

EVALUASI KEAMANAN PONDASI TIANG BOR TERPASANG DENGAN HASIL PDA TEST PADA PROYEK LRT JAKARTA

Agus Sugiarto^{1*}, Arfilian Permana Putra²

Politeknik Negeri Malang¹, Universitas Esa Unggul²

Koresponden*, Email: agus.sugiarto@polinema.ac.id¹, arfilian@esaunggul.ac.id²

ABSTRAK

Dalam pelaksanaan proyek LRT ini, salah satu aspek penting yang sangat menentukan keberhasilan struktur atas adalah sistem pondasi bawah. Mengingat kondisi tanah di sebagian besar trase proyek didominasi oleh lapisan lempung jenuh air, maka dibutuhkan sistem pondasi dalam yang mampu menahan beban struktur atas. Pondasi tiang bor yang telah terpasang juga perlu ditinjau kembali daya dukung dan penurunannya untuk memastikan keakuratan dalam metode pelaksanaannya, sehingga sama dengan hasil perencanaan awal. Untuk itu penelitian ini bertujuan untuk menganalisis kesesuaian antara daya dukung pondasi tiang bor berdasarkan perhitungan analitis menggunakan data uji SPT dengan hasil aktual dari pengujian PDA (*Pile Driving Analyzer*) pada proyek LRT Phase 1B Velodrome–Manggarai. Metode analisis menggunakan pendekatan hitungan analitis dengan perhitungan daya dukung selimut dan ujung tiang berdasarkan metode *Vesic* dan parameter geoteknik hasil investigasi lapangan. Perhitungan analitis akan dibandingkan dengan data PDA Test yang dianalisis menggunakan perangkat CAPWAP untuk sepuluh titik tiang bor (*Pier-51* sampai *Pier-60*). Hasil penelitian menunjukkan bahwa nilai daya dukung aktual dari PDA Test selalu lebih tinggi dengan rata-rata nilai sebesar 3040,50 ton dibandingkan hasil perhitungan rencana sebesar 2123,85 ton, sementara nilai penurunan aktual dengan PDA Test mempunyai nilai rata-rata 12,5 mm dan nilai rata-rata dengan cara analitis adalah 32,21 mm. Hal ini membuktikan bahwa perencanaan pondasi yang dilakukan telah memenuhi aspek keamanan dan efisiensi struktur. Selain itu, penggunaan PDA Test terbukti efektif sebagai metode verifikasi kinerja pondasi di lapangan.

Kata kunci : CAPWAP, daya dukung tiang, PDA Test, penurunan tiang, SPT.

ABSTRACT

*In the implementation of this LRT project, one of the most important aspects determining the success of the superstructure is the foundation system. Considering that the soil conditions along most of the project alignment are dominated by saturated clay layers, a deep foundation system capable of supporting the superstructure loads is required. The installed bored pile foundations also need to be re-evaluated in terms of their bearing capacity and settlement to ensure the accuracy of the construction method and its consistency with the initial design results. Therefore, this study aims to analyze the conformity between the bearing capacity of bored pile foundations based on analytical calculations using SPT test data and the actual results obtained from PDA (*Pile Driving Analyzer*) testing on the LRT Phase 1B Velodrome–Manggarai project. The analysis method applies an analytical approach by calculating the shaft resistance and end bearing capacity based on the *Vesic* method and geotechnical parameters obtained from field investigations. The analytical calculations are then compared with PDA Test data analyzed using CAPWAP software for ten bored pile locations (*Pier-51* to *Pier-60*). The results show that the actual bearing capacity values obtained from the PDA Tests are consistently higher, with an average value of 3,040.50 tons, compared to the design calculation results with an average value of 2,123.85 tons. Meanwhile, the average settlement value obtained from the PDA Tests is 12.5 mm, whereas the analytical method yields an average settlement of 32.21 mm. These findings indicate that the foundation design meets the safety and structural efficiency requirements. Furthermore, the use of PDA Tests is proven to be an effective method for verifying foundation performance in the field.*

Keywords : bearing capacity of pile, CAPWAP, PDA Test, single pile settlement, SPT.

1. PENDAHULUAN

Pembangunan infrastruktur transportasi masal di kota-kota besar Indonesia menjadi salah satu langkah strategis pemerintah dalam mengurangi kemacetan dan meningkatkan

konektivitas antarwilayah. Salah satu proyek prioritas nasional yang sedang dilaksanakan adalah Pembangunan LRT Phase 1B Velodrome–Manggarai, yang merupakan kelanjutan dari fase sebelumnya. Proyek ini melintasi

wilayah padat penduduk di DKI Jakarta, membentang sepanjang ±6,4 kilometer dan mencakup lima stasiun: Stasiun Pemuda Rawamangun, BPKP Pramuka, Pasar Pramuka, Matraman, dan Manggarai.

Dalam pelaksanaan proyek LRT ini, salah satu aspek penting yang sangat menentukan keberhasilan struktur atas adalah sistem pondasi bawah. Mengingat kondisi tanah di sebagian besar trase proyek didominasi oleh lapisan lempung jenuh air, maka dibutuhkan sistem pondasi dalam yang mampu menahan beban struktur secara vertikal dan lateral. Oleh karena itu, jenis pondasi yang digunakan adalah pondasi tiang bor, yang dinilai paling sesuai untuk kondisi tanah lunak dan area proyek yang berada di tengah kepadatan lalu lintas kota [1], [2].

Sebagai bagian dari kontrol mutu dan evaluasi pelaksanaan di lapangan, dilakukan pengujian PDA (*Pile Driving Analyzer*) Test untuk mengetahui daya dukung aktual tiang bor setelah pelaksanaan. PDA Test memberikan data tentang kapasitas daya dukung tiang secara langsung di lapangan berdasarkan respon dinamis saat tiang dikenai beban melalui getaran (*impact*). Namun demikian, perlu dilakukan kajian teknis untuk memastikan apakah hasil PDA Test tersebut sesuai atau menyimpang dari perhitungan awal perencanaan daya dukung pondasi yang berbasis pada data investigasi tanah [3].

Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada analisis kesesuaian antara hasil perhitungan daya dukung pondasi tiang bor secara teoritis (menggunakan data SPT dengan metode analitis) dengan hasil aktual dari PDA Test di lapangan. Analisis ini penting untuk mengevaluasi ketepatan desain, efektivitas metode konstruksi pondasi, dan keandalan

sistem pondasi yang telah diterapkan pada proyek LRT Phase 1B Velodrome–Manggarai.

2. METODE

Penelitian ini melakukan pendekatan analisis berdasarkan data aktual di lapangan dengan pendekatan teknis rekayasa geoteknik. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisis kesesuaian antara hasil perhitungan teoritis daya dukung pondasi tiang bor berdasarkan data uji SPT, dengan hasil aktual di lapangan berdasarkan PDA (*Pile Driving Analyzer*) Test. Dengan pendekatan ini, penelitian berupaya mengidentifikasi sejauh mana perencanaan awal pondasi telah sesuai dengan kondisi aktual struktur tiang setelah pelaksanaan. Pada analisis ini peninjauan dilakukan pada 10 titik tiang jembatan LRT

2.1 Perhitungan Teoritis Daya Dukung Pondasi

Komponen yang dihitung:

- Menggunakan metode analitis untuk menghitung daya dukung tiang bor berdasarkan data tanah dari uji SPT. [4], [5]

$$N_{60} = \frac{E_m C_B C_S C_R N_{lap}}{0.6} \quad (1)$$

Keterangan:

- N_{60} = Nilai SPT terkoreksi
- E_m = Efisiensi hammer
- C_B = Koreksi diameter lubang bor
- C_S = Koreksi jenis sampel
- C_R = Koreksi batang bor
- N_{lap} = Nilai SPT hasil uji lapangan

Tabel 1. *Hammer Efficiency*

Country	Hammer Type	Hammer Release Mechanism	Hammer Efficiency
Argentina	Donut	Cathead	0.45
Brazil	Pin Weight	Hand Dropped	7.2
	Automatic	Trip	0.6
China	Donut	Hand Dropped	0.55
	Donut	Cathead	0.5
Colombia	Donut	Cathead	0.5
	Donut	Tombi Trigger	0.78 – 0.85
Japan	Donut	Cathead 2 turns + special release	0.65 – 0.67
	Donut	Cathead	0.65 – 0.67
UK	Automatic	Trip	0.73
USA	Safety	2 turns on cathead	0.55 – 0.60
	Donut	2 turns on cathead	0.45
Venezuela	Donut	Cathead	0.43

Source: Clayton, 1990 in Donald P Coduto 1994

Dalam perhitungan koreksi nilai SPT, salah satu faktor penting yang memengaruhi akurasi hasil adalah efisiensi alat pemukul (*hammer efficiency*). Tabel 1 berikut menampilkan variasi efisiensi hammer berdasarkan jenis hammer, mekanisme pelepasan, dan negara penggunaannya, yang dikutip dari [6] dalam [4]. Nilai efisiensi ini digunakan sebagai faktor koreksi dalam perhitungan nilai pukulan

standar N_{60} , agar hasil SPT dapat direpresentasikan secara seragam dan valid secara internasional. Sebagai contoh, hammer tipe *Donut* dengan sistem *cathead* yang umum digunakan di Argentina memiliki efisiensi sebesar 0,45, sementara hammer otomatis dengan sistem *trip* yang digunakan di Inggris memiliki efisiensi lebih tinggi, yaitu 0,73.

Tabel 2. Nilai C_B , C_S , dan C_R

Factor	Equipment Variables	Value
Borhole diameter	65 – 115 mm	1
factor, C_B	150 mm	1.05
	200 mm	1.15
Sampling method factor, C_S	Standard Sample	1
	Sample without liner (not recommended)	1.2
	3 – 4 m	0.75
	4 – 6 m	0.85
Rod length factor, C_R	6 – 10 m	0.95
	>10 m	1

Source: Skempton 1986 in Donald P Coduto 1994

a. Tahanan gesek tiang (f_s):

- Pada tanah lempung [7]
 $f_s = \alpha \cdot c_u$ (2)
 dimana,

$$\alpha = 0,55 ; \text{ untuk } \frac{c_u}{p_a} \leq 1,5$$

$$\alpha = 0,55 - 0,01\left(\frac{c_u}{p_a} - 1,5\right) ;$$

$$\text{untuk } 1,5 \leq \frac{c_u}{p_a} \leq 2,5$$

- Pada tanah pasir [8]
 $f_s = 2 \cdot N_{60} \leq 190 \text{ kPa}$ (3)

b. Tahanan ujung tiang (f_b):

- Pada tanah lempung [7]
 $f_s = 9 \cdot C_u \leq 4 \text{ MPa}$;
 (untuk, $C_u > 96 \text{ MPa}$) (4)

$$f_s = N_c \cdot C_u \leq 4 \text{ MPa} ;$$

$$\text{(untuk, } C_u < 96 \text{ MPa)} \quad (5)$$

Tabel 3. Hubungan nilai C_U dengan N_c

C_u	$E_s/3C_u$ (kPa)	N_c
24 kPa	50	6.5
48 kPa	150	8.0
$\geq 96 \text{ kPa}$	250–300	9.0

- Pada tanah pasir [8]
 $f_s = 40 \cdot N_{60} \leq 3 \text{ MPa}$ (6)

c. Daya dukung ijin (Q_{all}) [8]

- Daya dukung tahanan gesek tiang (Q_s)
 $Q_s = f_s \times A_s \times \Delta L$ (7)

- Daya dukung tahanan ujung tiang (Q_b)
 $Q_b = f_b \times A_b$ (8)

$$\text{dimana,}$$

$$A_s = \text{keliling dimensi tiang (m)}$$

$$A_b = \text{luas penampang ujung tiang (m}^2\text{)}$$

- Daya dukung total (Q_{ult})
 $Q_{ult} = Q_s + Q_b$ (9)

maka dari persamaan di atas, didapat nilai dari daya dukung ijin tiang (Q_{all}) adalah sebagai berikut:

$$Q_{all} = Q_{ult} / SF \quad (10)$$

2.2 Penurunan tiang tunggal

Penurunan elastik tiang tunggal atau penurunan segera adalah penurunan pondasi yang terletak pada tanah berbutir halus yang jenuh. Penurunan tiang di bawah beban bekerja vertikal (Q_w) disebabkan oleh tiga komponen berikut [5], [9]:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \quad (11)$$

Keterangan:

S = penurunan tiang total (mm)

S_1 = penurunan batang tiang (mm)

S_2 = penurunan tiang akibat ujung tiang (mm)

S_3 = penurunan tiang akibat beban yang tersalur sepanjang batang (mm)

dimana:

$$S_1 = \frac{Q_p + (\xi \cdot Q_s)}{A_p \cdot E_p} \quad (12)$$

Keterangan:

Q_p = beban yang dipikul ujung tiang yang di bawah beban kerja

Q_s = beban yang dipikul kulit tiang di bawah kondisi beban kerja

A_p = luas penampang tiang (m^2)

L = panjang tiang (m)

E_p = modulus young beban tiang ($2,1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$)

ξ = tegangan geser

Besarnya ξ bergantung pada unit tahanan friksi alami di sepanjang tiang terpancang dalam tanah. Jika distribusi friksi adalah seragam atau simetris, seperti persegi panjang atau parabola seragam maka nilai ξ adalah 0,5, umumnya pada tanah lempung atau lanau. Jika distribusi friksi dalam bentuk segitiga maka nilai ξ adalah 0,67, umumnya untuk tanah pasir

$$S_2 = \frac{Q_p \times C_p}{D \cdot q_b} \quad (13)$$

Tabel 4. Angka Nilai Koefisien Empiris

Jenis Tanah	Tiang Pancang	Tiang Bor
Pasir (padat ke lepas)	0,02 – 0,04	0,09 – 0,18
Lempung (kaku ke lunak)	0,02 – 0,03	0,03 – 0,06
Lanau (padat ke lepas)	0,03 – 0,05	0,09 – 0,12

$$S_3 = \frac{Q_p + C_s}{L \cdot q_p} \quad (14)$$

Keterangan:

C_s (sebuah konstanta empiris) = $(0,93 + 0,16 \sqrt{\frac{L}{D}}) C_p$

Nilai ξ tergantung pada bagaimana friksi tanah terdistribusi sepanjang batang tiang. Bila distribusi gesekan berbentuk merata atau simetris seperti persegi

panjang atau parabola maka nilai ξ umumnya sebesar 0,5, yang lazim dijumpai pada jenis tanah lempung atau lanau. Namun, jika distribusi gesekan menyerupai bentuk segitiga, nilai ξ meningkat menjadi sekitar 0,67, yang biasa terjadi pada tanah pasir.[9].

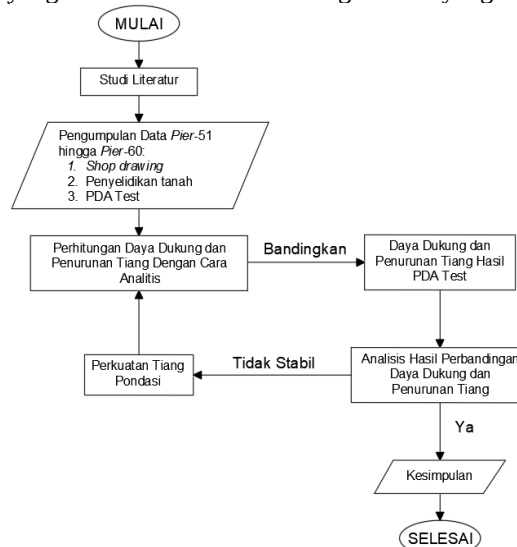
2.3 Lokasi Proyek

Lokasi penelitian berada pada trase pembangunan LRT Phase 1B Velodrome–Manggarai yang membentang di wilayah Jakarta Timur. Lokasi ini dipilih karena mewakili kondisi tanah dominan berupa lempung jenuh air yang memerlukan sistem pondasi dalam (*deep foundation*) seperti tiang bor. Gambar 1 memperlihatkan peta lokasi proyek yang menjadi titik acuan dalam pengambilan dan analisis data.



2.5 Rancangan Metode Penelitian

Pada bahasan ini menjelaskan tahapan-tahapan yang dilakukan dalam penelitian, mulai dari pengumpulan data hingga analisis dan penarikan kesimpulan yang disusun dalam bentuk diagram alir yang ditunjukkan pada Gambar 2 berikut ini:



Gambar 2 Diagram Alir Rancangan Metode Penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan permasalahan di atas, hasil dan pembahasan meliputi perhitungan daya dukung pondasi tiang bor pada *Pier-51* hingga *Pier-60* dan mencari nilai penurunan tiangnya. Kemudian hasil dari daya dukung tiang dengan pengujian PDA Test yang sudah dianalisis dengan CAPWAP akan dievaluasi dengan hasil perhitungan daya dukung dan penurunan tiang. Nilai dari daya dukung dan penurunan tiang dengan PDA Test atau hasil aktual tiang harus lebih tinggi dengan hasil hitungan perencanaan. Perhitungan yang akan ditampilkan di bawah

Gambar 1 Lokasi Rencana Pembangunan LRT Phase 1B Velodrome–Manggarai

2.4 Pengumpulan Data Tanah

- Data Primer
 - a. Hasil PDA Test dari lokasi proyek LRT Phase 1B Velodrome–Manggarai (kapasitas daya dukung aktual tiap tiang bor).
 - b. Data teknis tiang bor: dimensi, kedalaman, dan jenis pelaksanaan.
- Data Sekunder
 - a. Data SPT dari lokasi trase proyek LRT Phase 1B pada 10 titik dengan notasi: Pier-51B ; Pier-52B ; Pier-53B ; Pier-54B ; Pier-55B ; Pier-56B ; Pier-57B ; Pier-58B ; Pier-59B ; Pier-60B.
 - b. Parameter tanah: kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), berat volume tanah (γ), dan muka air tanah.
 - c. Parameter tanah yang diperlukan: nilai data N-SPT, kohesi (c), sudut geser dalam (ϕ), berat volume tanah (γ), dan kedalaman muka air tanah [10], [11]
 - d. Gambar teknis perencanaan pondasi.

ini merupakan contoh perhitungan dengan menampilkan data dari *Pier-51*.

3.1 Perhitungan Daya Dukung Tiang

Perhitungan daya dukung tiang dilakukan untuk mengetahui sejauh mana pondasi tiang bor mampu menahan beban struktur di atasnya. Proses perhitungan dilakukan secara bertahap, dimulai dari pengolahan data uji SPT (*Standard Penetration Test*) menjadi nilai koreksi pukulan N_{60} , kemudian dilanjutkan dengan perhitungan daya dukung selimut (Q_s) dan ujung tiang (Q_b) berdasarkan parameter tanah di setiap kedalaman. Nilai N_{60} sangat berperan dalam menentukan kapasitas tiang, karena

menjadi dasar untuk menghitung kekuatan geser tanah dan daya dukung total tiang. Untuk menjamin ketepatan hasil, digunakan faktor koreksi seperti efisiensi hammer (Em), diameter borehole (Cb), jenis sampel (Cs), dan panjang perhitungan lebih lanjut pada *Pier-51*.

batang bor (Cr) [12]. Nilai-nilai tersebut kemudian digunakan dalam rumus koreksi standar untuk mendapatkan N_{60} . Hasil pengolahan N_{60} disajikan dalam Tabel 5 berikut sebagai dasar

a) Mencari Nilai N_{60}

Tabel 5 Hasil Nilai N_{60}

Kedalaman	Deskripsi Lapisan Tanah	N-SPT	Em	Cb	Cs	Cr	N_{60}
0 - 1	clay	24	0.6	1.00	1.00	0.75	18
1 - 3	clay	28	0.6	1.00	1.00	0.80	22
3 - 5	clay	7	0.6	1.00	1.00	0.85	6
5 - 7	sand	47	0.6	1.00	1.00	0.95	45
7 - 9	clay	45	0.6	1.00	1.00	0.95	43
9 - 11	sand	32	0.6	1.00	1.00	1.00	32
11 - 13	sand	50	0.6	1.00	1.00	1.00	50
13 - 15	sand	50	0.6	1.00	1.00	1.00	50
15 - 17	clay	50	0.6	1.00	1.00	1.00	50
17 - 19	sand	50	0.6	1.00	1.00	1.00	50
19 - 21	sand	39	0.6	1.00	1.00	1.00	39
21 - 23	clay	44	0.6	1.00	1.00	1.00	44
23 - 25	clay	50	0.6	1.00	1.00	1.00	50
25 - 27	clay	9	0.6	1.00	1.00	1.00	9
27 - 29	clay	7	0.6	1.00	1.00	1.00	7
29 - 31	clay	11	0.6	1.00	1.00	1.00	11
31 - 33	clay	17	0.6	1.00	1.00	1.00	17
33 - 35	clay	20	0.6	1.00	1.00	1.00	20
35 - 37	clay	26	0.6	1.00	1.00	1.00	26
37 - 39	clay	20	0.6	1.00	1.00	1.00	20
39 - 41	clay	23	0.6	1.00	1.00	1.00	23
41 - 43	clay	24	0.6	1.00	1.00	1.00	24
43 - 45	clay	22	0.6	1.00	1.00	1.00	22
45 - 47	clay	24	0.6	1.00	1.00	1.00	24
47 - 49	clay	25	0.6	1.00	1.00	1.00	25
49 - 51	sand	50	0.6	1.00	1.00	1.00	50
51 - 53	sand	49	0.6	1.00	1.00	1.00	49
53 - 55	clay	16	0.6	1.00	1.00	1.00	16
55 - 57	clay	17	0.6	1.00	1.00	1.00	17
57 - 60	clay	19	0.6	1.00	1.00	1.00	19

Sebelum melakukan analisis daya dukung tiang dengan menggunakan data hasil uji *Standard Penetration Test* (SPT), langkah awal yang harus dilakukan adalah mengolah data SPT tersebut menjadi parameter yang dapat digunakan dalam perhitungan. Salah satu parameter penting yang diperlukan adalah nilai koreksi pukulan yaitu N_{60} , yang dihitung dengan memasukkan nilai faktor-faktor koreksi seperti efisiensi hammer, diameter lubang bor, metode pengambilan sampel, dan panjang batang bor ke dalam rumus tertentu. Nilai N_{60} ini sangat penting karena akan digunakan dalam tahapan perhitungan berikutnya untuk menentukan nilai daya dukung baik dari kulit tiang

(*friksi*) maupun dari ujung tiang (*bearing*). Oleh karena itu, perhitungan awal ini menjadi dasar penting yang tidak dapat diabaikan. Hasil perhitungan nilai N_{60} untuk lokasi *Pier-51* dapat dilihat pada Tabel 5 di atas.

b) Daya Dukung Selimut Tiang (Q_s)

Perhitungan daya dukung selimut tiang melihat dari tahanan gesek tiang (f_s). Tahanan gesek tiang didapat dengan memasukkan nilai pada rumus 2 sampai 5, dengan hasil pada nilai N_{60} yang telah didapat di atas, maka nilai dari daya dukung selimut tiang adalah:

Tabel 6 Hasil Nilai Daya Dukung Selimut Tiang (Q_s)

No.	Depth m	Tebal Lapisan m	Deskripsi Lapisan Tanah	Unit Weight kN/m ³	N-SPT	N ₆₀	Cu kN/m ²	α	β	σ_v kN/m ²	σ_w kN/m ²	σ'_v kN/m ²	Nc	q_s		Skin Friction kN	Qs kN
														(clay) kN/m ²	(sand) kN/m ²		
1	0 - 1	1	clay	12	24	24	141,94	0,55	-	12	0	12,00	9,00	78,07	-	368,03	0
2	1 - 3	2	clay	12	28	29,4	176,64	0,45	-	36	0	36,00	9,00	79,49	-	749,44	749,44
3	3 - 5	2	clay	16	7	7,8	46,919	0,55	-	68	4,91	63,10	7,93	25,81	-	243,31	992,75
4	5 - 7	2	sand	20	47	58,7	-	-	0,84	108	24,53	83,48	-	-	70,00	659,99	1652,74
5	7 - 9	2	clay	18	45	56,2	337,11	0,45	-	144	44,15	99,86	9,00	151,70	-	1430,29	3083,02
6	9 - 11	2	sand	17	32	42,1	-	-	0,67	178	63,77	114,24	-	-	76,63	722,55	3805,57
7	11 - 13	2	sand	20	50	65,7	-	-	0,60	218	83,39	134,62	-	-	80,58	759,77	4565,35
8	13 - 15	2	sand	20	50	65,7	-	-	0,53	258	103,01	155,00	-	-	82,42	777,10	5342,44
9	15 - 17	2	clay	18	50	65,7	394,28	0,45	-	294	122,63	171,38	9,00	177,42	-	1672,85	7015,29
10	17 - 19	2	sand	20	50	65,7	-	-	0,41	334	142,25	191,76	-	-	78,67	741,77	7757,06
11	19 - 21	2	sand	18	39	51,3	-	-	0,35	370	161,87	208,14	-	-	73,75	695,39	8452,46
12	21 - 23	2	clay	18	44	57,8	346,96	0,45	-	406	181,49	224,52	9,00	156,13	-	1472,11	9924,57
13	23 - 25	2	clay	18	50	65,7	394,28	0,45	-	442	201,11	240,90	9,00	177,42	-	1672,85	11597,42
14	25 - 27	2	clay	16	9	11,8	70,97	0,55	-	474	220,73	253,28	8,48	39,03	-	368,03	11965,45
15	27 - 29	2	clay	16	7	9,2	55,199	0,55	-	506	240,35	265,66	8,15	30,36	-	286,24	12251,69
16	29 - 31	2	clay	16	11	14,5	86,741	0,55	-	538	259,97	278,04	8,81	47,71	-	449,81	12701,50
17	31 - 33	2	clay	17	17	22,3	134,05	0,55	-	572	279,59	292,42	9,00	73,73	-	695,16	13396,67
18	33 - 35	2	clay	17	20	26,3	157,71	0,55	-	606	299,21	306,80	9,00	86,74	-	817,84	14214,50
19	35 - 37	2	clay	18	26	34,2	205,02	0,55	-	642	318,83	323,18	9,00	112,76	-	1063,19	15277,69
20	37 - 39	2	clay	17	20	26,3	157,71	0,55	-	676	338,45	337,56	9,00	86,74	-	817,84	16095,53
21	39 - 41	2	clay	17	23	30,2	181,37	0,55	-	710	358,07	351,94	9,00	99,75	-	940,51	17036,05
22	41 - 43	2	clay	17	24	31,5	189,25	0,55	-	744	377,69	366,32	9,00	104,09	-	981,41	18017,46
23	43 - 45	2	clay	17	22	28,9	173,48	0,55	-	778	397,31	380,70	9,00	95,41	-	899,62	18917,08
24	45 - 47	2	clay	17	24	31,5	189,25	0,55	-	812	416,93	395,08	9,00	104,09	-	981,41	19898,49
25	47 - 49	2	clay	18	25	32,9	197,14	0,55	-	848	436,55	411,46	9,00	108,43	-	1022,30	20920,78
26	49 - 51	2	sand	20	50	65,7	-	-	0,38	888	456,17	431,84	-	-	164,95	1555,21	22475,99
27	51 - 53	2	sand	20	49	64,4	-	-	0,33	928	475,79	452,22	-	-	148,05	1395,93	23871,92
28	53 - 55	2	clay	17	16	21,0	126	0,55	-	962	495,41	466,60	9,00	69,39	-	654,27	24526,20
29	55 - 57	2	clay	17	17	22,3	134,05	0,55	-	996	515,03	480,98	9,00	73,73	-	695,16	25221,36
30	57 - 60	3	clay	17	19	25,0	149,82	0,55	-	1047	544,46	502,55	9,00	82,40	-	1165,42	26386,78

Berdasarkan hasil tersebut, maka diperoleh nilai daya dukung selimut tiang (Q_s) total dengan panjang tiang bor 60 meter, sebesar 26386,78 kN atau setara dengan 2690,7 ton. Nilai ini menunjukkan kontribusi gesekan tanah sepanjang tiang terhadap daya dukung pondasi, yang sangat penting dalam mendukung stabilitas struktur bangunan di atasnya.

c) Daya Dukung Ujung Tiang

Dalam perhitungan ini, digunakan rumus 6 hingga 8 yang mengacu pada pendekatan teori [13], di mana nilai daya dukung ujung tiang diperoleh dengan mempertimbangkan

luas penampang tiang dan kedalaman penetrasi terhadap lapisan tanah keras. Proses perhitungan juga melibatkan faktor koreksi serta nilai koefisien daya dukung ujung (N_c) yang diperoleh dari Tabel 3 sesuai dengan jenis dan kondisi tanah. Hasil dari perhitungan daya dukung ujung tiang tersebut disajikan dalam Tabel 7 berikut:

Tabel 7 Hasil Nilai Daya Dukung Ujung Tiang (Q_b)

No.	Depth m	Tebal Lapisan m	Deskripsi Lapisan Tanah	Unit Weight kN/m ³	N-SPT	N ₆₀	Cu kN/m ²	Nc	qb (clay) kN/m ²	(sand) kN/m ²	Qb kN
1	0 - 1	1	clay	12	24	24	141,94	9,00	1277,45	-	2258,35
2	1 - 3	2	clay	12	28	29,4	176,64	9,00	1589,72	-	2810,39
3	3 - 5	2	clay	16	7	7,8	46,919	7,93	372,18	-	657,96
4	5 - 7	2	sand	20	47	58,7	-	-	-	1880	3323,57
5	7 - 9	2	clay	18	45	56,2	337,11	9,00	3033,95	-	5363,58
6	9 - 11	2	sand	17	32	42,1	-	-	-	1280	2262,86
7	11 - 13	2	sand	20	50	65,7	-	-	-	2000	3535,71
8	13 - 15	2	sand	20	50	65,7	-	-	-	2000	3535,71
9	15 - 17	2	clay	18	50	65,7	394,28	9,00	3548,48	-	6273,20
10	17 - 19	2	sand	20	50	65,7	-	-	-	2000	3535,71
11	19 - 21	2	sand	18	39	51,3	-	-	-	1560	2757,86
12	21 - 23	2	clay	18	44	57,8	346,96	9,00	3122,66	-	5520,41
13	23 - 25	2	clay	18	50	65,7	394,28	9,00	3548,48	-	6273,20
14	25 - 27	2	clay	16	9	11,8	70,97	8,48	601,72	-	1063,75
15	27 - 29	2	clay	16	7	9,2	55,199	8,15	449,87	-	795,30
16	29 - 31	2	clay	16	11	14,5	86,741	8,81	763,93	-	1350,52
17	31 - 33	2	clay	17	17	22,3	134,05	9,00	1206,48	-	2132,89
18	33 - 35	2	clay	17	20	26,3	157,71	9,00	1419,39	-	2509,28
19	35 - 37	2	clay	18	26	34,2	205,02	9,00	1845,21	-	3262,06
20	37 - 39	2	clay	17	20	26,3	157,71	9,00	1419,39	-	2509,28
21	39 - 41	2	clay	17	23	30,2	181,37	9,00	1632,30	-	2885,67
22	41 - 43	2	clay	17	24	31,5	189,25	9,00	1703,27	-	3011,13
23	43 - 45	2	clay	17	22	28,9	173,48	9,00	1561,33	-	2760,21
24	45 - 47	2	clay	17	24	31,5	189,25	9,00	1703,27	-	3011,13
25	47 - 49	2	clay	18	25	32,9	197,14	9,00	1774,24	-	3136,60
26	49 - 51	2	sand	20	50	65,7	-	-	-	2000	3535,71
27	51 - 53	2	sand	20	49	64,4	-	-	-	1960	3465,00
28	53 - 55	2	clay	17	16	21,0	126	9,00	1135,51	-	2007,42
29	55 - 57	2	clay	17	17	22,3	134,05	9,00	1206,48	-	2132,89
30	57 - 60	3	clay	17	19	25,0	149,82	9,00	1348,42	-	2383,81

Hasil dari perhitungan pada tabel di atas diambil pada kedalaman 60 meter, karena menyesuaikan dengan panjang tiang, maka nilai daya dukung ujung tiang (Q_b) adalah 2383,81 kN atau 243,08 ton.

d) Daya dukung total tiang (Q_{ult})

Nilai daya dukung gesek tiang dan daya dukung ujung tiang sebelumnya merupakan contoh perhitungan *bore-pile* pada *Pier-51*, maka dengan memasukan hasil hitungan tersebut pada rumus 11, dan hasil dari *Pier* lain, didapat nilai daya dukung total (*ultimate*) pada masing-masing *Pier* adalah sebagai berikut:

Tabel 8 Hasil Nilai Daya Dukung Total Tiang (Q_{ult})

Pier	Panjang Pile (m)	Q _s (kN)	Q _b (kN)	Q _{ult} (kN)
BH-P51	60	26386,78	2383,81	28770,59
BH-P52	44	18514,86	2671,93	21186,79
BH-P53	48	20336,82	2576,50	22913,32
BH-P54	48	18236,87	3053,63	21290,50
BH-P55	44	16273,12	2576,50	18849,62
BH-P56	44	18303,33	3053,53	21356,86
BH-P57	52	18568,78	2862,78	21431,56
BH-P58	42	18276,56	1908,52	20185,08
BH-P59	40	18278,14	2300,21	20578,35
BH-P60	40	18785,47	2290,22	21075,69

3.2 Penurunan Total Tiang

Perhitungan penurunan tiang melihat dari metode [9] pada rumus 13 hingga 16 dengan memasukan hasil dari data sebelumnya, maka untuk data perhitungan *Pier-51* didapat penurunan sebagai berikut:

$$S_1 = \frac{Q_b + (\xi \cdot Q_s)}{A_p \cdot E_p}$$

$$= \frac{1813,09 + (0,5 \cdot 20940,10)}{1,768 \cdot (2,06 \times 10^8 \text{ kN/m}^2)}$$

$$= 0,0000182 \text{ m}$$

$$S_2 = \frac{Q_p \times C_p}{D \cdot q_b}$$

$$= \frac{1813,09 \times 0,02}{1,5 \times 1622,89}$$

$$= 0,0148959 \text{ m}$$

$$S_3 = \frac{Q_p \times C_s}{L \cdot q_b}$$

$$= \frac{1813,09 \times 0,038}{60 \cdot 1622,89}$$

$$= 0,0007076 \text{ m}$$

Sehingga dari perhitungan rumus di atas, didapat nilai penurunan total adalah:

$$S = S_1 + S_2 + S_3$$

$$= 0,0000182 + 0,0148959 + 0,0007076$$

$$= 0,0156217 \text{ m} = 15,62 \text{ mm}$$

Perhitungan di atas merupakan contoh hitungan untuk *Pier-51*, selanjutnya akan direkap pada Tabel 9 dengan rumus sebelumnya dan mengacu pada [14] dibawah ini:

Tabel 9 Rekapitan Hasil Penurunan Total Tiang

<i>Pier</i>	Panjang Pile (m)	S_1 (m)	S_2 (m)	S_3 (m)	S_{total} (m)	S_{total} (mm)
BH-P51	56	0.0000182	0.014896	0.000708	0.0156217	15.62
BH-P52	44	0.0000139	0.023571	0.010004	0.0335891	33.59
BH-P53	48	0.0000162	0.023571	0.010670	0.0342572	34.26
BH-P54	48	0.0000155	0.023571	0.008073	0.0316598	31.66
BH-P55	44	0.0000125	0.023571	0.009118	0.0327021	32.70
BH-P56	44	0.0000142	0.023571	0.008654	0.0322392	32.24
BH-P57	52	0.0000167	0.023571	0.008256	0.0318445	31.84
BH-P58	42	0.0000123	0.023571	0.014323	0.0379064	37.91
BH-P59	40	0.0000121	0.023571	0.012336	0.0359193	35.92
BH-P60	40	0.0000124	0.023571	0.012733	0.0363172	36.32

3.3 Hasil PDA Test dengan CAPWAP

Pengujian daya dukung dan penurunan tiang kondisi asli (sudah dilakukan pengecoran tiang bor) menggunakan PDA Test. Pengujian PDA perlu dilakukan karena model pemasangan tiang menggunakan metode tiang bor, sehingga dikhawatirkan jika ada beberapa kesalahan dalam pengerjaan pondasi tiang. Untuk itu berikut hasil dari pengujian PDA dengan analisis menggunakan CAPWAP. [15], [16].

Tabel 10 Hasil Daya Dukung dan Penurunan Tiang Dengan PDA Test

No Tiang	Target Kapasitas (ton)	PDA			Hasil Analisis CAPWAP		
		RMX / RSU (ton)		Total (ton)	Kapasitas Friction (ton)	Toe (ton)	Penurunan Total (mm)
Pier-51	1836	1904	3419	3076	2676	400	13,6
Pier-52	2162	1300	909	3162	3076	86	10,4
Pier-53	2335	975	481	3191	3103	88	14,3
Pier-54	2173	513	1044	2871	2788	83	10,2
Pier-55	1930	1121	713	2982	2722	260	14,1
Pier-56	1897	2111	4692	2900	2659	241	9,4
Pier-57	1785	2205	4547	3799	3499	300	17,2
Pier-58	2121	1739	4614	3396	3358	38	12,8
Pier-59	2231	1032	2444	2678	2574	104	11,8
Pier-60	2087	1020	2719	2350	2202	164	11,2

Pada hasil Tabel 10 di atas menghasilkan nilai daya dukung dan penurunan total tiang, dimana nilai tersebut akan dibandingkan dengan hasil hitungan rencana untuk tiang, yang mana nilai daya dukung dengan PDA Test harus lebih besar dibandingkan dengan nilai daya dukung rencana, dan

nilai penurunan yang dihasilkan PDA Test harus lebih kecil dibanding hasil hitungan analisis rencana. Untuk itu hasil dari perbandingan analisis daya dukung dan penurunan tiang tersebut dapat dilihat pada Tabel 11 berikut ini:

Tabel 11 Hasil Analisis Perbandingan Daya Dukung Tiang Metode Analitis Dengan PDA Test

No Tiang	Hasil Daya Dukung Analitis (ton)	Hasil Daya Dukung PDA Test (ton)	Keterangan
Pier-51	2933,78	3076	Hasil Kekuatan Pile Aktual Aman
Pier-52	2126,33	3162	Hasil Kekuatan Pile Aktual Aman
Pier-53	2299,61	3191	Hasil Kekuatan Pile Aktual Aman
Pier-54	2136,74	2871	Hasil Kekuatan Pile Aktual Aman
Pier-55	1891,77	2982	Hasil Kekuatan Pile Aktual Aman
Pier-56	2143,40	2900	Hasil Kekuatan Pile Aktual Aman
Pier-57	2150,90	3799	Hasil Kekuatan Pile Aktual Aman
Pier-58	2025,80	3396	Hasil Kekuatan Pile Aktual Aman
Pier-59	2065,27	2678	Hasil Kekuatan Pile Aktual Aman
Pier-60	2115,18	2350	Hasil Kekuatan Pile Aktual Aman

Dengan hasil rekapan Tabel 11 di atas didapat bahwa nilai daya dukung rata-rata hasil PDA Test lebih tinggi dari pada nilai rata-rata hasil daya dukung analitis, sehingga bisa disimpulkan untuk struktur pondasi tiang aktual aman.

Tabel 12 Hasil Analisis Perbandingan Penurunan Tiang Metode Analitis Dengan PDA Test

No Tiang	Penurunan Total Tiang (mm)	Hasil Penurunan Tiang PDA Test (mm)	Keterangan
Pier-51	15,62	13,6	Hasil Kekuatan Pile Aktual Aman
Pier-52	33,59	10,4	Hasil Kekuatan Pile Aktual Aman
Pier-53	34,26	14,3	Hasil Kekuatan Pile Aktual Aman
Pier-54	31,66	10,2	Hasil Kekuatan Pile Aktual Aman
Pier-55	32,70	14,1	Hasil Kekuatan Pile Aktual Aman
Pier-56	32,24	9,4	Hasil Kekuatan Pile Aktual Aman
Pier-57	31,84	17,2	Hasil Kekuatan Pile Aktual Aman
Pier-58	37,91	12,8	Hasil Kekuatan Pile Aktual Aman
Pier-59	35,92	11,8	Hasil Kekuatan Pile Aktual Aman
Pier-60	36,32	11,2	Hasil Kekuatan Pile Aktual Aman

Kemudian hasil rekapan Tabel 12 di atas didapat bahwa nilai penurunan tiang rata-rata hasil PDA Test lebih kecil dibandingkan dengan nilai rata-rata hasil penurunan tiang analitis, sehingga bisa disimpulkan untuk struktur pondasi tiang aktual aman.

4. KESIMPULAN

Pada analisis perbandingan daya dukung dan penurunan tiang di atas didapat, kesimpulan seperti berikut ini:

- Daya dukung tiang total (Q_{ult}) yang terdiri dari kontribusi daya dukung selimut (Q_s) dan daya dukung ujung tiang (Q_b), pada *Pier-51* hingga *Pier-60*, rata-rata menunjukkan bahwa nilai dari PDA Test melebihi hasil hitungan analitis. Hal ini menunjukkan bahwa desain perencanaan pondasi yang dilakukan cukup konservatif dan aman.
- Nilai penurunan tiang hasil analisis teoritis menunjukkan bahwa seluruh pier memiliki penurunan di bawah batas toleransi, dengan nilai tertinggi sekitar 37,91 mm dan nilai terendah sekitar 15,62 mm. Hasil ini konsisten dengan hasil pengujian PDA yang menunjukkan nilai penurunan aktual lebih kecil dari hasil analitis, menandakan bahwa kondisi lapangan lebih baik dari asumsi desain.
- Hasil analisis perbandingan antara daya dukung analitis dan hasil PDA Test pada seluruh titik pier menunjukkan bahwa pondasi tiang bor yang digunakan pada proyek LRT Phase 1B Velodrome–

Manggarai memiliki performa yang baik. Seluruh tiang dinyatakan aman dan mampu menahan beban sesuai atau bahkan melebihi target rencana.

- Penggunaan PDA Test sebagai verifikasi lapangan terbukti efektif dan sangat penting untuk memastikan kualitas pemasangan tiang di lapangan, terutama untuk metode konstruksi pondasi dalam seperti tiang bor.

DAFTAR PUSTAKA

- Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8460:2017 -- Tata cara perencanaan pondasi tiang bor untuk gedung*. Badan Standardisasi Nasional.
- Bowles, J. E. (1988). *Geotechnical Engineering* (4th ed.). McGraw-Hill.
- Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design* (5th ed.). McGraw-Hill.
- Clayton, C. R. I. (1990). SPT Energy Transmission: Theory, Measurement, and Significance. *Ground Engineering*, 23(10), 35–43.
- Coduto, D. P. (1994). *Foundation Design: Principles*

- and Practices*. Prentice-Hall.
- [6] Coduto, D. P. (2001). *Foundation Design: Principles and Practices* (2nd ed.). Prentice Hall.
 - [7] Das, B. M. (2004). *Principles of Foundation Engineering* (5th ed.). Brooks/Cole – Thomson Learning.
 - [8] Das, B. M. (2011). *Principles of Foundation Engineering* (7th ed.). Cengage Learning.
 - [9] Federal Highway Administration (FHWA). (2006). *Design and Construction of Driven Pile Foundations* (Issue FHWA-NHI-16-009).
 - [10] Fellenius, B. H. (2001). *Basics of Foundation Design* (1st ed.). BiTech Publishers Ltd.
 - [11] GRL Engineers, Inc. (2006). *PDA and CAPWAP: Pile Dynamics Analyzer and Signal Matching Analysis*. Pile Dynamics, Inc.
 - [12] Poulos, H. G., & Davis, E. H. (1980). *Pile Foundation Analysis and Design*. Wiley-Interscience.
 - [13] Randolph, M. F., & Gourvenec, S. (2011). *Offshore Geotechnical Engineering*. Spon Press.
 - [14] Reese, L. C., & O'Neill, M. W. (1999). *Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods* (Issue FHWA-IF-99-025).
 - [15] Tomlinson, M. J., & Woodward, J. (2015). *Pile Design and Construction Practice* (6th ed.). CRC Press.
 - [16] Vesic, A. S. (1977). *Design of Pile Foundations* (Issue EM 1110-2-2906).