

VERIFIKASI KAPASITAS BORED PILE DENGAN DYNAMIC LOAD TESTING

Yohannes Lulie

Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Yogyakarta, Jl. Babarsari 44, Yogyakarta
Email: lulie@staff.uajy.ac.id

ABSTRAK

Ada bermacam-macam metode desain kapasitas *bored pile*, salah satunya yaitu *minimum-path method* dengan menggunakan data *cone resistance* q_c dari data uji *CPT*. Permasalahan yang ada tidak disepakati secara umum akurasi persamaan empiris analisis statik untuk mengestimasi kapasitas *bored pile* memikul beban rencana. Perlu ada kontrol kualitas pada desain fondasi *bored pile* dengan suatu verifikasi dengan uji *in situ loading test* seperti *dynamic load testing (DLT)*. Untuk dua tiang *bored pile*, hasil perbandingan secara empiris *minimum-path method* dan uji *DLT* masing-masing parameter yaitu: kapasitas dukung selimut 47,76% lebih kecil; kapasitas dukung ujung 306,63% lebih besar; kapasitas dukung F_{pile} 153,66% lebih besar; *safety factor* kapasitas dukung 1,2 kali lebih besar. Dengan *safety factor* sebesar 2,5 untuk mengkoreksi hasil akhir daya dukung berfaktor cara empiris memberi keamanan 1,2 kali lebih besar terhadap uji *DLT*. Selisih ratio 1,2 masih sangat konservatif. Saran dari hasil kajian adalah daya dukung *bored pile* berfaktor akan mendekati sama antara cara empiris dan cara *DLT* bila *safety factor* sebesar 3 (tiga) untuk metode empiris (*minimum-path method*).

Kata kunci: CPT, bored pile, dynamic load testing

1. PENDAHULUAN

Banyak metode desain untuk mendapat *ultimate base resistance* (F_{ub}), *ultimate shaft resistance* (F_{us}), kapasitas *axial working load pile* dan *settlement* fondasi *bored pile*. Tidak ada masalah bagaimana baiknya atau kasarnya suatu metode desain. Para insinyur telah menggunakannya secara intensif, dan telah membandingkan hasilnya dengan konsekuensi yang timbul selama dan sesudah pembangunan pada banyak proyek, belajar dari kesulitan dan keterbatasan yang ada dan keuntungan yang didapat dari penggunaannya. Hal ini merupakan bagian pertimbangan, dan pada waktunya merupakan suatu bantuan yang sangat berharga (Lulie, 2007).

Bored pile telah banyak digunakan sebagai fondasi bangunan. Ada beberapa issue yang berhubungan dengan desain *bored pile* dan pelaksanaannya. Pertama persamaan analisis statik yang ada untuk mengestimasi kapasitas untuk memikul beban rencana tidak disepakati secara umum berkaitan dengan akurasi. Beberapa tipe tes verifikasi lapangan, seperti *static load tests* atau *dynamic pile testing* perlu dilakukan di lapangan untuk menjamin kapasitas *bored pile*. Kedua, tidak kontinu *bored pile* pada pelaksanaan, sehingga akan berpotensi menyebabkan kerusakan struktural saat beban bekerja, (ODOT, 2007; Fellenius, 1999).

Perlu adanya kualitas kontrol pada desain *bored pile* dengan suatu verifikasi menjamin kapasitas *bored pile* di lapangan dengan alat seperti *Pile driving analyzer*.

Akar permasalahan pada penelitian ini adalah persamaan analisis statik untuk mengestimasi kapasitas memikul beban rencana tidak disepakati secara umum akurasi. Perlu adanya kualitas kontrol pada desain *bored pile* dengan suatu verifikasi menjamin kapasitas *bored pile* di lapangan dengan alat seperti *Pile driving analyzer*.

Tujuan penelitian ini adalah dengan melakukan uji pembebanan (*loading test*) dengan memverifikasikan kapasitas dukung normal tekan fondasi *bored pile*. Dari hasil pengujian akan didapat informasi besarnya kapasitas dukung termobilisir, dengan faktor keamanan 2 (dua) dipakai untuk menilai apakah beban kerja rencana dapat diterima *bored pile* dengan aman.

Penelitian ini diharapkan bermanfaat, antara lain: bagi pihak konsultan dan praktisi, informasi yang akan diperoleh dari hasil penelitian ini ada untuk perbaikan kriteria kontrol kualitas dan mengembangkan *database* kalibrasi *bored pile*. Bagi masyarakat kampus penelitian ini sebagai kajian dasar perkembangan ilmu *geotechnical* yang akhir-akhir ini semakin nampak peranannya dalam dunia rancang bangun konstruksi.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Fondasi tiang pada pasir (Sand)

Formula standard untuk hitungan *ultimate pile resistance* untuk fondasi tiang pada pasir dapat ditransformasi dari hasil penggunaan *tip resistance* dan *local friction* uji *CPT*. Faktor keamanan pada Tabel 1. *Overall safety factor* = $1,33 \times 1,33 \times 1,40 = 2,5$.

$$F_{pile} = F_{BASE} + F_{SHAFT}$$

Tabel 1. Faktor keamanan (*safety factor* γ)

Influence	γ
Scale effect	1,33
Statistical chance	1,33
Over load	1,40

Tahanan dasar tiang (*pile base resistance*) diambil dalam hitungan adalah pada $4D_{PILE}$ di bawah dan $8D_{PILE}$ di atas dasar tiang (*pile-base*). Gunakan *minimum-path method* dan diambil nilai hitungan rata-rata dari tahanan ujung (*tip-resistance*), (Brower, 2002).

Koefisien korelasi (*correlation coefficients*) untuk tahanan dasar (*base resistance*) seperti di Tabel 2.

Tabel 2. Correlation coefficients for base resistance ξ

Pile type	ξ
<i>Displacement piles</i>	
Driven piles	1,0
Formed in situ, bored piles, like vibro	1,2
Screw piles	0,6
<i>Non-displacement piles</i>	
Continuous Flight Auger (CFA) concrete piles	0,6
Bored piles, cast in situ	0,6

Settlement pada fondasi tiang

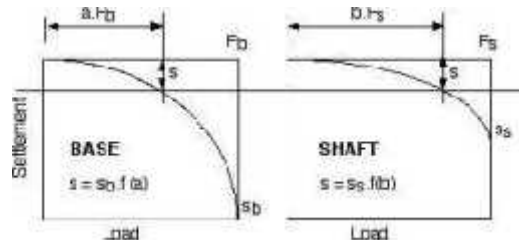


Figure 1. Load and Settlement curves

Safe load:

$$F_{pile} = (F_b + F_s) / 1.4$$

$$s = s_b f(a); \quad s = s_s f(b); \quad F_{pile} = a.F_b + b.F_s; \quad (0 \leq a; b \leq 1).$$

dimana:

$F_{u,b}$ = ultimate base resistance derived from CPT,

$F_{u,s}$ = ultimate shaft resistance derived from CPT,

F_b = corrected base resistance = $F_{u,b} / (1.33 \times 1.33)^*$

F_s = corrected shaft resistance = $F_{u,s} / (1.33 \times 1.33)^*$

corrections for scale effect and statistical chance.

Gambar 1 *settlement curves* di atas berupa fungsi *exponential*. *Settlement* saat sebelum runtuh (*collapse*) dari tahanan dasar (*base resistance*) sebesar 10% diameter tiang untuk *driven piles* untuk pasir padat (*dense sand*). Pada Tabel 3 ditampilkan persamaan *settlement* untuk bermacam tiang antara lain: *driven piles*, *CFA piles*, *bored piles*, *cast in situ* di tanah pasir. Sedangkan *Settlement* saat sebelum runtuh (*collapse*) dari shaft-resistance nilai tetap sebesar 10 mm untuk *driven piles* untuk pasir padat (*dense sand*). Demikian juga, *Settlement* saat sebelum runtuh (*collapse*) untuk *non-displacement piles*, mendekati 2 (dua) kali *settlement* dari *displacement piles*, (Brower, 2002).

Pengujian di lapangan

Pengujian pembebanan dinamis (*dynamic load testing*, DLT) dilakukan dengan memasang dua buah sensor yaitu *strain transducer* dan *accelerometer transducer* pada sisi-sisi tiang dengan posisi saling berhadapan, dekat dengan kepala tiang. Kedua sensor tersebut mempunyai fungsi ganda, masing-masing menerima perubahan percepatan dan regangan. Gelombang tegangan tekan akan merambat dari kepala tiang ke ujung tiang (*toe*). Setelah itu gelombang tersebut akan dipantulkan kembali menuju kepala tiang dan ditangkap oleh sensor, (Fellenius, 2002; Testana Engineering, 2007).

Metode analisis TNOWAVE-DLTWAVE

Setelah pengujian beban dinamik, dilakukan analisis menggunakan program *DLTWAVE*, suatu modul gelombang dari *TNOWAVE* yang adalah program aplikasi analisis numerik dengan model matematis *soil pile*. Data tanah dari tiang dimodelkan dan hitungan dilakukan berdasarkan persamaan gelombang satu dimensi. Model tanah menggambarkan perilaku tanah dalam pengertian sebagai fungsi *displacement*, *velocity* dan *acceleration* dengan menggunakan parameter empiris yang tergantung dari data tanah. Parameter tanah yang dipakai dalam permodelan ini mengacu pada laporan hasil penyelidikan tanah.

Analisis *TNOWAVE-DLTWAVE* dikerjakan dengan cara mencocokkan kurva (*matching curve*) simulasi secara otomatis dengan hasil perilaku *bored pile* yang diukur selama pelaksanaan DLT di lapangan. Parameter tanah yang diperoleh dari *signal matching* kemudian dianalisis dengan program *TNOSTAT* untuk mendapatkan diagram *load displacement* dari tiang yang diuji, (Keller, 2008; Testana Engineering, 2007).

3. LOKASI, DATA, APLIKASI DESAIN

Lokasi penelitian

Lokasi penelitian di lokasi Bangunan Erlangga Publisher, Jalan Gedong Kuning, Yogyakarta. Mengingat area Bangunan Erlangga Publisher ini yang dekat pemukiman perlu adanya penentuan jenis *pile* yang akan digunakan yaitu *bored concrete pile*. Diameter *pile* yang akan dipakai dalam desain berukuran diameter 400 mm. *Lay out* Bangunan Erlangga Publisher.

Hand boring dan uji sondir

Hand boring dilakukan sebanyak 3 titik, yaitu B1, B2, B3. Kedalam titik *hand boring* masing-masing -5,00 m; -7,00; dan -5,00 untuk B1; B2; B3. Tujuan *hand boring* untuk memperoleh sampel tanah dari lapangan kemudian dibawa ke Laboratorium Mekanika Tanah UAJY untuk di periksa *soil properties*. Parameter *soil properties* mencakup yaitu: *Young's modulus*, *effective friction angle*, *undrained shear strength*, *coefficient of primary consolidation*, *coefficient of secondary consolidation*, *water content*, *wet unit weight*, *specific gravity*.

Kapasitas *CPT* sebesar 60 MPa. Uji *CPT* sebanyak 7 (tujuh) titik, yaitu titik sondir SB1 sampai SB7. Dari hasil uji *CPT* akan didapat *tip resistance* dan *side skin friction*. Nilai *tip resistance* dan *side skin friction* digambar pada sumbu absis dan kedalaman penetrasi pada sumbu ordinat. Langkah selanjutnya seperti dilakukan pada tahap kompilasi data primer untuk menentukan di *layer* (-8,50 m) di mana ujung tiang *bored pile* diletakkan.

Stratigrafi lapisan tanah

Titik sondir SB1 sampai SB7 menginformasikan pola yang hampir sama. Tahanan konus q_c (*static cone resistance*) yang rendah pada peil $\pm 0,00$ sampai -1,00 m. Nilai q_c yang tidak konstan naik turun bergantian pada *range* peil -1,00 m sampai -7,80 m. Pada *range* -5,00 m sampai -6,60 m nilai q_c rendah hanya 1,13 MPa, berupa jenis tanah *very loose sand*.

Nilai q_c rata-rata di atas 10 MPa pada peil -8,00 m ke bawah (lebih dalam lagi). Nilai q_c meningkat secara konstan sesuai pertambahan kedalaman mulai pada *range* peil -10,20 m ~ -10,40 m. Kekuatan penetrasi maksimum dengan nilai $q_c = 60$ MPa bervariasi di antara -11,30 m sampai -12,30 m.

Dimensi bored pile

Dimensi *bored pile* berdiameter 400 mm. Pertimbangan menentukan diameter tiang *bored pile* seperti di atas atas pertimbangan tekuk kalau diambil lebih kecil dari ukuran 400 mm. Sedangkan diameter yang lebih besar dari 400 mm tidak akan tercakup efek syarat 8D ke atas dari ujung tiang.

Desain kapasitas bored pile

Kedalaman *bored pile tip* ditentukan di peil -8,50 m, mengingat di kedalaman tersebut nilai *static cone resistance* q_c sudah memadai, periksa pada uraian stratigrafi lapisan tanah

Hitungan tahanan dasar tiang (*pile base resistance*) diambil pada $4D_{PILE}$ di bawah dan $4D_{PILE}$ serta $8D_{PILE}$ di atas dasar tiang (*pile-base*). Digunakan nilai hitungan rata-rata dari tahanan ujung q_c (*tip-resistance*) berdasarkan *minimum-path method*, (Brower, 2002). Untuk lebih jelas dapat dilihat pada Tabel 4 untuk *bored pile* diameter 400 mm.

Tabel 4. Hubungan nilai *static cone resistance* q_c terhadap diameter *bored pile*

Kedalaman (m)	Diameter <i>bored pile</i> (mm)							
	400							
	q_c (MPa)							Mean q_c (MPa)
SB1	SB2	SB3	SB4	SB5	SB6	SB7		
8D (-5,30)	3,50	2,50	3,15	3,10	2,80	5,75	3,75	3,507
4D (-6,90)	4,50	4,60	6,00	2,75	3,25	2,70	4,50	4,043
PB (-8,50)	16,00	16,25	15,75	16,50	13,00	14,50	13,60	15,086
4D (-10,10m)	9,50	14,15	14,00	28,25	13,5	15,00	31,00	17,914

Note; *PB (Pile Base)* sebagai kedalaman referensi ke atas dan ke bawah

Aplikasi desain *bored pile* dengan diameter 400 mm

Base resistance

Average tip resistance = $((17,914+15,086)/2)+(3,507+4,043)/2=10,228$ MPa.

Ultimate base resistance $F_{ub} = 0,25 \times 400^2 \times 10,228 \times 1,2 = 1542,35$ kN.

Shaft resistance

Ultimate shaft resistance $F_{us} = 1\% \times 15,086 \times 400 \times 1,6 = 303,32$ kN.

$F_{pile} = 1542,35 + 303,32 = 1845,57$ kN.

Working load = $1845,57 / 2,5 = 738,23$ kN, (*safe load*).

Used load $F_{pile} = 735$ kN.

$F_b = 1542,35 / (1,33 \times 1,33) = 872$ kN

$F_s = 303,22 / (1,33 \times 1,33) = 172$ kN

$F_{PILE} = (872 + 172) / 1,4 = 746$ kN

Settlement analysis

Periksa Gambar 1 Load and Settlement curves Analysis

$$s = 25a^3$$

$$s = 10b^3$$

$$25a^3 = 10b^3$$

$$b = 1,36a$$

$$F_{PILE} = 872a + 172b = 746$$

$$F_{PILE} = 872a + 172 \times 1,36a = 746$$

$$a = 0,675$$

$$b = 1,36 \times 0,675 = 0,918$$

$$a \times F_b = 0,675 \times 872 = 588$$
 kN

$$b \times F_s = 0,918 \times 172 = 158$$
 kN

$$F_{PILE} = 746$$
 kN, (G).

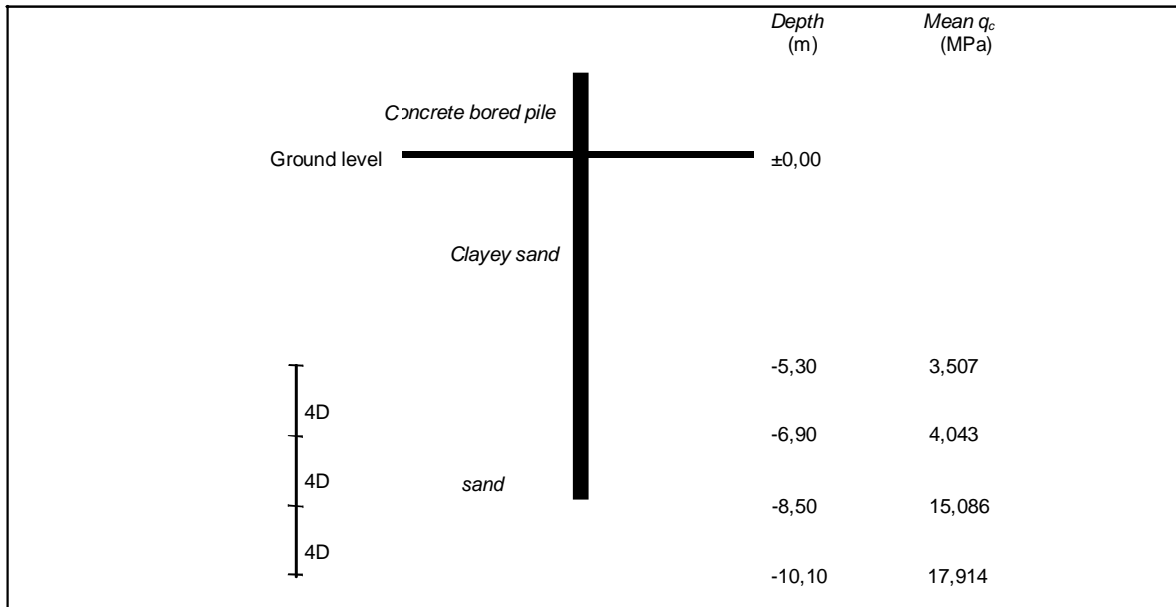
$$\text{Settlement, } s_1 = 25a^3 = 25 \times 0,675^3 = 7,69$$
 mm.

$$\text{Settlement, } s_2 = 0,2D [(F_{PILE} - F_s) / F_b]^2, \text{ dengan syarat } 20 \text{ mm} < s_2 < 0,2D.$$

$$s_2 = 0,2 \times 400 [(746 - 172) / 872]^2 = 34,66$$
 mm

$$\text{dengan syarat: } 20 \text{ mm} < s_2 < 0,2 \times 400 \text{ mm,}$$

$$20 \text{ mm} < s_2 < 80 \text{ mm (G).}$$

Gambar 2. Kedalaman concrete bored pile dan mean q_c

Pengujian di lapangan

Pengujian di lapangan meliputi 2 titik uji pembebanan dinamis (*DLT, dynamic load testing*) menggunakan alat *FPDS-7*. Sketsa letak *bored pile* yang diuji pada Lampiran 1. Tujuan uji pembebanan (*loading test*) adalah untuk memverifikasikan kapasitas dukung normal tekan *bored pile*. Dari hasil-hasil pengujian didapatkan informasi besarnya kapasitas dukung termobilisasi, umumnya dengan faktor keamanan 2 (dua) dipakai untuk menilai apakah beban kerja rencana dapat diterima tiang dengan aman.

DLT dilakukan dengan memasang 2 (dua) buah sensor yaitu *strain transducer* dan *accelerometer transducer* dengan posisi saling berhadapan pada sisi-sisi *bored pile* dekat dengan *pile cap* (kepala tiang). Kedua sensor *strain transducer* dan *accelerometer transducer* masing-masing menerima perubahan percepatan dan regangan. Gelombang tegangan tekan akan merambat dari *pile cap* ke *pile toe* (ujung tiang), kemudian gelombang tersebut akan dipantulkan kembali menuju pile cap dan diterima oleh sensor.

Gelombang yang diterima sensor secara otomatis akan direkam oleh komputer. Hasil rekaman gelombang ini akan menjadi dasar bagi analisis yang menggunakan program *TNOWAVE-DLTWAVE*. Pengujian dilaksanakan sesuai standar ASTM D-4945. Gelombang pantul yang ditimbulkan oleh reaksi tanah menyebabkan kapasitas dukung ujung dan gesek akan memberikan kapasitas dukung termobilisir (*mobilized capacity*).

Data teknis

Spesifikasi data teknis *bored pile*, *hammer* penguji dan alat *FPDS-7* sesuai dengan ada di lapangan dapat dilihat pada Tabel 5 ~ 7.

Data teknis *bored pile*

Spesifikasi data teknis *bored pile* yang terpakai dapat dilihat pada Tabel 5.

Tabel 5. Data teknis *bored pile*

Tipe tiang	Bored pile	
	PC 102	PC 56
No. tiang yang di uji	PC 102	PC 56
Diameter tiang (mm)	Ø 400	Ø 400
Total panjang tiang (m)	± 10	± 10,2
Panjang tiang terbenam (m)	± 8,5	± 8,5
Tanggal instalasi	8-3-2007	8-3-2007
Tanggal uji	20-4-2007	20-4-2007
Umur tiang saat diuji (hari)	43	43
Beban ulimit rencana (kN)	± 1200	± 1200
Mutu beton	K-225	K-225

Tinggi <i>transducer</i> (m)	$\pm 0,90$	$\pm 0,90$
------------------------------	------------	------------

Data teknis *hammer* untuk pembebanan dinamis

Pengujian *DLT* dengan sistem pembebanan menggunakan *dropped hammer*. Persyaratan yang harus dipenuhi adalah:

- berat *hammer* : minimal 1% s/d 1,5% beban ultimit rencana,
- tinggi jatuh : minimal 8,5% panjang tiang terpenetrasi.

Spesifikasi data teknis *hammer* dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Spesifikasi data teknis *hammer*

Tipe <i>hammer</i>	<i>Dropped hammer</i>
Berat <i>hammer</i>	16 kN
Tinggi jatuh	± 1 m
<i>Rated energy hammer</i>	$\pm 15,67$ kNm

Data teknis FPDS-7

Spesifikasi data *strain* dan *acceleration transducer* yang digunakan dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Spesifikasi data *strain* dan *acceleration transducer*

<i>Strain transducer</i>	
<i>Serial number strain transducer channel 1</i>	D 182
<i>Calibration factor strain transducer channel 1</i>	2,37
<i>Serial number strain transducer channel 2</i>	D 472
<i>Calibration factor strain transducer channel 2</i>	2,60
<i>Acceleration transducer</i>	
<i>Serial number acceleration transducer channel 1</i>	10087
<i>Calibration factor acceleration transducer channel 1</i>	0,0177 mV/g
<i>Serial number acceleration transducer channel 2</i>	10099
<i>Calibration factor acceleration transducer channel 2</i>	0,0186 mV/g

Pelaksanaan Metode analisis *TNOWAVE-DLTWAVE*

Setelah *pile PC 102* dan *pile PC 56* diujikan beban dinamik, kemudian dilakukan analisis menggunakan program *DLTWAVE*. Program *DLTWAVE* adalah suatu modul gelombang dari *TNOWAVE* merupakan program aplikasi analisis numerik dengan model matematis *soil pile*. Analisis *TNOWAVE-DLTWAVE* dikerjakan dengan cara mencocokkan kurva (*matching curve*) simulasi secara otomatis dengan hasil perilaku *bored pile* yang diukur selama pelaksanaan *DLT* di lapangan. Parameter tanah yang diperoleh dari *signal matching* kemudian dianalisis dengan program *TNOSTAT* untuk mendapatkan diagram *load displacement* dari tiang yang diuji.

4. HASIL UJI DAN ANALISIS

Hasil pengujian pembebanan dinamis (*DLT*) merupakan kapasitas dukung termobilisir, yang besarnya ditentukan oleh beban/energy yang dikerjakan dalam pengujian. Selanjutnya, kapasitas termobilisir dan kapasitas dukung serta penurunan (*settlement*) *bored pile* akan diperoleh dari hasil pengujian, yang dapat dilihat pada Tabel 8.

Tabel 8. Kapasitas termobilisir, kapasitas dukung dan *pile settlement* uji *DLT*

No. <i>bored pile</i>	Kapasitas dukung selimut (kN)	Kapasitas dukung ujung (kN)	Kapasitas dukung termobilisir (kN)	Kapasitas dukung dengan SF = 2 (kN)	<i>Settlement</i> (mm)
PC 102	635	566	1201	600,5	± 1
PC 56	721	503	1224	612,0	± 2

Note: *immediate settlement* adalah perpindahan sesaat ketika beban mencapai kapasitas dukung dengan *safety factor* (SF) = 2, dan tidak menyatakan penurunan konsolidasi.

Tabel 9. Kapasitas F_{pile} , kapasitas dukung dan *pile settlement* secara empiris

No. <i>bored pile</i>	Kapasitas dukung selimut (kN)	Kapasitas dukung ujung (kN)	Kapasitas dukung F_{pile} (kN)	Kapasitas dukung dengan SF = 2,5 (kN)	<i>Settlement</i> (mm)	
					s_1	s_2
<i>All pile</i>	303,32	1542,35	1845,57	738,23	7,69	34,66

Kalau dicermati Tabel 9 hasil desain *bored pile* secara empiris dan dibandingkan dengan Tabel 8 uji *DLT*. Perbedaan kapasitas dukung selimut (lebih kecil 47,76%), kapasitas dukung ujung (lebih besar 306,63%), kapasitas dukung F_{pile} (lebih besar 153,66%) dan kapasitas dukung dengan *safety factor* (lebih besar 120,62% atau 1,2 kali) antara cara empiris dan uji *DLT*. Demikian juga untuk settlement s_1 maupun s_2 cara empiris lebih konservatif dibandingkan dengan uji *DLT*.

Safety factor sebesar 2,5 untuk mengkoreksi hasil akhir daya dukung berfaktor cara empiris memberi keamanan 1,2 terhadap uji *DLT*. Daya dukung berfaktor akan mendekati sama antara cara empiris dan uji *DLT* bila *safety factor* sebesar 3 (tiga) untuk metode empiris.

5. KESIMPULAN

Dari aplikasi desain secara empiris dan hasil analisis pengujian pembebanan dinamis (*DLT*) di bab depan ada empat kesimpulan penting.

- Langkah awal dalam proses desain fondasi tiang adalah menentukan kapasitas fondasi *pile* seperti yang direkomendasikan pada laporan penyelidikan tanah. Dasar analisis berdasarkan dari parameter-parameter tanah yang diuji. Sampel titik pengujian yang terbatas dan analisis kapasitas *pile* berdasarkan *mean value*. Kalau dicermati statigrafi tanah dan tahanan konus di setiap penyelidikan *CPT* tidaklah memberikan nilai yang sama dan seragam. Perlu dilakukan analisis pendekatan desain kapasitas *pile* yang akurat baik berdasarkan setiap titik fondasi *pile* maupun secara menyeluruh rata-rata. Untuk itu, perlu adanya metode pendekatan desain kapasitas fondasi *pile* yang cepat dan murah.
- Kapasitas *bored pile* dari pengujian *DLT* untuk PC 102 dan PC 56 menunjukkan ada perbedaan kapasitas dukung selimut, kapasitas dukung ujung, kapasitas dukung termobilisir, kapasitas dukung berfaktor dan settlement. Perbedaan ini menunjukkan respon tanah pada fondasi *pile* PC 102 dan PC 56 berbeda.
- Hasil desain *bored pile* secara empiris (Tabel 5.6) dan dibandingkan dengan uji *DLT* (Tabel 5.6) ada perbedaan: kapasitas dukung selimut (lebih kecil 47,76%), kapasitas dukung ujung (lebih besar 306,63%), kapasitas dukung F_{pile} (lebih besar 153,66%) dan kapasitas dukung dengan *safety factor* (lebih besar 120,62% atau 1,2 kali).
- Settlement* pada *pile*, $s_1 = 25a^3$ dan $s_2 = 0,2D [(F_{PILE} - F_s) / F_b]^2$ cara empiris lebih moderat dibandingkan dengan cara pengujian *DLT*.

6. SARAN

Ketidakpastian yang ada pada tanah di mana *bored pile* berpijak dan adanya bermacam-macam metode desain kapasitas *bored pile*, termasuk metode desain *minimum-path method* dengan menggunakan data *cone resistance* q_c dari uji *CPT*. Untuk mengetahui penyimpangan maupun keakurasian dari hasil desain suatu metode pendekatan perlu diuji kemampuan struktur suatu *bored pile* dengan uji *in situ loading test* seperti *dynamic load testing* dengan alat *FPDS-7*. Kebijakan akan muncul apakah *safety factor* dalam desain dapat mengatasi perbedaan sehingga masih dapat ditoleransi dalam kondisi batas aman dan sebagai evaluasi desain selanjutnya ke arah lebih baik.

Dengan *safety factor* sebesar 2,5 untuk mengkoreksi hasil akhir daya dukung berfaktor cara empiris memberi keamanan 1,2 terhadap uji *DLT*. Selisih ratio 1,2 masih cukup besar. Saran yang dapat dipertimbangkan selanjut daya dukung berfaktor akan mendekati sama antara cara empiris dan uji *DLT* bila *safety factor* sebesar 3 (tiga) untuk metode empiris (*minimum-path method*).

Perlu dilakukan banyak lagi penelitian yang menguatkan *safety factor* 3 seperti yang direkomendasikan untuk metode empiris (*minimum-path method*) baik di tanah berpasir (*sand*) dan jenis tanah yang lain (*silt, clay, mixed soils*) serta untuk bermacam-macam fondasi *pile* seperti: *driven pile, Continuous Flight Auger (CFA-Pile)*.

DAFTAR PUSTAKA

- Brouwer, J.J.M., 2002, *Guide to Cone Penetration Testing on Shore and Near Shore*, Lankelma, Cone Penetration Testing LTD, Iden, East Sussex.
- Fellenius, B.H., 1999, "Using the Pile Driving Analyzer", *Annual Meeting*, San Diego.
- Fellenius, B.H., 2002, *Pile Dynamics in Geotechnical Practice Six Case Histories*, Urkkada Technology, LTD. Ottawa, Ontario.
- Keller Company, 2008, *Dynamic Load Testing*, 56 Station St, Parramatta, NSW.
- Lulie, Y.; Suryadharma, Y.H., 2007, "Kapasitas Fondasi Tiang dari Metode Langsung Cone Penetration Test", *Laporan Penelitian*, Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Atma Jaya Yogyakarta.
- ODOT, 2007, *Dynamic Pile Testing Technology: Validation and Implementation*, 1980 West Broad Street, Columbus, OH.
- Testana Engineering, Inc., 2007, *Laporan Uji Pembebanan Tiang*, DLT.PD-03/ HX.05-03/ 2007, Surabaya.