

PENGARUH PERUBAHAN DIAMETER LUBANG TERHADAP DAYA DUKUNG TIANG BOR: STUDI KASUS PROYEK JEMBATAN PULAU BALANG - BALIKPAPAN

Muhammad An Al Marwaji¹, Yulian Firmana Arifin²

^{1,2}Program Studi Magister Teknik Sipil, Universitas Lambung Mangkurat, Banjarmasin, 70123

²Program Studi Pendidikan Profesi Insinyur, Universitas Lambung Mangkurat, Banjarbaru, 70714

ABSTRAK

Jembatan Pulau Balang dibangun melintasi teluk Balikpapan menghubungkan Kabupaten Penajam Paser Utara dengan Kotamadya Balikpapan. Bangunan atas Jembatan Pulau Balang adalah *cable stayed* yang disokong oleh 2 buah pylon. Struktur bawah dari Pylon disokong oleh kelompok *bored pile* dimana pada saat pengecoran ditemukan volume aktual beton lebih besar dari volume rencana pile. Penelitian ini bertujuan mengetahui perubahan dimensi lubang bor dan daya dukung *bored pile* karena perubahan dimensi lubang bor tersebut. Analisis dilakukan dengan membandingkan daya dukung rencana, daya dukung aktual, dan daya dukung yang didapat dari pengujian beban bi-aksial Osterberg Cell Test. Dari perhitungan daya dukung menggunakan persamaan daya dukung selimut daya dukung ujung dan pengujian daya dukung berdasarkan OC Test didapatkan daya dukung aktual lebih dari daya dukung rencana, dan lebih dari daya dukung hasil pengujian lapangan. Didapatkan juga perbedaan diameter aktual lubang bor tidak berhubungan dengan jenis lapisan tanah yang ada. Besarnya kenaikan daya dukung hasil OC test terhadap $2xQ_{izin}$ tidak sebanding dengan kenaikan akibat pembesaran diameter tiang. Sehingga kenaikan besarnya hasil OC test dapat disebabkan oleh pembesaran diameter atau bersama-sama dengan faktor lain.

Kata kunci: diameter, *bored pile*, volume beton, daya dukung, Osterberg Cell test

1 PENDAHULUAN

Pembangunan Jembatan Pulau Balang merupakan salah satu program pembangunan Jalan dan Jembatan untuk pengembangan jaringan jalan di Provinsi Kalimantan Timur. Pembangunan jembatan ini diharapkan meningkatkan prasarana yang mendukung pertumbuhan ekonomi dan kesejahteraan masyarakat secara lokal, regional, dan nasional. Jembatan Pulau Balang menghubungkan Pulau Balang, Kabupaten Penajam Paser Utara dengan Tempadung, Kotamadya Balikpapan.

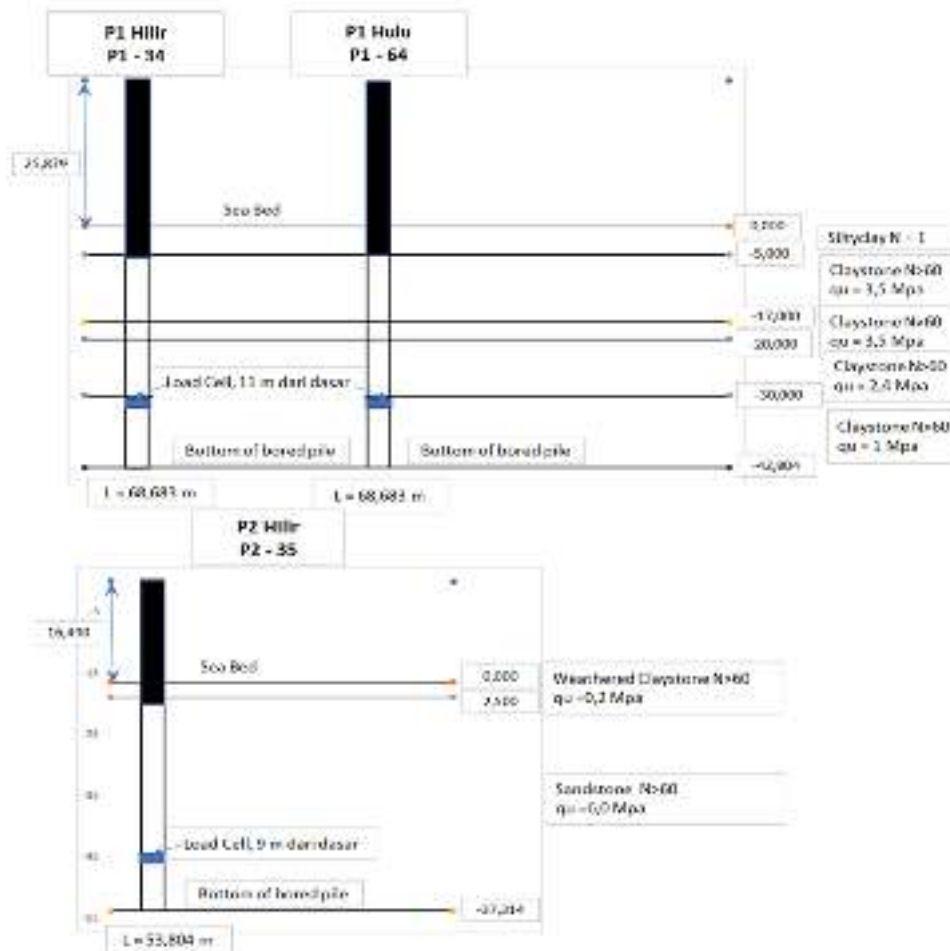
Superstructure Jembatan Pulau Balang merupakan *stayed bridge* sepanjang 2 x 402 m, dengan 2 *pylon* yang berdiri di atas 4 buah *pile cap* yang didukung oleh 4 x 36 buah *bored pile*. Jumlah tiang yang digunakan total

144 tiang bor. Tiang bor didesain menggunakan *casing* pipa baja untuk bagian di atas dasar laut dan selebihnya sampai ke dasar lubang bor tidak menggunakan *casing* (Gambar 1). Hal ini dilakukan karena lapisan tanah di lokasi tersebut adalah lapisan *claystone* dan *sandstone* yang memiliki nilai q_u antara 1-6 MPa.

Untuk mencapai target waktu pelaksanaan, ada beberapa tipe alat bor yang digunakan yaitu Zhongrui Airlift, Buma Airlift, dan Zhongrui Suction dengan diameter 1.8 m. Dalam perhitungan daya dukung pile, diameter desain yang digunakan adalah 2 m. Untuk bagian *casing* yang tidak ada perubahan antara diameter desain dan aktual, sedangkan untuk bagian bawah *casing* sampai ke dasar lubang, ada terjadi perubahan diameter. Indikasi ini terlihat dari volume beton yang masuk pada saat pengecoran.

Pada pekerjaan tiang bor, ada dua istilah umum yang menggambarkan terjadinya perubahan diameter yaitu *necking* dan *bulging* yang masing-masing mengakibatkan

Correspondence: Yulian Firmana Arifin
Email: y.arifin@ulm.ac.id



Gambar 1. Simplifikasi bored pile dan lapisan tanah

pengecilan dan pembesaran diameter tiang. Beberapa ahli berpendapat bahwa *bulging* tidak dianggap sebagai kerusakan tiang. Wakil dan Kassim (2010) menyatakan bahwa *bulging* dapat meningkatkan daya dukung *pile* meskipun masih dianggap sebagai cacat pada tiang. Di sisi lain, Chan (1987) melaporkan bahwa bercampurnya material tanah akibat runtuhnya dinding lubang dapat mengakibatkan berkurangnya daya dukung tiang.

Pile integrity test harus dilakukan untuk meyakinkan bahwa tidak ada material lain yang bercampur dengan beton akibat runtuhnya dinding lubang (Chan, 1987). Metode ini terbukti akurat dan dapat diandalkan untuk mengetahui cacat pada *pile* (Hollema dan Olson, 2003). Pada proyek ini, *crosshole sonic logging* (CSL) dilakukan untuk memeriksa integritas tiang. Hasilnya, tidak ditemukan adanya kerusakan akibat perubahan diameter tersebut.

Banyak metode yang disarankan untuk

perhitungan daya dukung tiang bor yang dibangun pada batuan seperti Williams & Pells (1981), Kulhawy & Phoon (1993), O'Neill & Reese (1999), Zhang (2010), dan yang terbaru Rezazadeh and Eslami (2017). Masing-masing memiliki kelebihan dan kekurangan meskipun parameter yang digunakan relatif sama. Oleh karena itu, hasil perhitungan tersebut biasanya dibandingkan dengan hasil uji lapangan.

Salah satu metode yang digunakan untuk mengetahui daya dukung pondasi di lapangan adalah metode *Osterberg cell test* atau OC test atau kadang disebut juga *biaxial test*. Metode ini juga digunakan untuk menentukan daya dukung tiang bor jembatan Suramadu (Irsyam dkk, 2007).

Sehubungan dengan adanya indikasi perubahan diameter lubang bor yang terjadi, paper ini membahas mengenai hubungan tipe tanah dengan perubahan diameter, daya dukung tiang berdasarkan diameter actual, perbandingan antara daya dukung dari diameter rencana, daya dukung dari diameter actual, dan

hasil uji lapangan dengan metode *OC test*.

2 DATA TANAH DAN SUB-LAPISAN TANAH

Pengujian Bor dalam dilakukan pada sisi Tempadung yang diberi nama BH-1, dan pada sisi Pulau Balang yaitu BH-2. Hasil investigasi tanah berupa sub lapisan tanah dan data SPT terlihat pada Gambar 2. Terlihat pada gambar, seluruh lapisan tanah memiliki $N_{SPT} > 60$ kecuali lapisan tanah permukaan. Tanah terdiri atas lapisan *claystone* dan *sandstone* dengan ketebalan yang berbeda-beda.

3 DIAMETER *BORED PILE* AKTUAL

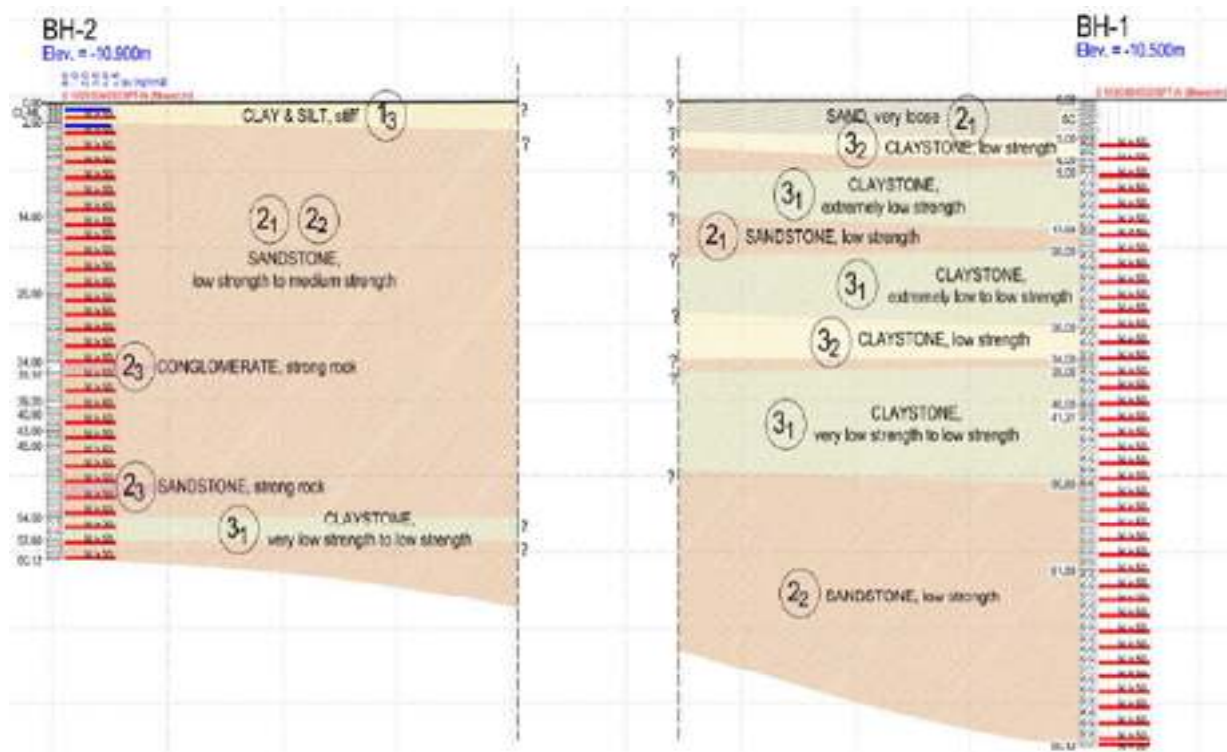
Diameter lubang bor aktual didapatkan dari data volume beton yang dimasukkan kedalam lubang bor, dan beda kedalaman sebelum dan sesudah beton ditumpahkan. Volume beton yang masuk diasumsi sama dengan volume tabung sehingga diameter yang didapat adalah diameter rata-rata (Persamaan 1).

$$D_{rata-rata} = \sqrt{\left(\left(\frac{\Delta V}{\Delta H}\right) * \frac{4}{\pi}\right)} \quad (1)$$

dimana $D_{rata-rata}$ adalah diameter rata-rata, ΔV penambahan volume beton, dan ΔH merupakan perbedaan kedalaman permukaan beton sebelum tremie dipotong dan kedalaman permukaan beton setelah beton. Gambar 3-5 memperlihatkan contoh hasil perhitungan diameter sepanjang tiang bor yang dihitung dengan Persamaan 1.

Terlihat pada Gambar 3 dan Gambar 4 pada bagian dasar *bored pile* sampai ujung dasar *casing* merupakan lapisan *claystone* dimana bagian dasar *bored pile* P1-68 diameter sampai 3,9 m. Pembesaran penampang *bored pile* dibagian dasar diindikasikan disebabkan adanya aktifitas pembersihan (*flushing*) bagian dasar *bored pile*. Pada bagian di atas pemotongan *tremie* ke-1 sampai ujung dasar *casing*, terjadi perubahan diameter yang bervariasi dengan diameter terkecil 1,73 m sampai 3,3 m.

Pada Gambar 5 di lokasi *flushing area*, ditemukan diameter terbesar 2,49 m, pada bagian atas *flushing area* sampai bagian dasar



Gambar 2. Sub Lapisan Tanah BH-1 di Tempadung dan BH-2 di Pulau Balang

casing diameter terbesar 3,17 m. Terjadi pembesaran diameter lubang bor pada *flushing area* untuk *claystone* lebih besar dari pada *sandstone*. Ditemukan pula pada beberapa titik bored pile, diameter aktual pada *claystone* lebih kecil dari pada diameter aktual pada lapisan *sandstone*, sehingga pengaruh jenis tanah belum bisa dipastikan sebagai penyebab terjadinya keruntuhan lubang bor, sehingga diameter lubang bor menjadi lebih besar. Selain proses flushing, penggunaan alat bor yang berbeda-beda juga memungkinkan terjadinya perbedaan diameter yang dihasilkan.

RQD yang merupakan satu-satunya indeks klasifikasi masa batuan (Zhang, 2016) juga harus dipertimbangkan dalam analisa untuk mendapatkan gambaran detil tentang pembesaran diameter bor. Hanya saja, terlihat pada Gambar 3-5 tidak ada tren yang sama ditiap *pylon* yang memiliki data tanah yang sama termasuk RQD.

3.1 Perhitungan daya dukung tiang

Dalam menghitung dukung tanah dilakukan langkah-langkah sebagai berikut:

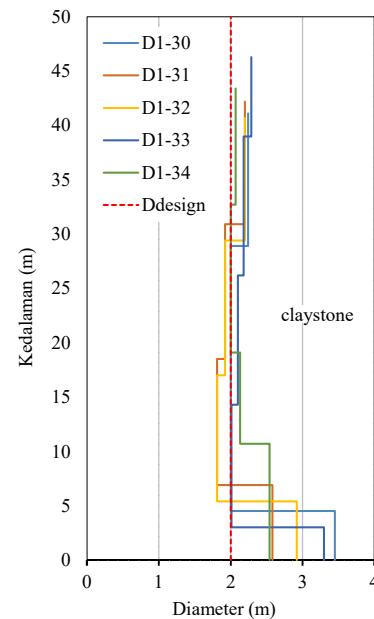
- 1 Menentukan diameter rata-rata bored pile;
- 2 Simplifikasi lapisan tanah;
- 3 Menentukan unit friksi, memilih unit friksi terkecil dari 2 metode yang dipakai;
- 4 Menentukan unit end bearing dan memilih unit end bearing terkecil dari 3 metode yang dipakai;
- 5 Menghitung daya dukung tiang bor.

Metode-metode yang digunakan untuk menentukan unit friksi (f_s) adalah metode yang disarankan oleh O'Neill & Reese (1999) seperti terlihat pada Persamaan 2.

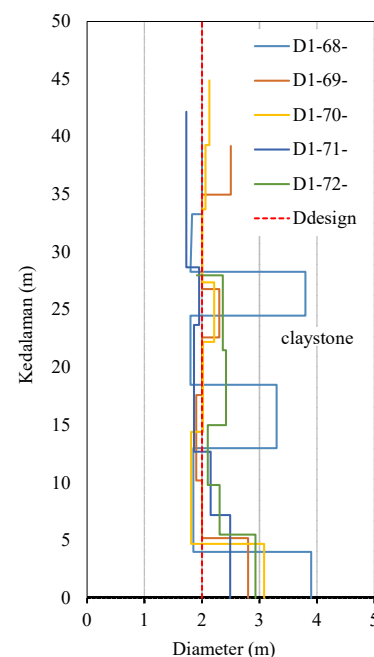
$$\frac{f_s}{p_a} = 0.65 \alpha_E \sqrt{(q_u/p_a)} \quad (2)$$

dimana q_u adalah *uniaxial compressive strength*; p_a adalah tekanan atmosfer = 101.3 kPa; α_E =faktor reduksi berdasarkan nilai RQD (O'Neill & Reese, 1999).

Metode lain yang biasa dipakai adalah metode yang disarankan oleh Williams & Pells (1981) (Persamaan 3).



Gambar 3. Tipikal Hubungan Kedalaman dan Perubahan Diameter Pylon P1Hilir



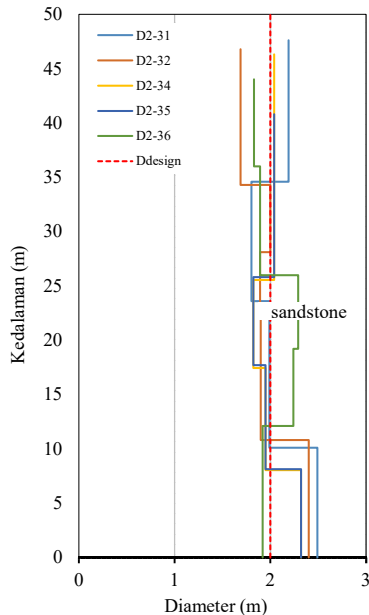
Gambar 4. Tipikal Hubungan Kedalaman dan Perubahan Diameter Pylon P1Hulu

$$f_s = \alpha \beta q_u \quad (3)$$

dimana α adalah faktor reduksi untuk *rock socket skin friction*, dan β adalah faktor reduksi untuk discontinuitas. Metode lainnya adalah yang disarankan Kulhawy & Phoon (1993) (Persamaan 4).

$$\frac{f_s}{p_a} = C \sqrt{\frac{q_u}{2p_a}} \quad (4)$$

dimana nilai C bervariasi dari 0.5 (*lower bound*) sampai 3 (*upper bound*), dimana pada artikel ini digunakan C=1 (*reasonable lower bound*).



Gambar 5. Tipikal Hubungan Kedalaman dan Perubahan Diameter Pylon P2Hilir

Metode-metode yang biasa digunakan untuk menghitung daya dukung ujung tiang bor (q_e) adalah metode yang disarankan oleh Rowe & Armitage (1987) (Persamaan 5) dan Zhang & Einstien (1998) (Persamaan 6-8). Pada artikel ini, perhitungan menggunakan Persamaan 5, 6, dan 8 masing-masing untuk Metode 1, 2, dan 3.

$$q_e = 2.5 q_u \quad (5)$$

$$\text{Lower bound: } q_e = 3.0 \sqrt{q_u} \quad (6)$$

$$\text{Upper bound: } q_e = 6.6 \sqrt{q_u} \quad (7)$$

$$\text{Mean: } q_e = 4.8 \sqrt{q_u} \quad (8)$$

Analisa hasil uji OC test dapat dilakukan dengan mengkonversi beban Q dengan Persamaan 9-11.

$$Q = Q^- + K(Q^+ - W) \quad (9)$$

$$S = \Delta s_1 + \Delta s_2 \quad (10)$$

dimana Q^- = Konversi beban tiang, Q^+ = beban arah ke atas tiang, Q^- = beban arah ke

bawah tiang, ΔS = kompresi tiang, S^- = perpindahan tiang ke bawah, K = koefisien kompresi, $K = \frac{1}{\gamma}$

$$S = \Delta s_1 + \Delta s_2 \quad (11)$$

dimana Δs_1 = deformasi fleksibel pipa bagian atas oleh beban kebawah dihitung dengan Persamaan 12, Δs_2 = deformasi fleksibel tiang bagian atas oleh beban keatas dihitung dengan Persamaan 13.

$$\Delta s_1 = \frac{Q^- L}{E_p A_p} \quad (12)$$

$$\Delta s_2 = \frac{(Q^+ - W) L}{2 E_p A_p \gamma} \quad (13)$$

dimana Q^- = beban ke bawah, kN, Q^+ = beban ke atas, kN, L = panjang tiang bagian atas diatas dasar laut, m, E_p = modulus elastic tiang, kPa, A_p = luas penampang tiang, m^2 ; W = berat segmen tiang bagian atas, kN.

4 HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Daya Dukung Tiang

Pada perhitungan daya dukung ini, ada beberapa istilah yang digunakan yaitu daya dukung diameter desain (Q_{uDD}), daya dukung diameter aktual (Q_{uDA}), dan daya dukung hasil OC test (Q_{uOC}). Dimana, Q_{uDD} adalah daya dukung *ultimate* yang dihitung dengan menggunakan diameter desain awal yaitu 2 meter, Q_{uDA} adalah daya dukung *ultimate* yang dihitung menggunakan diameter rata-rata hasil perhitungan dari volume beton yang masuk saat pengecoran, dan Q_{uOC} adalah daya dukung *ultimate* yang didapat dari hasil uji OC test.

4.1.1 Daya Dukung Selimut Tiang Bor

Daya dukung yang diakibatkan oleh tahanan selimut menggunakan Persamaan 2 dirangkum pada Tabel 1 dan 2. Sedangkan, hasil perhitungan unit friksi dengan Persamaan 3 dirangkum pada Tabel 3. Terlihat bahwa, Metode yang disarankan oleh Willams & Pells (1981) (Persamaan 3) menghasilkan unit friksi yang lebih besar. Sehingga, pada perhitungan

selanjutnya, metode yang digunakan adalah metode yang disarankan oleh O'Neil & Reese (1999).

Tabel 1. Tegangan Gesek dengan Metode O'Niell & Reese (1999) (P1-34, P1-64)

No. Lapisan	Jenis Tanah	q_u (MPa)	RQD (%)	E_M/E_R	σ_E	f_s (kPa)
1	Clay					
2	Claystone	3.5	83	0,8	0,9	348
3	Sandstone	3.5	84	0,8	0,9	348
4	Claystone	2.4	65	0,25	0,65	200
5	Claystone	1	56	0,20	0,55	110

Tabel 2. Tegangan Gesek dengan Metode O'Niell & Reese (1999) (P2-35)

No. Lapisan	Jenis Tanah	q_u (MPa)	RQD (%)	E_M/E_R	σ_E	f_s (kPa)
1	Claystone	0,2	40	0,15	0,55	50
2	Sandstone	6,0	6	0,7	0,65	390

Tabel 3. Tegangan Gesek dengan Metode Williams & Pells (1981)

Jenis Tanah	q_u (MPa)	RQD (%)	α	β	f_s (kPa)
Clay					
Claystone	3.5	83	0,15	0,8	420
Sandstone	3.5	84	0,15	0,8	420
Claystone	2.4	65	0,2	0,65	312
Claystone	1	56	0,3	0,65	195

Selanjutnya dilakukan perhitungan daya dukung selimut tiang dengan menggunakan diameter desain ($D=2$ m). Hasilnya dirangkum pada Tabel 4 untuk tiang bor P1-34 dan P1-64, dan Tabel 5 untuk tiang P2-35. Dari Tabel 4, daya dukung selimut total yang didapat untuk P1-34 dan P1-64 adalah 51.417,14 kN atau 5.141,714 ton. Sedangkan untuk tiang P2-35 (Tabel 5), didapatkan daya dukung selimut yang lebih besar yaitu 90.180,80 kN. atau 9.017,080 ton.

Untuk menghitung daya dukung tiang aktual, unit friksi pada lapisan *sandstone* dan *claystone* untuk P1-34 dan P1-64 dihitung dan

dirangkum pada Tabel 6 dan Tabel 7. Perhitungan P1-34 dan P1-64 dipisahkan pada tabel yang berbeda karena ada perbedaan diameter aktual yang direkam berdasarkan hasil perhitungan menggunakan Persamaan 1. Sedangkan untuk pile P2-35, perhitungan dirangkum pada Tabel 8.

Dari Tabel 6 dan 7, didapatkan daya dukung selimut dengan diameter aktual untuk P1-34 dan P1-64 masing-masing adalah 53.472,72 kN dan 56.990,22 kN. Sedangkan daya dukung selimut P2-35 adalah 90.188,65 kN. Besarnya daya dukung selimut P2-35 karena besarnya nilai q_u yang menghasilkan f_s yang jauh lebih besar (Tabel 2).

Tabel 4. Daya Dukung Selimut P1-64 dan P1-34 Diameter Desain

Jenis Tanah	Tebal (m)	Diameter Desain (m)	q_u (MPa)	f_s (KPa)	Q_s (kN)
Clay	5				diabaikan
Claystone	12	2	3.50	348	26,249.14
Sandstone	3	2	3.50	348	6,562.29
Claystone	6	2	2.40	200	7,542.86
Claystone	16	2	1.00	110	11,062.86
Total					51,417.14

Tabel 5. Daya Dukung Selimut P2-35 Diameter Desain

Jenis Tanah	Tebal (m)	Diameter Desain (m)	q_u (MPa)	f_s (KPa)	Q_s (kN)
Claystone	2.5	2	0.2	50	785.00
Sandstone	36.5	2	6	390	89,395.80
Total					90,180.80

4.1.2 Daya Dukung Ujung Tiang Bor

Ada tiga persamaan dari dua metode yang digunakan pada analisis tegangan ujung tiang ini. Selain itu, daya dukung ujung (q_e) dilakukan dua kondisi karena tiang bor P1-34 dan P1-64 ujungnya terletak pada lapisan yang sama yaitu *claystone* dengan q_u 1 MPa. Sedangkan P2-35, ujung tiang terletak pada lapisan *sandstone* dengan q_u 6 MPa. Hasil perhitungan menggunakan Persamaan 5, 6, dan 8 masing-masing untuk Metode 1, 2, dan 3 terlihat pada Tabel 8.

Tabel 6. Daya Dukung Selimut P1-34
 Diameter Aktual

Jenis Tanah	Tebal (m)	Diameter Aktual (m)	q_u (MPa)	f_s (kPa)	Q_s (kN)
Clay	5.00				diabaikan
Claystone	5.04	2.07	3.50	348	11,415.03
	6.96	2.00		348	15,220.13
Sandstone	3.00	2.00	3.50	348	6,562.29
Claystone	3.64	2.00	2.40	200	4,579.77
	2.36	2.13		110	1,735.63
Claystone	6.05	2.13	1.00	110	4,451.37
	10.70	2.57		110	9,508.57
Total					53,472.78

Tabel 7. Daya Dukung Selimut P1-64
 Diameter Aktual

Jenis Tanah	Tebal (m)	Diameter aktual (m)	q_u (MPa)	f_s (kPa)	Q_s (kN)
Clay					diabaikan
Claystone	6.761	2.26	3.5	348	16,696.61
	4.939	2.26		348	12,197.09
Sandstone	1.063	2.17	3.5	348	2,520.59
	1.939	2.17		348	4,597.76
Claystone	4.652	2.17	2.4	200	6,339.56
	1.439	2.2		200	1,988.12
Claystone	16.648	2.2	1	110	12,650.48
Total					56,990.22

Tabel 7. Daya Dukung Selimut P2-35
 Diameter Aktual

Jenis Tanah	Tebal (m)	Diameter Desain (m)	q_u (MPa)	f_s (kPa)	Q_s (kN)
Claystone	2.5	2.02	0.2	50	792.85
Sandstone	36.5	2	6	390	89,395.80
Total					90,188.65

Data hasil perhitungan tersebut dikalikan dengan luas penampang ujung tiang untuk mendapatkan daya dukung dalam satuan kN atau ton seperti terlihat pada Tabel 9 dan Tabel 10 masing-masing untuk Q_{eDD} dan Q_{eDA} dengan mengambil q_e yang terkecil dari Tabel 8. Terlihat pada kedua tabel, peningkatan diameter menghasilkan daya dukung yang lebih tinggi karena peningkatan luas ujung tiang. Hasilnya $Q_{eDA} > Q_{eDD}$.

Tabel 8. Nilai q_e Sandstone dan Claystone

Tiang bor Jenis Tanah	q_u (MPa)	q_e (kPa)			Nilai yang diambil
		Metode 1	Metode 2	Metode 3	
P1-34					
P1-64	1	2500	3000	4800	2500
Claystone					
P2-35					
Sandstone	6	15000	7348	11758	7348

Tabel 9. Daya Dukung Ujung Diameter Desain

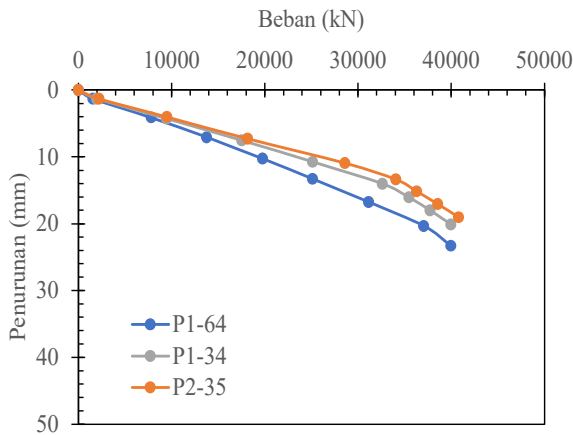
Jenis Tanah	Diameter Ujung (m)	Luas Dasar (m^2)	q_e (kPa)	Q_e (ton)
Claystone	2	3,14	2500	785
Sandstone	2	3,14	7348	2307

Tabel 10. Daya Dukung Ujung Diameter Aktual

Jenis Tanah	Diameter Ujung (m)	Luas Dasar (m^2)	q_e (kPa)	Q_e (ton)
Claystone	2.2	3.80	2500	950
Sandstone	2.2	3.80	7348	2792

4.1.3 Analisa Osterberg Cell Test (OC Test)

Gambar 6 memperlihatkan hasil analisis data OC test menggunakan Persamaan 9-11. Terlihat pada gambar, kurva tiang P2-35 terletak di atas kurva yang lain memperlihatkan bahwa daya dukung tiang tersebut lebih tinggi dari pada yang lain. Hanya saja, hasil ini tidak mendapatkan daya dukung batas sesungguhnya dari tiang. Hal ini disebabkan beban yang diberikan adalah maksimum dua kali beban rencana. Tiang belum mengalami keruntuhan pada beban yang diaplikasikan pada Tiang. Hanya saja, untuk kepentingan proyek, hal ini sudah sesuai. Oleh karena ini, hasil OC test yang diambil adalah seperti terlihat pada Tabel 11. Dalam perhitungan, berat pondasi tiang tidak diperhitungkan untuk menyesuaikan dengan hasil perhitungan dari Tabel 4-10.



Gambar 6. Hubungan Beban dan Penurunan Hasil Analisa OC test.

Tabel 11. Ringkasan hasil OC test pada tiang yang diinvestigasi

Tiang	Jenis Tanah	Q_u (kN)	Q_u (ton)
P1-34	Claystone	39.961	3.996,1
P1-64	Claystone	39.963	3.996,3
P2-35	Sandstone	40.800	4.080,0

4.1.4 Perbandingan Daya Dukung dan Hasil OC Test

Hasil seluruh perhitungan dirangkum dalam Tabel 12. Pada Tabel 12, hasil perhitungan Q_{uDD} dan Q_{uDA} untuk masing-masing pile. Hasilnya memperlihatkan peningkatan daya dukung tiang yang diakibatkan oleh penambahan diameter tiang. Hanya saja, hasil ini masih lebih besar dari daya dukung lapangan yang dianalisis dari hasil OC test. Hal ini dikarenakan hasil OC test yang diperlihatkan pada Tabel 12 bukan merupakan daya dukung aktual tiang. Tiang tersebut dibeban dengan beban maksimum dua kali beban rencana. Belum terjadi keruntuhan pada Tiang. Berdasarkan kriteria FHWA, keruntuhan tiang terjadi pada $0,05 D$ atau dalam hal ini 100 mm.

Selisih antara Q_{uDA} dan Q_{uDD} , Q_{uOC} aktual dan Q_{uOC} rencana terlihat pada Tabel 13. Pada Tabel 13, kenaikan persentase akibat kenaikan diameter yaitu 6 dan 12% masing-masing untuk P1-34 dan P1-64, dan 4% untuk P2-35 tidak sebanding dengan kenaikan hasil OC test yaitu antara 11-13%. Sehingga

kenaikan hasil OC test terhadap $2x Q_{izin}$ atau 3600 ton belum dapat disimpulkan dari hasil kenaikan diameter. Besarnya dampak daya dukung akibat pembesaran diameter tidak sesuai dengan kenaikan daya dukung yang terukur oleh hasil OC test.

Tabel 12. Rangkuman Analisis Daya Dukung Desain, Aktual, dan OC test.

Tiang Bor	Q_{uDD} (ton)	Q_{uDA} (ton)	Q_{uOC} (ton)
P1-34	5926.71	6297.128	3996.1
P1-64	5926.71	6648.872	3996.3
P2-35	11325.4	11810.665	4080

Tabel 13. Selisih Q_{uDA} , Q_{uDD} , dan Q_{uOC}

Tiang Bor	$Q_{uDA}-Q_{uDD}$ (ton)	(%)	$Q_{uOC}-2xQ_{izin}$ (ton)	(%)
P1-34	370.414	6%	396.1	11%
P1-64	722.158	12%	396.3	11%
P2-35	485.315	4%	480	13%

Jika daya dukung yang diinginkan sesuai dengan Q_{izin} proyek yaitu 1800 ton, maka faktor keamanan untuk masing-masing perhitungan dirangkum pada Tabel 14.

Tabel 14. Faktor Keamanan Tiang terhadap Daya Dukung Rencana 1800 ton

Tiang Bor	Q_{uDD}	Q_{uDA}	Q_{uOC}
P1-34	3,3	3,5	2,2
P1-64	3,3	3,7	2,2
P2-35	6,3	6,6	2,3

Terlihat pada Tabel 14, daya dukung pile sudah sesuai atau dapat dikatakan aman karena faktor keamanan yang didapat adalah lebih dari 2 (hasil OC test). Dari Tabel juga terlihat bahwa faktor keamanan yang sesuai untuk perhitungan pada tanah yang dominan *clay stone* (P1-34 dan P1-64) adalah 3,3-3,7. Sedangkan faktor keamanan yang digunakan untuk tanah yang dominan *sandstone* adalah 6,3-6,6.

5 KESIMPULAN DAN SARAN

Pengaruh perubahan daya dukung akibat perubahan diameter tiang bor telah dijabarkan dan dianalisa. Beberapa hal yang dapat disimpulkan antara lain:

1. Perubahan diameter aktual lubang bor tidak berhubungan langsung dengan jenis tanah yang ada.
2. Perubahan diameter ujung tiang terjadi hampir semua tiang yang disebabkan oleh proses pembersihan ujung tiang dengan tekanan air (*flushing*).
3. Secara analitis, Q_{uDA} menghasilkan daya dukung lebih besar dibandingkan Q_{uDD} .
4. Q_{uDD} dan Q_{uDA} masih lebih besar dibandingkan dengan Q_{uOC} .
5. Besar kenaikan daya dukung hasil OC test terhadap $2 \times Q_{izin}$ tidak sebanding dengan kenaikan akibat pembesaran diameter tiang. Sehingga kenaikan besarnya hasil OC test dapat disebabkan oleh pembesaran diameter atau bersama-sama dengan faktor lain;
6. Berdasarkan data yang ada, faktor keamanan yang digunakan untuk data pada lapisan *claystone* adalah 3,3-3,7, sedangkan untuk lapisan *sandstone* jauh lebih besar yaitu antara 6,3-6,6.
7. Analisa hasil OC test yang dilakukan berdasarkan kebutuhan atau persyaratan proyek menyebabkan beban yang diberikan tidak mencapai keruntuhan tiang sehingga daya dukung sesungguhnya tidak diketahui. Perlu analisa lebih lanjut, agar data OC test dapat digunakan untuk memprediksi daya dukung sesungguhnya dari tiang bor.

DAFTAR RUJUKAN

- Chan, H. F. C., 1987. Non-Destructive Of Concrete Piles Using The Sonic Echo and Transient Shock Methods, University of Edinburgh, Scotland
- Hollema D. A., Olson. L.D., 2003, " Non-Destructive Testing in Civil Engineering Crosshole Sonic Logging and Velocity Tomography Imaging of Drilled Shaft Foundations", Olson Engineering, Inc., Wheat Ridge, Colorado, USA
- Irsyam, M., Sahadewa, A., Boesono, A., dan Subagyo, 2007, " Pengaruh *Strength Reduction* Tanah Clay-Shale Akibat Pelaksanaan Pemboran Terhadap Nilai Daya Dukung Pondasi Tiang di Jembatan Suramadu", Surabaya
- Kulhawy, F.H. & K.K. Phoon. 1993. Drilled shaft side resistance in clay soil to rock. In Design and Performance of Deep Foundations: Piles and Piers in Soil and Soft Rock (GSP 38), ed. P.P. Nelson, T.D. Smith & E.C. Clukey, 172-183. New York: ASCE.
- O'Neil, M. W. ,2001. Side Resistance in Piles and Drilled Shafts, J. Geotech. Geoenviron. Eng. 127: 3-16
- O'Neil, M.W., & Reese, L.C. (1999). Drilledshafts: Construction Procedures and Design Methods. Report prepared for U.S. Department of Transportation and Federal Highway Administration, Report No. FHWA-IF-99-025.
- Rezazadeh, S., & Eslami, A. (2017). Empirical methods for determining shaft bearing capacity of semi-deep foundations socketed in rocks. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 9(6), 1140-1151. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2017.06.003>
- Rowe, R. K., and Armitage, H. H., 1987. A design method for drilled piers in soft rock, Can. Geotech. J, 24, 126-142.
- Wakil, A. Z., dan Kassim, M., 2010. "Bulging as a pile imperfection", Department of Structural Engineering, Faculty of Engineering, Alexandria University, Alexandria, Egypt.
- Williams, A. F., & Pells, P. J. N. (1981). Side Resistance Rock Sockets in Sandstone, Mudstone, and Shale. Canadian Geotechnical Journal, 18(4), 502-513. <https://doi.org/10.1139/t81-061>
- Zhang L. Determination and applications of rock quality designation (RQD). Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering 2016;8(3):389-97

Zhang L. Estimating the strength of jointed rock masses. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 2010;43(4):391-402.

Zhang, L., & Einstein, H. H. (1998). *End Bearing Capacity of Drilled Shafts in*

Rock. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 124(7), 574–584. doi:10.1061/(asce)1090-0241(1998)124