%	Friksi	81%
3	Friksi	55%	End Bearing	99%	Friksi	83%	Friksi	81%
4	End Bearing	57%	Friksi	64%	Friksi	81%	End Bearing	70%
5	End Bearing	62%	End Bearing	100%	Friksi	62%	Friksi	63%
6	End Bearing	63%	End Bearing	100%	End Bearing	56%	Friksi	65%
7	Friksi	81%	End Bearing	100%	Friksi	95%	End Bearing	68%
8	End Bearing	62%	Friksi	94%	Friksi	91%	Friksi	64%
9	Friksi	53%	End Bearing	95%	End Bearing	64%	End Bearing	69%
10	End Bearing	64%	Friksi	95%	Friksi	83%	Friksi	64%
11	End Bearing	51%	End Bearing	100%	Friksi	87%	Friksi	82%
12	End Bearing	53%	End Bearing	99%	Friksi	90%	Friksi	74%
13	Friksi	73%	End Bearing	99%	Friksi	77%	Friksi	74%
14	Friksi	55%	Friksi	94%	Friksi	65%	End Bearing	91%
15	End Bearing	79%	Friksi	95%	Friksi	80%	End Bearing	92%
16	End Bearing	53%	End Bearing	100%	End Bearing	72%	End Bearing	52%
17	End Bearing	58%	End Bearing	99%	End Bearing	88%	End Bearing	59%
18	End Bearing	67%	Friksi	94%	End Bearing	74%	End Bearing	50%
19	End Bearing	81%	End Bearing	88%	Friksi	54%	Friksi	50%
20	End Bearing	72%	Friksi	93%	Friksi	87%	Friksi	55%
21	End Bearing	57%	End Bearing	84%	Friksi	74%	Friksi	50%

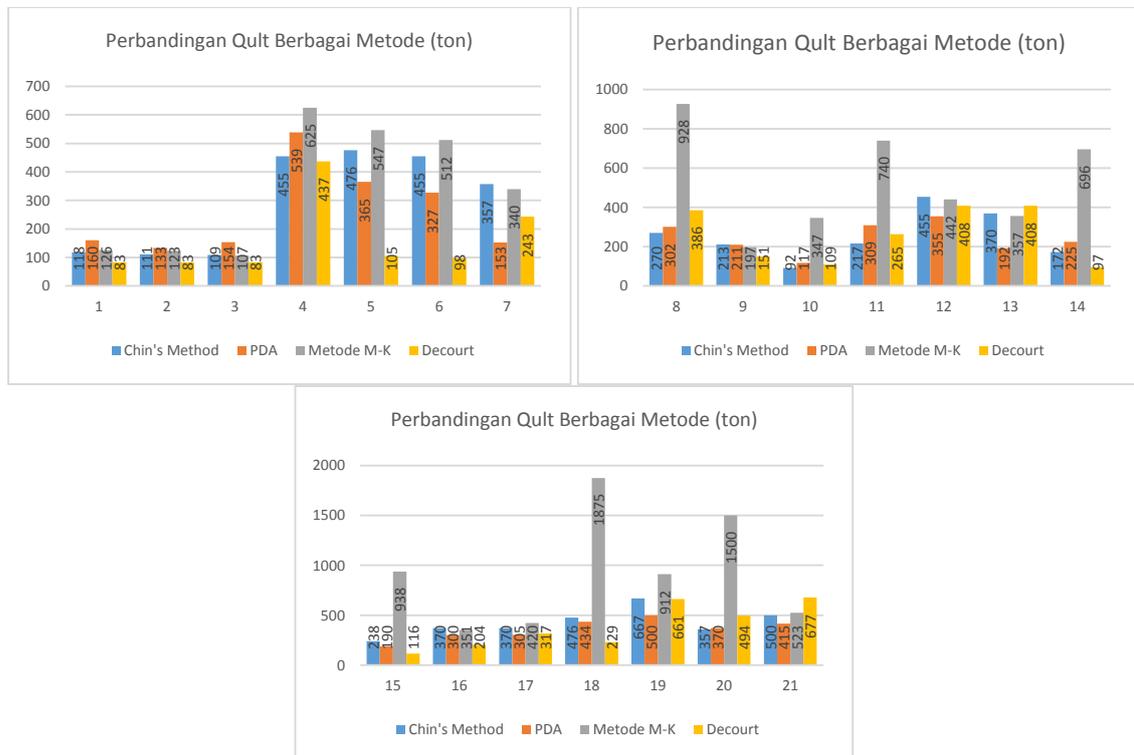
Kapasitas rencana pondasi tiang diperoleh dengan metode Decourt digunakan sebagai pembanding komponen daya dukung dengan hasil analisis metode van Weele dan metode M-K. Untuk membantu analisis kapasitas rencana diperlukan adanya data tanah dari pondasi tiang masing masing. Dari 16 tiang yang memiliki karakteristik yang sama antara Decourt dan PDA, terdapat 8 tiang pondasi yang hasil persentasenya mendekati.

Secara keseluruhan, analisis perhitungan dengan metode van Weele dan M-K tidak memiliki korelasi yang kuat dengan hasil analisis desain dari metode Decourt. Hasil uji tiang dengan PDA dinilai lebih mendekati hasil analisis perhitungan desain pondasi dengan metode Decourt. Dimana dari 21 tiang, terdapat 16 tiang dengan kesamaan jenis dari perhitungan desain metode Decourt dan hasil uji PDA.

4.3. Hasil Perbandingan Daya Dukung Total Tiang

Dari perbandingan daya dukung ultimit tiang pancang pada **Gambar 5**, terdapat beberapa tiang pancang yang nilainya ultimitnya saling mendekati, dan beberapa tiang pancang yang nilainya bervariasi. Nilai-nilai yang bervariasi umumnya berasal dari metode M-K dan perumusan Decourt. Pada metode M-K, ketika data pembebanan dan penurunan masih dalam daerah yang linier (sifat penurunan masih elastis), nilai N_{gr2} (beban *ultimate*) cukup sulit untuk diprediksi. Akibatnya, didapatkan 6 tiang pancang dengan

nilai N_{gr2} yang tidak akurat. Hal ini sejalan dengan penelitian yang dilakukan oleh Meyer dan Stachecki (2020).



Gambar 5. Hasil Perbandingan Daya Dukung Total Berbagai Metode (ton)

Untuk metode Decourt, perumusan Decourt sangat sensitif pada lapisan tanah di ujung tiang, terutama pada nilai K di ujung tiang tertanam. Sementara itu, pada suatu data tanah, terdapat kemungkinan adanya lapisan-lapisan lensa pasir dengan nilai kekuatan yang tinggi, terpit lapisan dengan nilai kekuatan yang lebih rendah. Sehingga, tiang pancang dengan kedalaman yang memiliki beda sedikit, dapat memiliki nilai Q_b yang jauh berbeda walaupun nilai Q_s mereka masih mendekati, menghasilkan nilai Qult yang jauh berbeda pula.

5. KESIMPULAN

Nilai penurunan tiang pada uji *Static Load Test* (SLT) dibandingkan dengan *Pile Driving Analyzer* (PDA) pada beban yang sama menghasilkan nilai *settlement* SLT sedikit lebih besar dibanding PDA dengan nilai gradien 0.8835 (sudut 41.46°) dan nilai $R^2 = 0.3756$.

Tidak ditemukan korelasi antara komponen daya dukung tiang berdasarkan van Weele dan M-K dengan nilai PDA maupun Decourt. Hal ini dikarenakan pada data pembebanan SLT, banyak tes yang tidak dilakukan hingga tiang mengalami kegagalan atau penurunan yang besar. Analisis dengan metode Van Weele dinilai kurang cocok pada kasus tiang pancang yang langsing ataupun jenis tanah yang bervariasi (Gould, 1981). Hasil komponen daya dukung dari uji PDA cenderung lebih mendekati nilai desain perhitungan berdasarkan metode Decourt.

Daya dukung ultimit tiang yang dianalisis menggunakan metode Chin, hasil uji PDA dan desain rencana menggunakan metode Decourt cenderung memiliki nilai kapasitas maksimum yang mendekati. Nilai daya dukung tiang yang dianalisis menggunakan metode M-K cenderung menghasilkan nilai yang lebih besar karena pembebanan pada tiang masih berada pada daerah elastisnya sehingga sulit untuk memprediksi nilai ultimitnya (Meyer dan Stachecki, 2020).

6. DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8460-2017 Persyaratan Perancangan Geoteknik*. BSN, Jakarta, Indonesia.
- Budi, G. S., Kosasi, M., dan Wijaya, D. H. (2015). "Bearing Capacity of Pile Foundations Embedded in Clays and Sands Layer Predicted Using PDA Test and Static Load Test." *Procedia Engineering*, Vol. 125, 406–410.
- Fellenius, B. H. (1980). "The Analysis of Results From Routine Pile Load Tests." *Ground Engineering*, Vol 13, No. 6, 19–31.
- Gould, R. A. (1981). Foundation Design and Construction: Book review. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 18, No. 3 471–472.
- Huat, C. Y., Moosavi, S. M. H., Mohammed, A. S., Armaghani, D. J., Ulrikh, D. V., Monjezi, M., dan Lai, S. H. (2021). "Factors Influencing Pile Friction Bearing Capacity: Proposing a Novel Procedure Based on Gradient Boosted Tree Technique." *Sustainability (Switzerland)*, Vol. 13, No. 21.
- Likins, G. dan Rausche, F. (2004). "Correlation of CAPWAP With Static Load Tests." *Proceedings of the Seventh International Conference on the Application of Stresswave Theory to Piles, Kuala Lumpur, Malaysia*, 9 Agustus.
- Meyer, Z. (2014). "Static Load Tests, Short Series Interpretation." *Studia Geotechnica et Mechanica*, 45–49.
- Meyer, Z. dan Stachecki, K. (2020). "Analysis of the Static Load Test Results Referred to Limit the Bearing Capacity of a Pile." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 960, No. 2, 1–8.
- Meyer, Z., dan Żarkiewicz, K. (2018). "Skin and Toe Resistance of Pile During Laboratory Static Load Test." *Studia Geotechnica et Mechanica*, 1–5.
- Phetteplace, B., Hyatt, T., dan Alvarez, C. (2019). *Dynamic and Static Load Testing: A Cost Saving Approach*. <<http://www.pile.com/wp-content/uploads/2019/10/Dynamic-and-Static-Load-Testing-A-Cost-Savings-Approach.pdf>> (4 Februari 2022).
- Purba, J., Rangkuti, N. M., dan Ardan, M. (2017). "Analisis Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Pada Proyek Pembangunan Perhotelan/Apartemen/Kondominium di Jalan Ring Road Medan." *Journal of Civil Engineering, Building and Transportation*, Vol. 1, No. 1, 19-26.
- Rajagopal, C., Solanki, C. H., dan Tandel, Y. K. (2012). "Comparison of Static and Dynamic Load Test of Pile." *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 17 (March), 1905–1914.
- Ramli, M. H. Bin. (2006). *A Comparison of Pile Performance Base on Static Formulas and Dynamic Load Test*. Thesis, Universiti Teknologi Malaysia, Johor Bahru.
- Siemaszko, P., dan Meyer, Z. (2019). "Static Load Test Curve Analysis Based on Soil Field Investigations." *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences*, Vol. 67, No. 2, 329–337.
- Tarigan, R. (2020). "Komparasi Kinerja Alat Pile Driving Analyzer Dan Software CAPWAP Dalam Menghasilkan Daya Dukung Ultimit Pondasi Tiang." *Jurnal Darma Agung*, Vol. 28, No. 3, 378-386.
- Van Weele, A. F. (1957). "A Method of Separating the Bearing Capacity of a Test Pile into Skin Friction and Point Resistance." *Proceedings of the Fourth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, London, United Kingdom, Agustus 1957*.
- Vrettos, C. (2021). Design of Piles for Static Loads. Dalam A. M. Kaynia (Ed.), *Analysis of Pile Foundations Subject to Static and Dynamic Loading*, CRC Press, Boca Raton, Amerika Serikat.