

ANALISIS PERBANDINGAN DAYA DUKUNG PONDASI TIANG PANCANG BERDASAR HASIL UJI SPT DAN PENGUJIAN DINAMIS

Hinawan Teguh Santoso¹, Juandra Hartono²

^{1,2}Prodi Teknologi Konstruksi Jalan dan Jembatan, Politeknik Pekerjaan Umum
Jl. Prof. Soedharto, SH, Tembalang, Semarang
Email: ¹hteguhsantoso@gmail.com, ²docyuandra@gmail.com

ABSTRACT

The foundation work is one of the main works in bridge construction. Failure of the foundation will be fatal for the entire bridge construction. Therefore, it is necessary to test the bearing capacity of the pile to determine the installed foundation capacity. The most accurate and most expensive method for determining the bearing capacity of a pile is a static load test, which is a full-scale trial method of giving a load 2 or 3 times greater than the designed load. Another method that is more economical and entirely accurate is using the High Strain Dynamics Pile Test (HSDPT) or often called the Pile Driving Analyzer (PDA) Test. This PDA test took a sample of 18 points of 600 mm diameter pre-stressed concrete piles on the Kaligawe Bridge located on Jalan Kaligawe KM 2+350, Semarang, Central Java. Based on the core drilling results, the soil layer was dominated by clay with an N-SPT value < 30 to a depth of 45 meters. The average bearing capacity of PDA test results is 432.4 tons or 0.4% greater when compared to the empirical approach based on N-SPT value (430.7 tons). The bearing capacity of the CAPWAP analysis is 401.0 tons or 7.3% less when compared to the PDA test, because the PDA test results are further processed using Signal Matching Analysis (SMA). CAPWAP analysis shows that the bearing capacity of piles is dominated by friction resistance by 71.7% and end resistance by 28.3% or by 4.4% difference when compared to the empirical approach, where the friction resistance value is 67.3% and end resistance is 32.7%. In general, it can be said that the PDA test is reliable enough to confirm the bearing capacity of the pile foundation that has been installed in the field.

Keywords: pre-stressed concrete pile, bearing capacity, PDA test, bridge

ABSTRAK

Pekerjaan pondasi merupakan salah satu pekerjaan utama pada konstruksi jembatan. Kegagalan pondasi akan berakibat fatal bagi keseluruhan konstruksi jembatan. Oleh karena itu, perlu dilakukan pengujian daya dukung tiang untuk mengetahui kapasitas pondasi terpasang. Metode pengukuran daya dukung tiang paling akurat namun juga termahal dengan pembebanan secara statik, yaitu metode uji coba skala penuh dengan memberikan beban 2 atau 3 kali lebih besar dari beban rencana. Metode lain yang lebih ekonomis dan cukup akurat dengan menggunakan *High Strain Dynamics Pile Tests (HSDPT)* atau sering disebut *Pile Driving Analyzer (PDA) Test*. Uji PDA ini mengambil sampel 18 titik pondasi tiang pancang beton diameter 600 mm pada Jembatan Kaligawe yang terletak Jalan Kaligawe KM 2+350, Semarang, Jawa Tengah. Berdasarkan hasil pengeboran inti, lapisan tanah didominasi oleh lempung (*clay*) dengan nilai N-SPT < 30 hingga kedalaman 45 meter. Daya dukung rerata hasil uji PDA sebesar 432,4 ton atau lebih besar 0,4% bila dibandingkan dengan pendekatan empiris berdasar nilai N-SPT (430,7 ton). Daya dukung hasil analisis CAPWAP sebesar 401,0 ton atau lebih kecil 7,3% jika dibandingkan dengan uji PDA, dikarenakan hasil uji PDA diproses lebih lanjut dengan menggunakan *Signal Matching Analysis (SMA)*. Analisis CAPWAP menggambarkan daya dukung tiang didominasi oleh tahanan lekatan selimut sebesar 71,7% dan tahanan ujung sebesar 28,3% atau terdapat selisih 4,4% bila dibandingkan dengan pendekatan empiris, dimana nilai tahanan selimut sebesar 67,3% dan tahanan ujung sebesar 32,7%. Secara umum, dapat dikatakan bahwa uji PDA cukup handal untuk mengkonfirmasi besaran daya dukung pondasi tiang yang telah terpasang di lapangan.

Kata kunci: tiang pancang beton pratekan, daya dukung, uji PDA, jembatan

1. PENDAHULUAN

Setiap tahapan pembangunan jembatan mulai dari pondasi, bangunan bawah hingga bangunan atas harus dilaksanakan secara benar mengikuti ketentuan yang ada dalam gambar dan spesifikasi teknis. Pekerjaan pondasi

Hinawan Teguh Santoso

E-mail Address : hteguhsantoso@gmail.com

jembatan misalnya, merupakan pekerjaan utama yang harus dilakukan dengan sangat serius dan hati-hati karena kegagalan pondasi akan berakibat fatal bagi keseluruhan konstruksi jembatan.

Kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi konstruksi pada saat ini memicu perkembangan konstruksi jembatan bentang panjang dengan menggunakan struktur pondasi dalam dikarenakan besarnya beban vertikal dan beban lateral yang diterima oleh pondasi. Pondasi tiang pancang merupakan salah satu jenis pondasi dalam yang berfungsi menerima dan menyalurkan beban dari struktur atas ke tanah pada kedalaman tertentu, biasanya karena lapisan tanah keras terletak sangat dalam. Selain mendukung konstruksi jembatan dalam menahan beban vertikal, pondasi tiang juga berperan penting dalam menahan beban lateral akibat timbunan, beban hanyutan, beban rem, beban angin dan beban gempa. Kondisi geografis Indonesia yang berada di daerah rawan gempa mensyaratkan betapa pentingnya suatu perencanaan dan pengujian pada pondasi untuk mengetahui besaran daya dukung pondasi yang ada.

Jenis pondasi tiang pancang biasanya digunakan pada daerah dengan kondisi lapisan tanah keras terletak pada kedalaman lebih dari 10 meter. Stabilitas jembatan sangat tergantung pada daya dukung pondasinya, maka untuk menentukan stabilitas dan kapasitas pondasi, daya dukung individu pondasi tiang harus diketahui terlebih dahulu. Setelah diketahui daya dukung tiang secara akurat, maka margin batas bawah faktor keamanan dapat dipakai dalam perencanaan pondasi sehingga akan diperoleh struktur pondasi yang aman dan lebih ekonomis. Setelah pondasi terpasang maka perlu juga dilakukan pengujian untuk mengkonfirmasi besarnya daya dukung pondasi terpasang secara aktual. Metode pengujian daya dukung pondasi paling terpercaya dan belum tergantikan yaitu dengan pembebanan statik, berupa metode uji beban skala penuh. Namun demikian, metode ini mempunyai beberapa kekurangan, diantaranya adalah waktu yang lama dan biaya yang relatif besar. Metode lain yang lebih efisien dapat digunakan metode pembebanan dinamis. Namun, seberapa ketepatan dan kehandalan daya dukung pondasi yang didapatkan dari metode pembebanan dinamis ini terhadap daya dukung pondasi rencana berdasarkan perhitungan pendekatan empiris akan dikaji pada tulisan ini.

Penelitian ini akan mendeskripsikan pengujian dinamis pada pondasi tiang pancang jembatan, membandingkan besaran daya dukung berdasar pendekatan empiris dan hasil pengujian dinamis, serta menarik kesimpulan dari hasil komparasi yang dilakukan. Penelitian terdahulu telah dilakukan oleh Yusa (2007) dan Bachtiar (2012) dengan membandingkan daya dukung pondasi tiang dengan metode analisis empiris berdasar data *CPT* terhadap hasil *PDA* dan *CAPWAP*, dengan besaran hasil daya dukung tersebut saling mendekati dan berkorelasi sebesar 95,7% - 97,4%. Yusti (2013) melakukan kajian perhitungan daya dukung pondasi tiang pancang dengan cara empiris berdasar data *N-SPT* dan diverifikasi dengan hasil uji *PDA* dan *CAPWAP*. Hasil studi menunjukkan bahwa daya dukung tiang pancang yang dihitung berdasar data *N-SPT* mendekati nilai daya dukung ultimit hasil uji *PDA* dan *CAPWAP*. Studi lain dilakukan Lailaningrum dkk (2014) mengenai perbandingan kapasitas daya dukung pondasi antara rumus statis, hasil uji *SPT*, dan hasil uji *PDA* pada pondasi *minipile* menunjukkan hasil dimana daya dukung hasil uji *SPT* mendekati nilai hasil uji *PDA*. Maizir (2015) juga melakukan analisis daya dukung pondasi tiang pancang dengan menggunakan 3 metode, yaitu pendekatan empiris, *PDA*, dan *CAPWAP* dengan hasil daya dukung tiang yang juga relatif sama (selisih kurang dari 1%). Haryanto (2019) melakukan kajian perbandingan daya dukung fondasi tiang berdasar data uji laboratorium, uji *SPT*, uji kalendering dan uji *PDA* diperoleh kesimpulan bahwa hasil daya dukung berdasar uji *SPT* dan uji kalendering memberikan hasil mendekati daya dukung hasil uji *PDA*. Penelitian lain juga dilakukan oleh Khomsati, dkk (2019) mengenai perbandingan daya dukung aksial tiang bor tunggal menggunakan data *SPT* dan uji *PDA* didapatkan kesimpulan bahwa daya dukung pondasi yang dihitung berdasar data *N-SPT* dengan metode Mayerhof memberikan hasil paling mendekati daya dukung ultimit hasil uji *PDA*.

Studi kasus pada penelitian ini merujuk hasil pengujian dinamis pada paket Penggantian Jembatan Kaligawe yang terletak di Jalan Kaligawe KM 2+350, Semarang, Jawa Tengah. Jembatan Kaligawe direncanakan menggunakan pondasi tiang pancang beton pratekan dengan diameter 600 mm dan dipancang hingga kedalaman rencana 45 meter.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Daya Dukung Pondasi

Daya dukung pondasi merupakan kemampuan pondasi dalam memikul tekanan atau beban maksimum yang diijinkan bekerja berdasarkan kondisi tanah di mana pondasi tersebut ditempatkan. Parameter dan sifat fisik tanah diperoleh melalui penyelidikan geoteknik tanah, misalnya: sondir (*CPT*), pemboran inti (*SPT*), dan pengujian di laboratorium. Rumus umum yang digunakan untuk menghitung daya dukung aksial pondasi dalam, yaitu (Das, 2016):

$$Q_u = Q_p + Q_s \\ = (f_p + A_p) + (f_s \times A_s) \quad (1)$$

dengan Q_u = daya dukung ultimit pondasi (ton), Q_p = daya dukung ujung tiang (ton), f_p = tahanan pada ujung tiang (ton/m^2), A_p = luas penampang dasar tiang (m^2), Q_s = tahanan gesekan selimut tiang (ton), dan f_s = tahanan friksi pada selimut tiang (ton/m^2), dan A_s = luas selimut tiang (m^2).

Perhitungan daya dukung pondasi tiang dengan menggunakan pendekatan empiris berdasarkan nilai SPT (*Standart Penetration Test*) diberikan dalam beberapa metode, yaitu (Randyanto dkk, 2015 dan Putri dkk, 2018):

- Metode Meyerhoff (1976)

$$Q_u = (f_p + A_p) + (f_s \times A_s) = [0,4 \times N_p \times (L/d) \times A_p] + [0,5N \times A_s] \quad (2)$$

dengan N_p = harga N -SPT terkoreksi pada elevasi dasar tiang (2d ke bawah dan 10d ke atas dari ujung tiang), L = panjang tiang (m), d = diameter tiang (m), f_s = 0,2 N untuk tanah pasir dan 0,5 N untuk tanah lempung, serta N = harga N -SPT rata-rata.

- Metode Schmertmann (1978)

Schmertmann menggunakan korelasi N -SPT dengan tahanan konus untuk menentukan daya dukung gesekan selimut dan daya dukung ujung pondasi tiang. Tabel 1 menunjukkan nilai korelasi gesekan selimut dan tahanan ujung tiang pancang yang diusulkan oleh Schmertmann.

Tabel 1. Nilai Korelasi Gesekan Selimut Dan Tahanan Ujung Tiang Pancang menurut Schmertmann

Jenis Tanah	Klasifikasi Tanah	Gesekan Selimut (kg/cm ²)	Tahanan Ujung (kg/cm ²)
Pasir bersih*	GW, GP, GM, SW, SP, SM	0,019 N	3,2 N
Lempung kelanauan bercampur pasir, pasir kelanauan, lanau	GC, SC, ML, CL	0,04 N**	1,6 N
Lempung plastis	CH, OH	0,05 N**	0,7 N
Batu gamping rapuh, pasir berkarang		0,01 N	3,6 N

* untuk $N > 60$, diambil $N = 60$
 ** dianjurkan direduksi untuk lempung kaku dan lempung kepasiran

- Metode Briaud, et al (1985)

$$Q_u = (f_p + A_p) + (f_s \times A_s) = [19,7 \times (N_p)^{0,36} \times \sigma_r \times A_p] + [0,224 \times (N_s)^{0,29} \times \sigma_r \times A_s] \quad (3)$$

dengan N_p = harga N -SPT terkoreksi pada elevasi dasar tiang (2d ke bawah dan 10d ke atas dari ujung tiang), σ_r = tegangan referensi (10 ton/m^2), dan N_s = harga N -SPT rata-rata.

- Metode L. Decourt (1987)

$$Q_u = (f_p + A_p) + (f_s \times A_s) = [k \times N_p \times A_p] + [0,224 \times (N_s/3 + 1) \times A_s] \quad (4)$$

dengan k = koefisien dari jenis tanah (lihat Tabel 2), N_p = harga N -SPT terkoreksi pada elevasi dasar tiang (4d ke bawah dan 4d ke atas dari ujung tiang), dan N_s = harga N -SPT rata-rata.

Tabel 2. Nilai Koefisien k menurut L. Decourt

Jenis Tanah	Nilai k (ton/m ²)
Lempung	12
Lanau berlempung	20
Lanau berpasir	25
Pasir dan kerikil	40

Metode Pengujian Daya Dukung Pondasi: PDA Test

Salah satu metode pengujian daya dukung pondasi yang mayoritas digunakan saat ini menggunakan metode uji dinamis dengan *High Strain Dynamics Pile Tests (HSDPT)* atau sering disebut *Pile Driving Analyzer (PDA) test*. Metode uji dinamis dinilai lebih ekonomis dan efisien dibandingkan dengan uji beban secara statis dengan hasil yang dapat diandalkan. Selain waktu pengujian relatif cepat, dimana dalam sehari dapat dilakukan pengujian beberapa tiang dan dapat dilaksanakan pada area kerja yang terbatas, uji *PDA* juga dapat mengevaluasi daya dukung aksial, integritas atau keutuhan tiang, serta mengevaluasi penurunan maksimum dan penurunan permanen dari pondasi tiang atau bor.

Nji (2012) menjelaskan bahwa analisis data *PDA* dilakukan dengan prosedur *Case Method* yang meliputi pengukuran data kecepatan (*velocity*) dan gaya (*force*) selama pelaksanaan pengujian (*re-strike*) dan perhitungan variabel dinamik secara *realtime* untuk mendapatkan gambaran tentang daya dukung pondasi tiang tunggal. Analisis lanjutan yang dilakukan adalah analisis *CAPWAP* yaitu metoda *signal matching analysis (SMA)* dengan menggunakan data hasil pengujian *PDA* untuk memberikan hasil analisis yang lebih detail, seperti: besaran tahanan ujung dan tahanan friksi pondasi tiang tunggal, efisiensi alat penumbuk, penurunan, serta simulasi *static loading test*.

Prosedur Pelaksanaan Pengujian

ASTM (2017) dalam standarnya D4945-17 memberikan penjelasan mengenai prosedur dan langkah pengujian dengan menggunakan *PDA test*. Pondasi tiang yang diuji sudah dalam keadaan tertanam kemudian tiang dipukul beberapa kali. Pukulan dihentikan setelah diperoleh kualitas rekaman yang cukup baik dan energi pukulan yang tinggi. Jumlah pukulan yang diperlukan ditentukan oleh fluktuasi besarnya energi yang sesungguhnya diterima oleh tiang. Kualitas rekaman juga tergantung dari ketepatan pemasangan instrumen serta kinerja komputer dan sistem elektronik. Apabila instrumen tidak terpasang dengan baik atau sistem komputer tidak bekerja seperti yang diharapkan, maka akan segera diketahui dari beberapa rekaman tumbukan awal. Berat pemukul (*hammer*) ideal untuk uji *PDA* disarankan sebesar 1-2% dari kapasitas pondasi tiang yang disyaratkan untuk dicapai. Sedangkan jumlah pondasi tiang yang akan diuji berkisar antara 1-2 % dari seluruh jumlah tiang pancang atau minimal 1 (satu) pengujian untuk tiap *pilecap*. Tahapan pelaksanaan uji *PDA* dijelaskan sebagai berikut:

A. Pemasangan Sensor

Penempatan 2 pasang sensor secara berlawanan, satu pasang sensor terdiri dari pengukur regangan (*strain transducer*) dan pengukur percepatan (*accelerometer*), yang dipasang di bawah kepala tiang dengan jarak minimal dari kepala tiang ke sensor sebesar $1,5D - 2D$, dimana D adalah diameter tiang).

B. Perekaman dan Pemrosesan Data

Akibat tumbukan *hammer* pada kepala tiang, sensor akan menangkap getaran yang merambat pada tiang dan mengubahnya menjadi sinyal listrik, kemudian direkam dan diproses dengan *Pile Driving Analyzer (PDA)*. Hasil rekaman *PDA* tersebut dianalisis lebih lanjut dengan *software CAPWAP*.

C. Analisis CAPWAP

CAPWAP (Case Pile Wave Analysis Program) merupakan program aplikasi analisis numerik yang menggunakan masukan data berupa gaya (*force*) dan kecepatan (*velocity*) yang diukur oleh *PDA*. Analisis *CAPWAP* bertujuan untuk memperkirakan total daya dukung tiang, distribusi gaya perlawanan tanah di sepanjang tiang dan di ujung tiang, serta memisahkannya menjadi bagian perlawanan dinamis dan statis.

Pada pengujian dengan *PDA* akan diperoleh hasil daya dukung yang bersifat salah satu dari dua kondisi berikut ini, yaitu (Nji, 2012):

A. Refusal

- Daya dukung yang terdeteksi/terdata dan dianalisis yang diperoleh dari kondisi pondasi tiang yang belum sepenuhnya termobilisasi atau belum mencapai kapasitas tertinggi atau *ultimate*-nya.
- Kondisi ini dapat disebabkan pada saat pengujian atau *re-strike* dilakukan, energi yang ditransfer tidak cukup besar untuk memobilisasi seluruh kemampuan tahanan atau daya dukung pondasi tiang yang diuji.

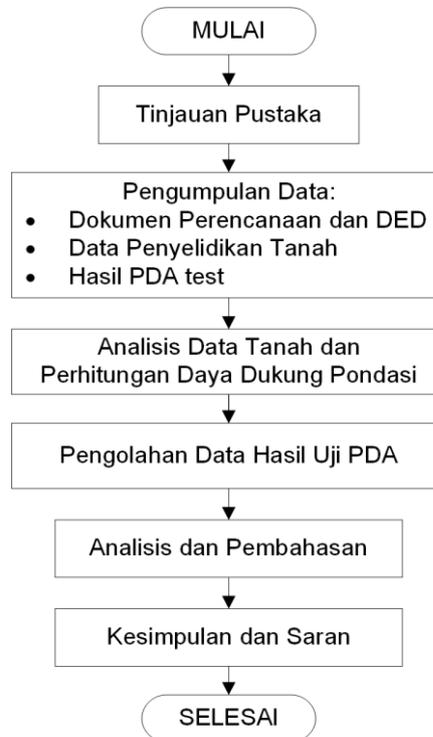
B. Ultimate

- Daya dukung yang diperoleh dari kondisi pondasi tiang yang sudah termobilisasi sepenuhnya atau kapasitas tertinggi atau *ultimate* pondasi tiang yang diuji.
- Kondisi *ultimate* ditentukan oleh salah satu dari: telah Bergeraknya tiang pancang akibat beban tertentu (beban *ultimate*) yang berarti terlampauinya tahanan friksi dan ujung dari pondasi tiang, atau telah terlampauinya kemampuan material tiang pancang itu sendiri yang jika diteruskan dengan beban yang lebih berat akan mengakibatkan kegagalan pada bahan atau material tiang pancang.

Kedua kondisi tersebut, baik refusal atau *ultimate*, dapat diterima selama daya dukung yang diperoleh masih memenuhi syarat faktor keamanan yang dituntut dari desain yang ditetapkan.

3. METODE PENELITIAN

Metode penelitian dimulai dari tahapan kajian pustaka dan pengumpulan data, yang meliputi: dokumen perencanaan dan DED, data penyelidikan tanah, serta laporan pengujian PDA. Selanjutnya dilakukan proses analisis data hasil penyelidikan tanah berupa *boring* dan *N-SPT*, serta dilakukan perhitungan daya dukung pondasi berdasarkan data tersebut. Langkah akhir berupa pembahasan analisis hasil uji PDA yang dibandingkan dengan daya dukung pondasi hasil perhitungan dengan pendekatan empiris. penarikan kesimpulan, serta saran dari kajian yang dilakukan. Langkah-langkah metode penelitian secara detail akan dijelaskan menggunakan bagan alir pada Gambar 4.



Gambar 2. Bagan Alir Penelitian

Penelitian ini mengambil studi kasus Penggantian Jembatan Kaligawe yang terletak di Jalan Kaligawe KM 2+350, Semarang, Jawa Tengah. Jembatan Kaligawe terdiri atas 2 jembatan, yaitu Kaligawe A dan Kaligawe B, dengan struktur atas berupa *voided slab* dan struktur bawah berupa 3 buah pilar dan 2 buah abutmen pada tiap jembatan.

4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Daya Dukung Pondasi Berdasar Hasil N-SPT

Berdasarkan data hasil penyelidikan tanah di lokasi pekerjaan dengan metode pemboran inti dan *Standard Penetration Test (SPT)* didapatkan bahwa struktur lapisan tanah didominasi oleh jenis lempung dari kedalaman 0 meter sampai dengan 50 meter. Data hasil penyelidikan tanah disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Penyelidikan Tanah

Kedalaman (m)	Jenis Tanah	N-SPT
0,0 - 2,0	Lempung, coklat, teguh, terdapat kerakal	2
2,0 - 5,0	Lempung, coklat, lunak	2 - 3
5,0 - 10,5	Pasir Kelempungan, coklat, sangat lepas	3 - 4
10,5 - 20,0	Lempung, abu-abu, lunak sampai teguh	2 - 4
20,0 - 37,0	Lempung, abu-abu, lunak sampai kaku	3 - 14
37,0 - 40,0	Lempung, coklat, sangat kaku	14 - 21
40,0 - 43,7	Lempung, abu-abu, sangat kaku	20 - 26
43,7 - 45,7	Lempung, coklat, sangat kaku	26 - 30
45,7 - 50,0	Lempung, kepasiran, abu-abu, keras	34 - 45

Sumber: CV. Feldspar Geotechnical Engineering (2018)

Dengan memperhatikan hasil penyelidikan tanah pada kedalaman hingga 45 meter, dimana dominan berupa lempung dan hasil dengan nilai $N-SPT < 30$, maka daya dukung tiang pancang yang berasal dari tahanan lekatan (*friction resistance*) akan memberikan rasio dukungan lebih besar bila dibandingkan dengan tahanan ujungnya (*end bearing*). Daya dukung tiang pancang tunggal menggunakan pendekatan empiris berdasar nilai $N-SPT$ tersaji pada Tabel 4.

Tabel 4. Daya Dukung Tiang Pendekatan Empiris Berdasarkan Nilai $N-SPT$

Metode Perhitungan	Daya Dukung Ultimate (ton)		Daya Dukung Tahanan (ton)		Rasio (%)	
	Qu	Ujung (Qp)	Lekatan (Qs)	Qp	Qs	
Mayerhof (1976)	467,5	177,6	289,9	38,0	62,0	
Schmertmann (1978)	392,6	100,4	292,2	25,6	74,4	
Briaud et.al. (1985)	464,2	166,4	297,8	35,9	64,1	
L. Decourt (1987)	398,6	124,7	274,0	31,3	68,7	
Rata-Rata =	430,7	142,3	288,5,29	32,7	67,3	

Pelaksanaan Pengujian PDA

Tiang pancang yang dijadikan sampel pengujian berupa tiang pancang beton pracetak kelas A dengan diameter 600 mm dan panjang kedalaman rencana 45 meter. Data teknis tiang panjang yang digunakan disajikan pada Tabel 5.

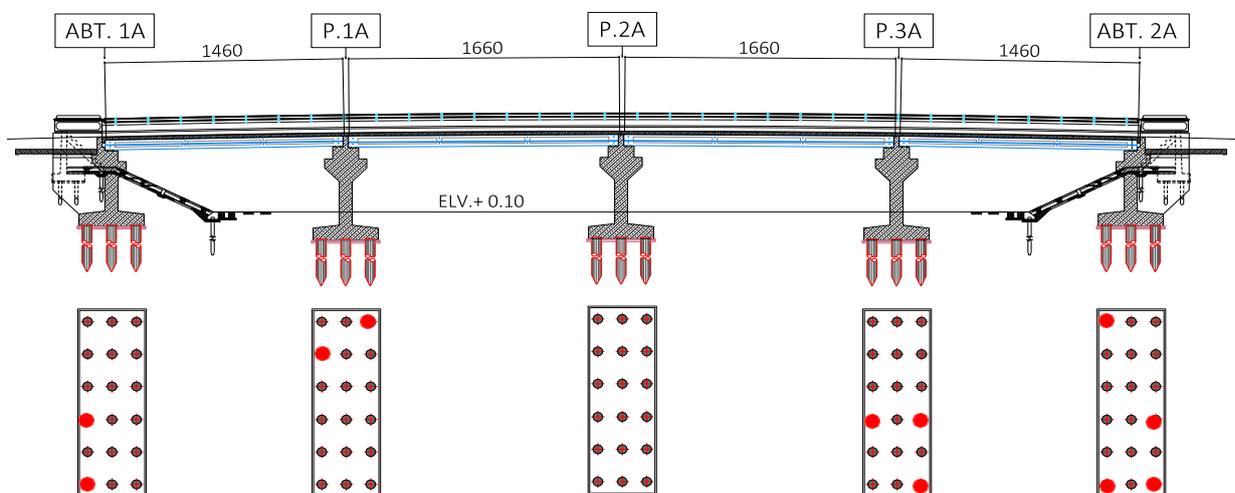
Tabel 5. Spesifikasi Tiang Pancang Uji

Spesifikasi <i>Prestressed Concrete Spun Pile (PCSP)</i>	
Kelas	: A
Diameter luar	: 600 mm
Tebal dinding	: 100 mm
Luas penampang beton	: 1571 cm ²
Berat unit	: 393 kg/m
Panjang per unit	: 6-16 m
Crack Bending Moment	: 17 ton.m
Ultimate Bending Moment	: 25,5 ton.m
Allowable Axial Load	: 252,70 ton

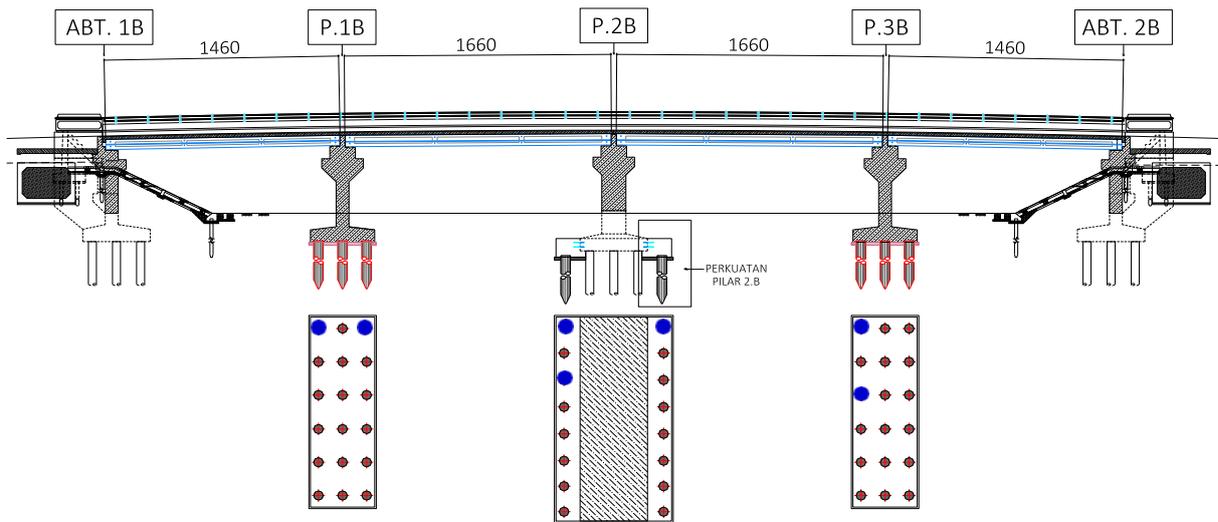
Sumber: PT. Wika Beton (2017)

Dalam uji *PDA* ini digunakan pemukul berupa *diesel hammer* dengan tipe *DD65* dengan kapasitas 6.5 ton .

Jumlah total pengujian yang dilakukan sebanyak 18 titik tiang, yaitu 11 titik di Jembatan A dan 7 titik di Jembatan B. Penentuan titik uji dilaksanakan secara random (acak). Lokasi tiang uji disajikan pada Gambar 3 dan 4.



Gambar 3. Lokasi Tiang Uji pada Jembatan Kaligawe A
 Sumber: PPK 3.6 Provinsi Jateng (2019)



Gambar 4. Lokasi Tiang Uji pada Jembatan Kaligawe B
 Sumber: PPK 3.6 Provinsi Jateng (2019)

Hasil Uji PDA

PT. Geo-Pondasi Testing (2019) dalam laporan hasil pengujian dinamis dengan *Pile Driving Analyzer (PDA)* dan analisis *CAPWAP* memberikan daya dukung pada pondasi tiang tunggal seperti tersaji pada Tabel 6.

Tabel 6. Daya Dukung Pondasi Hasil Uji PDA dan Analisis CAPWAP

No	Nomor Tiang	Lokasi	Tanggal Pancang	Tanggal Uji	PDA (ton)	Daya Dukung CAPWAP (ton)					Penurunan Maks (mm/pukulan)
						Total (Qu)	Ujung (Qp)	Selimum (Qs)	% Qp	% Qs	
1	P3-A3	Kaligawe A	29-Jan-19	6-Feb-19	396	395,4	57,3	338,1	14,5	85,5	2,1
2	P3-C1	Kaligawe A	29-Jan-19	6-Feb-19	493	460,4	77,2	383,2	16,8	83,2	1,4
3	P3-C3	Kaligawe A	1-Feb-19	6-Feb-19	501	505,9	147,0	358,9	29,1	70,9	2,0
4	A1-1A	Kaligawe A	5-Mar-19	21-Mar-19	360	357,0	169,1	187,9	47,4	52,6	3,7
5	A1-3A	Kaligawe A	7-Mar-19	21-Mar-19	285	250,4	125,4	125,0	50,1	49,9	2,1
6	P1-5A	Kaligawe A	18-Mar-19	21-Mar-19	375	367,4	118,3	249,1	32,2	67,8	5,2
7	P1-6C	Kaligawe A	18-Mar-19	21-Mar-19	396	368,1	143,1	225,0	38,9	61,1	3,3
8	A2-A1	Kaligawe A	3-Apr-19	28-Jun-19	479	402,3	25,1	377,2	6,2	93,8	1,6
9	A2-C1	Kaligawe A	3-Apr-19	28-Jun-19	432	373,7	75,4	298,3	20,2	79,8	1,7
10	A2-A6	Kaligawe A	26-Jun-19	28-Jun-19	455	389,0	64,3	324,7	16,5	83,5	1,9
11	A2-C3	Kaligawe A	26-Jun-19	28-Jun-19	508	384,0	116,8	267,2	30,4	69,6	3,4
12	P2-6A	Kaligawe B	20-Oct-19	21-Oct-19	379	355,5	145,9	209,5	41,0	58,9	3,6
13	P2-8A	Kaligawe B	20-Oct-19	21-Oct-19	480	456,3	117,5	338,8	25,8	74,2	4,0
14	P2-8B	Kaligawe B	20-Oct-19	21-Oct-19	411	412,3	152,8	259,5	37,1	62,9	5,3
15	P3-4A	Kaligawe B	16-Oct-19	21-Oct-19	503	475,7	151,7	324,0	31,9	68,1	4,3
16	P3-6A	Kaligawe B	14-Oct-19	21-Oct-19	471	438,5	86,3	352,2	19,7	80,3	4,2
17	P1-6A	Kaligawe B	27-Oct-19	30-Oct-19	474	475,4	139,8	335,6	29,4	70,6	3,8
18	P1-6C	Kaligawe B	27-Oct-19	30-Oct-19	385	348,3	79,0	269,3	22,7	77,3	3,2
Rata-rata =					432,4	401,0	110,7	290,2	28,3	71,7	3,2

Merujuk pada Tabel 4 dan 6 sebelumnya dapat diperoleh perbandingan nilai daya dukung pondasi berdasarkan pendekatan Empiris, uji PDA dan analisis CAPWAP seperti tersaji pada Tabel 7 dan 9.

Tabel 7. Komparasi Daya Dukung Pendekatan Empiris, Uji PDA dan CAPWAP

Uraian	Daya Dukung Total (ton)	Selisih (%)
Pendekatan Empiris (ton)	430,7	-
PDA Test (ton)	432,4	+0,40%
Analisis CAPWAP (ton)	401,0	-6,90%

Tabel 9. Komparasi Daya Dukung Tahanan Ujung dan Tahanan Selimut

Uraian	Daya Dukung (ton)			Rasio	
	Total Qu	Ujung (Qp)	Selimut (Qs)	% Qp	% Qs
Pendekatan Empiris (ton)	430,7	142,3	288,5	32,7	67,3
Analisis CAPWAP (ton)	401,0	110,7	290,2	28,3	71,7
Prosentase Selisih				4,4	4,4

Daya dukung total rerata menggunakan 4 (empat) metode pendekatan empiris berdasar nilai *N-SPT* diperoleh sebesar 430,7 ton, dengan rasio kontribusi daya dukung dari tahanan ujung (*Qp*) sebesar 32,7% dan tahanan lekatan selimut (*Qs*) sebesar 67,3%. Dari uji *PDA*, diperoleh daya dukung rerata sebesar 432,4 ton atau lebih besar 0,4% dari pendekatan empiris. Sebelum dilakukan analisis *CAPWAP* lebih lanjut, pada uji *PDA* belum dapat diketahui rasio kontribusi daya dukung dari tahanan ujung dan tahanan selimutnya. Namun demikian, dengan selisih prosentase di bawah 1% terhadap pendekatan empiris, uji *PDA* dapat dikatakan cukup handal untuk mengkonfirmasi besaran daya dukung pondasi tiang yang telah terpasang di lapangan.

Daya dukung rerata tiang uji setelah dilakukan analisis lanjut dengan *CAPWAP* didapatkan sebesar 401,0 ton. Daya dukung tersebut lebih kecil jika dibandingkan dengan nilai rerata hasil *PDA* sebesar 432,4 ton atau terjadi selisih penurunan sebesar 7,3 %. Hal ini disebabkan karena dalam analisis *CAPWAP*, hasil *PDA* yang ada diproses lanjut dengan menggunakan *signal matching analisis (SMA)* sehingga diperoleh hasil yang lebih detail dan akurat. Melalui analisis *CAPWAP* ini juga didapatkan rasio kontribusi daya dukung tahanan ujung sebesar 28,3% dan tahanan lekatan selimut sebesar 71,7%. Nilai rasio ini sesuai dengan hasil perhitungan pendekatan empiris, dimana daya dukung dominan diberikan oleh tahanan lekatan selimutnya sebesar 67,3% dan tahanan ujungnya sebesar 32,7% atau terdapat selisih sebesar 4,4% terhadap hasil analisis *CAPWAP*. Selisih tersebut relatif kecil dan kemungkinan disebabkan ketidakteelitian pada saat pengujian.

Dari hasil analisis *CAPWAP* juga diketahui secara lebih detail besaran penurunan maksimum dan jumlah pukulan dari tiang uji. Nilai penurunan maksimum rerata tiang uji didapatkan sebesar 3,2 mm/pukulan. Hal tersebut mengindikasikan bahwa daya dukung hasil uji *PDA* dalam kondisi *ultimate*, dimana daya dukung sepenuhnya telah termobilisasi. Kondisi *ultimate* ditentukan oleh salah satu dari kondisi, yaitu: (1) telah Bergeraknya tiang pancang akibat beban tertentu (beban *ultimate*) yang berarti terlampauinya tahanan friksi dan ujung dari pondasi tiang, atau (2) telah terlampauinya kemampuan material tiang pancang itu sendiri yang jika diteruskan dengan beban yang lebih berat akan mengakibatkan kegagalan pada bahan atau material tiang pancang. Dalam hal ini, kondisi *ultimate* ditentukan dari telah termobilisasinya tiang uji secara penuh, umumnya diambil penurunan maksimum sebesar 25,4 mm (1 inch) setiap 10 pukulan atau 2,54 mm/pukulan. Dengan kondisi tersebut dapat disimpulkan bahwa daya dukung hasil uji *PDA* menggambarkan nilai daya dukung *ultimate* dari pondasi tiang.

5. KESIMPULAN

Kesimpulan

- Daya dukung total rerata menggunakan 4 (empat) metode pendekatan empiris berdasar nilai *N-SPT* diperoleh sebesar 430,7 ton, dengan rasio kontribusi daya dukung dari tahanan ujung sebesar 32,7% dan tahanan lekatan selimut sebesar 67,3%.
- Daya dukung rerata hasil uji *PDA* sebesar 432,4 ton atau lebih besar 0,4% bila dibandingkan daya dukung rerata hasil pendekatan empiris (430,7 ton). Dengan prosentase selisih di bawah 1% terhadap pendekatan empiris, uji *PDA* dapat dikatakan cukup handal untuk mengkonfirmasi besaran daya dukung pondasi tiang yang telah terpasang di lapangan.
- Daya dukung tiang rerata berdasar analisis *CAPWAP* sebesar 401,0 ton atau lebih kecil 7,3% jika dibandingkan dengan hasil uji *PDA*. Hal ini dikarenakan hasil uji *PDA* yang ada diproses lebih lanjut dengan menggunakan *signal matching analisis (SMA)* sehingga diperoleh hasil yang lebih detail dan akurat.

- d) Hasil analisis CAPWAP didapatkan rasio nilai tahanan ujung sebesar 28,3% dan tahanan lekatan selimut sebesar 71,7% atau terdapat selisih 4,4% bila dibandingkan dengan hasil perhitungan dengan pendekatan empiris, yaitu tahanan ujung sebesar 32,7% dan tahanan selimut sebesar 67,3%. Selisih tersebut relatif kecil dan kemungkinan disebabkan ketidaktepatan pada saat pengujian.
- e) Ditinjau dari penurunan maksimum rerata, uji PDA dalam kondisi *ultimate* dimana daya dukung sepenuhnya telah termobilisasi, sehingga hasil uji PDA menggambarkan nilai daya dukung *ultimate* dari pondasi tiang.

Saran

- a) Hasil penelitian terbatas pada perbandingan daya dukung tiang tunggal antara hasil perhitungan empiris dengan hasil pengujian dinamis. Perlu dilakukan kajian lebih lanjut pengaruh efisiensi grup tiang terhadap daya dukung kelompok tiang.
- b) Perlu dilakukan kajian lanjutan terkait hubungan antara daya dukung hasil uji dinamis dengan hasil kalendering sehingga dapat digunakan sebagai kontrol daya dukung pondasi tiang yang tidak masuk dalam sampel uji.

DAFTAR PUSTAKA

- Bachtiar, V. (2012). "Evaluasi Daya Dukung Tiang Pancang Berdasarkan Data Cone Penetration Test (CPT) dan Pile Driven Analyzer (PDA) pada Tanah Lunak di Kota Pontianak". *Jurnal Teknik Sipil Untan*, Vol.12 No.1, 107-116.
- ASTM. (2017). "D4945-17: Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundation". USA: ASTM International.
- CV. Feldspar Geotechnical Engineering. (2018). "Laporan Penyelidikan Geoteknik (Pemboran) di Jembatan Kaligawe, Semarang". Blora.
- Das, B.M. (2016). "Principles of Foundation Engineering, Eight Edition". USA: Cengage Learning.
- Haryanto, B., Widiastuti, M., dan Bariah, S.F. (2019). Analisis Kapasitas Daya Dukung Fondasi Tiang Berdasarkan Data Uji Laboratorium, Uji SPT dan Uji Kalendering pada Proyek Jalan Pendekat Jembatan Mahakam IV Sisi Samarinda Kota", *Jurnal Teknologi Sipil*, Vol.3 No.1, 8-15
- Khomsianti, N.L., Jirna, I.W., dan Setyawan, E. (2019). "Perbandingan Daya Dukung Aksial Pondasi Tiang Bor Tunggal Menggunakan Data Standard Penetration Test (SPT) dan Pile Driving Analyzer (PDA) Test pada Proyek Pembangunan Jalan Tol Pandaan Malang". *Jurnal Bangunan*, Vol. 24 No.1 Maret 2019, 25-32.
- Lailaningrum, S.R., Surjandari, N.S., dan Purwana, Y.M. (2014). "Perbandingan Kapasitas Daya Dukung Pondasi Minipile Dengan Rumus Statis, Hasil Uji SPT, dan Hasil Uji PDA". *E-Jurnal Matriks Teknik Sipil*, 369-376.
- Maizir, H., Jingga, H., dan Toni, N. 2015. "Evaluasi Daya Dukung Tiang Pancang Berdasarkan Metode Dinamik". *Annual Civil Engineering Seminar 2015*, Pekanbaru, halaman 221-226.
- Nji, L.T. 2012. "PDA Test". <https://lauwtjunnji.weebly.com/pda-test.html>. [Diakses pada 5 Februari 2020].
- PPK 3.6 Provinsi Jawa Tengah. (2019). "Shop Drawing Paket Penggantian Jembatan Kaligawe, Cs". Semarang.
- PT. Arcon Indonesia. (2017). "Technical Data For: DD Series Guide Rod Diesel Pile Hammers". <http://www.arconindo.com>.
- PT. Geo-Pondasi Testing. (2019). "Laporan PDA Paket Penggantian Jembatan Kaligawe". Tangerang.
- PT. WIKA Beton. (2017). "Company Profile-The Precast Concrete Manufacturer". Jakarta.
- Putri, M.S., Apriyanti, Y., dan Fahriani, F. (2018). "Analisis Perbandingan Daya Dukung dan Penurunan Tiang Pancang Tunggal Dengan Metode Statik dan Uji Beban". *Prosiding Seminar Nasional Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, Pangkal Pinang*, 2 Oktober 2018.
- Randyanto, E.S., Sumampow, J.E., dan Balamba, S. (2015). "Analisis Daya Dukung Tiang Pancang dengan Menggunakan Metode Statik dan Calendering Studi Kasus: Proyek Pembangunan Manado Town Square 3". *Jurnal Sipil Statik* Vol.3 No.9, 631-643.
- Yusa, M., dan Nugroho, S.A. (2007). "Korelasi Penentuan Daya Dukung Tiang Cara Empirik (CPT) dengan Pile Driven Analysis (PDA) di Kota Pekanbaru". *Jurnal Media Teknik Sipil*, Edisi Januari 2017, 41-47.
- Yusti, A. dan Fahriani, F. (2013). "Analisis Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Diverifikasi dengan Hasil Uji Pile Driving Analyzer Test dan CAPWAP pada Proyek Pembangunan Gedung Kantor Bank Sumsel Babel di Pangkalpinang". *Jurnal Fropil* Vol 2 No.1 Januari-Juni 2014, 19-31.