

P-20

**PERENCANAAN KAPASITAS DUKUNG DAN PENURUNAN
PADA TIANG BOR (STUDI KASUS JEMBATAN RITAN KECAMATAN
TABANG KABUPATEN KUTAI KARTANEGARA)**

**REDESIGN OF BEARING CAPACITY AND SETTLEMENT OF BORED
PILE (CASE STUDY RITAN BRIDGE SUB-DISTRICT TABANG KUTAI
KARTANEGARA PROVINCE)**

Bella Esfadiary Yus^{1*}, Kukuh Prihatin², Insan Kamil³

^{1,2,3}Politeknik Negeri Samarinda, Jl. Dr. Cipto Mangunkusumo, Samarinda

*E-mail: besfadiaryus@gmail.com

Diterima 18-10-2021	Diperbaiki 25-10-2021	Disetujui 26-10-2021
---------------------	-----------------------	----------------------

ABSTRAK

Jembatan lama di Desa Tukung Ritan akan dibangun kembali menggunakan pipa pancang baja sedalam 12 m sebagai fondasi struktur bawah. Untuk merencanakan konstruksinya, diperlukan data parameter tanah yang dapat diperoleh berdasar beberapa metode, seperti pengujian sondir (CPT), pengujian penetrasi standar (SPT), dan uji laboratorium. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk merencanakan ulang fondasi dari abutment jembatan tersebut menggunakan tiang bor 40 cm sedalam 8 m sebanyak 10 tiang, dengan membandingkan hasil kapasitas dukung dan penurunan tanah berdasarkan perhitungan manual (hasil uji CPT dengan metode Bagemann dan Meyerhof, hasil uji SPT dengan metode Briaud et al dan Meyerhof, sementara hasil pengujian laboratorium dengan metode Tomlinson dan NAFVAC DM 7.2) dengan program Geo5 (menggunakan hasil pengujian laboratorium metode Tomlinson dan NAFVAC DM 7.2). Hasil menunjukkan bahwa kapasitas dukung kelompok tiang bor dengan perhitungan manual memberikan SF sebesar 4,39 sedangkan Geo5 sebesar 4,05. Besar penurunan kelompok tiang bor yakni sebesar 13,6 cm melebihi batas toleransi. Untuk menghindari besar penurunan diluar batas toleransi, panjang tiang bor ditambah 2 m menjadi 10 m. Dimana Geo5 menghasilkan besar penurunan lebih besar dibanding perhitungan manual yakni 98,1 mm dengan 89,3 mm. Meski begitu, kedua metode tidak memberi selisih perhitungan yang jauh berbeda.

Kata kunci: *Tiang bor tunggal, Kelompok tiang bor, Kapasitas dukung, Penurunan, Geo5.*

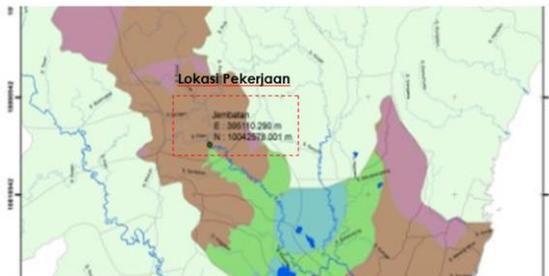
ABSTRACT

An old bridge in Tukung Ritan Village will be rebuilt using 12 m steel pile as the foundation of substructure. To plan the structure of the bridge itself, soil parameters will be needed which can be obtained by many methods, such as Standard Penetration Test (SPT), Cone Penetration Test (CPT) and laboratory test. The purpose of this research is to redesign the abutment foundation of the bridge using 40 cm bored pile with 8 m depth and the total is 10 piles, by comparing the bearing capacity and the settlement between manual calculations (CPT result using method of Bagemann and Meyerhof, SPT result using method of Briaud et al and Meyerhof, while laboratorium result using method of Tomlinson and NAFVAC DM 7.2) with the result of Geo5 program (using laboratorium result method of Tomlinson and NAFVAC DM 7.2). The result shows that the bearing capacity using classical calculation gives the number of Safety Factor (SF) 4,39 while Geo5 is 4,05. The value of settlement is 13,6 cm which exceed the maximum limit. In order to avoid the value of settlement exceed the maximum limit, the depth of the bored piles added by 2 m from 8 m to 10 m. Where Geo5 gives a bigger settlement result with 9,81 cm than classical calculation with 8,93 cm. However, both methods do not give the result of the significant differences.

Keywords: *Single bored pile, Group bored pile, Bearing capacity, Settlement, Geo5.*

PENDAHULUAN

Akibat kondisi jembatan lama di Desa Tukung Ritan (Gambar 1) secara teknis sudah tidak dapat dilewati karena ambruk, maka dilakukan perbaikan berupa pembangunan kembali. Struktur bawah jembatan tersebut didesain menggunakan fondasi tiang pancang baja (*steel pile*) diameter 40 cm yang akan ditanam sedalam 12 m.



Gambar 1. Peta lokasi proyek
Sumber: CV. Jeva Utama Konsulindo [1]

Keberadaan jembatan yang lokasinya terletak dekat dengan pemukiman warga dan lokasi yang cukup jauh dari suplai pabrik tiang pancang baja, dijadikan sebagai bahan pertimbangan untuk merencanakan ulang fondasi jembatan tersebut menjadi tiang bor. Selain lebih ramah lingkungan karena tidak terlalu bising, terdapat batching plant berlokasi di daerah Tabang sehingga akan lebih ekonomis dibanding harus mengangkut tiang baja dari pabrik produksi tiang baja di Samarinda ke Tabang melalui jalur darat.

Perencanaan kembali fondasi jembatan juga perlu memperhatikan hal-hal seperti kapasitas dukung maupun besar penurunan (*settlement*) tiang bor yang akan terjadi. Untuk menghitung kedua hal tersebut, perhitungan secara manual berdasar data lapangan maupun laboratorium menjadi salah satu metode yang cukup diandalkan untuk mengetahui kemampuan tiang bor dalam menyalurkan beban dari atas ke tanah. Disamping itu, dengan adanya program (*software*) geoteknik akan memudahkan dalam melakukan analisis fondasi tiang bor untuk menghasilkan output yang diperlukan.

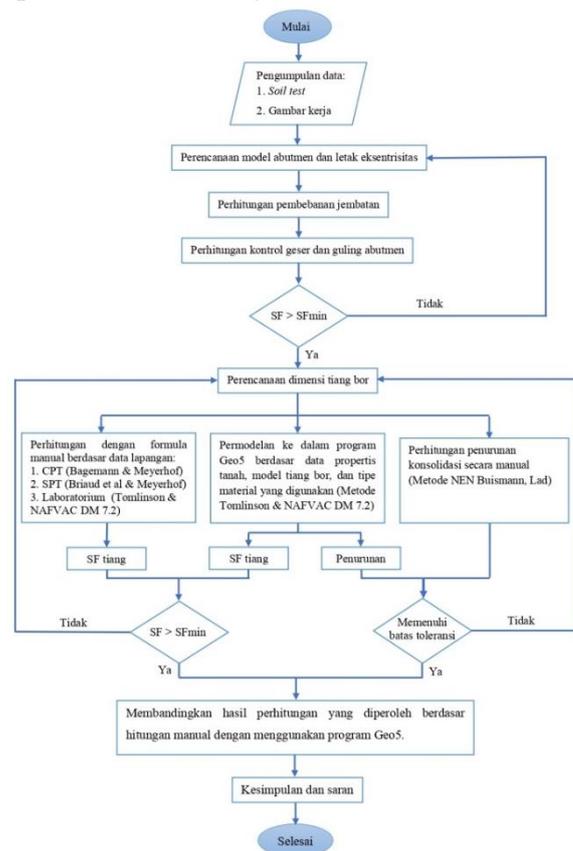
Berdasarkan hal tersebut di atas, penelitian ini bertujuan untuk mengetahui kapasitas dukung dan besar penurunan tiang bor tunggal dan kelompok, dengan perhitungan manual menurut para ahli, yang kemudian akan dibandingkan dengan output dari program Geo5.

Pada penelitian oleh Ayayda [2], dibuat desain dimensi tiang bor menggunakan perhitungan manual yang selanjutnya

dibandingkan dengan program Geo5. Hasil menunjukkan bahwa nilai Safety Factor (SF) yang diberikan oleh program Geo5 lebih kecil dibandingkan perhitungan manual.

METODOLOGI

Pelaksanaan penelitian ini diawali dengan pengumpulan data yang diperlukan, yakni berupa data hasil pengujian lapangan, laboratorium, dan gambar kerja yang diperoleh dari PT. Bumi Indonesia. Adapun urutan pelaksanaan tertuang dalam Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Diagram alir penelitian

Akan tetapi, perlu digaris bawahi bahwa dalam permodelan ke dalam program Geo5 diperlukan permodelan berbeda untuk asumsi tanah kohesif dan nonkohesif. Sebab program Geo5 tidak mampu menganalisis tanah heterogen sekaligus.

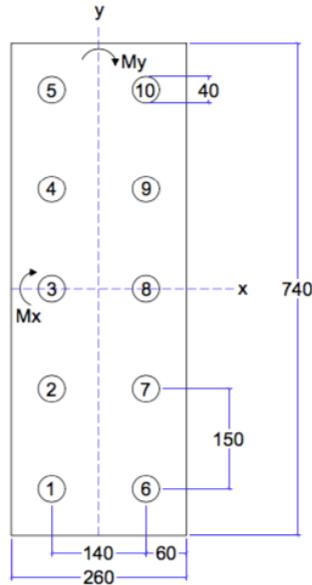
HASIL DAN PEMBAHASAN

Perhitungan pembebanan jembatan dilakukan dengan pedoman berupa RSNI T-02-2005 [3] tentang Pembebanan Jembatan. Adapun variasi beban kerja adalah 10 jenis. Untuk rekapitulasi beban yang diterima oleh *pile cap* dapat dilihat dalam Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Rekapitulasi kombinasi beban ultimit

No.	Kombinasi Beban	P (kN)	T _x (kN)	T _y (kN)	M _x (kNm)
1	KOMB-1	4082,7	602,7	0,0	721,4
2	KOMB-2	4082,7	636,5	0,0	761,9
3	KOMB-3	4126,9	602,7	138,7	721,4
4	KOMB-4	4126,9	636,5	166,4	761,9

Selanjutnya diperhitungkan besar beban vertikal yang didistribusikan pada tiap-tiap tiang bor. Besar beban akan berbeda-beda tergantung jarak tiang bor terhadap titik as/pusat. Maka diambil nilai beban terbesar yakni pada kombinasi keempat. Perhitungan terhadap Gambar 3 dapat dilihat sebagai berikut.



Gambar 3. Detail susunan tiang bor pada pile cap

Jumlah tiang,	n	= 10
Tiang arah x,	n _x	= 2
Tiang arah y,	n _y	= 5
Sigma x,	∑x	= 4,9
Sigma y,	∑y	= 45
Beban vertikal, P		= 4126,944 kN
Momen arah x, M _x		= 761,864 kNm
Momen arah y, M _y		= 465,734 kNm

Contoh perhitungan beban yang diterima tiang bor tunggal akibat beban vertikal dan momen dapat dilihat pada perhitungan berikut.

$$P_1 = \frac{P}{n} \pm \frac{M_y \cdot x_i}{\sum x^2} \pm \frac{M_x \cdot y_i}{\sum y^2}$$

Distribusi beban maksimum pada tiang e-1 adalah:

$$P_{\text{maks}} = 552,581 \text{ kN}$$

Distribusi beban minimum pada tiang ke-1 adalah:

$$P_{\text{maks}} = 272,808 \text{ kN}$$

Perhitungan untuk distribusi beban lateral pada masing-masing tiang bor dapat dilakukan dengan mencari resultan gaya lateral, kemudian dibagi dengan banyaknya tiang bor. Adapun contoh uraian perhitungan diberikan

terhadap kombinasi beban ke-4 dengan nilai beban lateral terbesar, sebagai berikut ini:

Beban lateral arah x, T_x = 636,494 kN

Beban lateral arah y, T_y = 166,433 kN

Jumlah tiang, n = 10

$$\text{Resultan gaya lateral, } T_{\text{max}} = \sqrt{(T_x^2 + T_y^2)} \\ = 657,894 \text{ kN}$$

Gaya lateral yang dipikul oleh 1 tiang bor,

$$H_{\text{max}} = \frac{T_{\text{max}}}{n} = 65,789 \text{ kN}$$

Apabila cara tersebut diaplikasikan pada kelima kombinasi beban yang ada, maka diperoleh rekapitulasi hasil perhitungan distribusi beban lateral yang tersaji dalam Tabel 3 berikut di bawah.

Tabel 2. Rekapitulasi hasil distribusi beban vertikal disetiap tiang bor

No.	Tiang ke-	x (m)	y (m)	P _{maks} (kN)	P _{min} (kN)
1	1	-0,7	-3,0	552,581	272,808
2	2	-0,7	-1,5	537,057	288,332
3	3	-0,7	0,0	521,532	303,857
4	4	-0,7	1,5	537,057	288,332
5	5	-0,7	3,0	552,581	272,808
6	6	0,7	-3,0	552,581	272,808
7	7	0,7	-1,5	537,057	288,332
8	8	0,7	0,0	521,532	303,857
9	9	0,7	1,5	537,057	288,332
10	10	0,7	3,0	552,581	272,808

Tabel 3. Rekapitulasi hasil distribusi beban lateral disetiap tiang bor

No.	Kombinasi Beban	T _x (kN)	T _y (kN)	T _{max} (kN)	H _{max} (kN)
1	KOMB-1	602,7	0,0	602,7	60,3
2	KOMB-2	636,5	0,0	636,5	63,6
3	KOMB-3	602,7	138,7	618,5	61,9
4	KOMB-4	636,5	166,43	657,9	65,8
5	KOMB-5	318,3	169,9	360,8	36,1

Perhitungan kapasitas dukung tiang bor tunggal akan dihitung terhadap 2 gaya yakni gaya vertikal dan lateral. Untuk perhitungan kapasitas dukung vertikal dihitung menggunakan cara manual, sedangkan untuk kapasitas dukung lateral dihitung menggunakan program Geo5. Adapun perhitungan gaya vertikal diterapkan menggunakan 3 cara manual dengan data pengujian berbeda-beda.

Luas ujung bawah tiang bor:

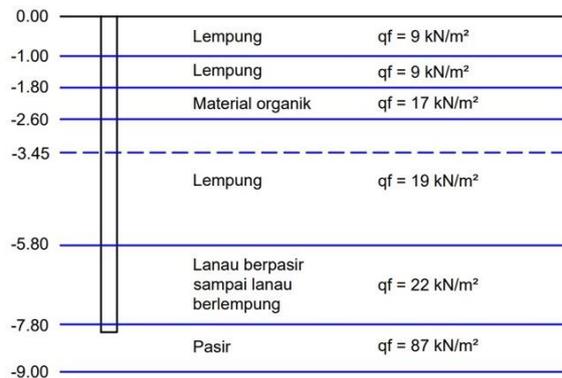
$$A_b = 0,126 \text{ m}^2$$

Keliling tiang bor:

$$K = 1,257 \text{ m}$$

1. Berdasar data hasil uji sondir (CPT)

Berikut ini adalah ilustrasi perencanaan tiang bor terhadap data hasil pengujian sondir (CPT) yang disajikan dalam Gambar 4.



Gambar 4. Skema fondasi berdasar data CPT

a) Tahanan ujung ultimit

Menetapkan nilai koefisien modifikasi:

Diameter tiang bor, $d = 0,4 \text{ m}$

Panjang tiang bor, $L = 8 \text{ m}$

$L/d = 8 \text{ m}/0,4 \text{ m} = 20$

Nilai $d < 50 \text{ cm}$ sehingga, $\omega_1 = 1$

Nilai $L/d > 10$ sehingga, $\omega_2 = 1$

Untuk tanah pasir maka digunakan metode Meyerhof (1976; 1983), dimana nilai q_c rata-rata diambil pada zona $1d$ di bawah ujung tiang dan $4d$ di atasnya.

$1d = 1 \cdot 40 \text{ cm}$

$= 40 \text{ cm} \rightarrow 0,4 \text{ m}$ di bawah ujung tiang bor

$4d = 4 \cdot 40 \text{ cm}$

$= 160 \text{ cm} \rightarrow 1,6 \text{ m}$ dari dasar tiang bor

Dengan demikian, diambil nilai q_c rata-rata mulai kedalaman $(8 \text{ m} - 1,6 \text{ m}) = 6,4 \text{ m}$ sampai dengan $(8 \text{ m} + 0,4 \text{ m}) = 8,4 \text{ m}$, maka:

$q_{ca} = 10728,556 \text{ kN/m}^2 < 15000,000 \text{ kN/m}^2$

$q_{ca} \dots \text{OK!}$

$$f_b = \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot q_{ca} = 1 \cdot 1 \cdot 10728,556 \text{ kN/m}^2 = 10728,556 \text{ kN/m}^2$$

Untuk tiang bor, nilai f_b perlu dikalikan dengan faktor reduksi sebesar 70%, maka:

$$f_b = 10728,556 \text{ kN/m}^2 \cdot 70\% = 7509,989 \text{ kN/m}^2$$

Besar tahanan ujung ultimit tiang bor:

$$Q_b = A_b \cdot f_b = 0,126 \text{ m}^2 \cdot 7509,989 \text{ kN/m}^2 = 943,733 \text{ kN}$$

b) Tahanan gesek ultimit

Untuk tanah kohesif/lempung pada lapisan tanah satu sampai dengan lima, perhitungan selimut tiang bor menggunakan

metode Bagemann (1965) dengan penjabaran perhitungan sebagai berikut.

$$Q_s = K \cdot L \cdot q_f$$

$$Q_{s1} = 11,310 \text{ kN}$$

$$Q_{s2} = 9,048 \text{ kN}$$

$$Q_{s3} = 17,090 \text{ kN}$$

$$Q_{s4} = 77,409 \text{ kN}$$

$$Q_{s5} = 54,287 \text{ kN}$$

Sementara itu, untuk tanah granuler/pasir pada lapisan tanah keenam, perhitungan selimut tiang bor menggunakan metode Meyerhof (1983) dengan penjabaran perhitungan sebagai berikut.

$$Q_s = K \cdot L \cdot K_f \cdot q_f$$

$$Q_{s6} = 15,306 \text{ kN}$$

Karena lapisan tanah keenam merupakan tanah pasir, maka untuk tiang bor perlu dikalikan dengan faktor reduksi sebesar 70%. Sehingga besarnya menjadi $(15,306 \text{ kN} \cdot 70\%) = 10,714 \text{ kN}$

Besar tahanan gesek ultimit tiang bor:

$$Q_s = \sum Q_s = 179,857 \text{ kN}$$

c) Kapasitas dukung ultimit

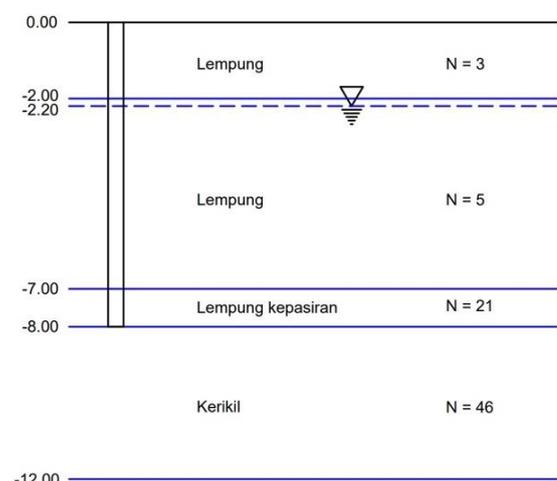
Besar kapasitas dukung ultimit tiang bor:

$$Q_u = Q_b + Q_s = 1123,590 \text{ kN}$$

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{SF} \text{ (dengan SF= 2)} = 561,795 \text{ kN}$$

2. Berdasar data hasil uji SPT

Berikut ini adalah ilustrasi perencanaan tiang bor terhadap data hasil pengujian SPT yang disajikan dalam Gambar 5.



Gambar 5. Skema fondasi berdasar data SPT

a) Tahanan ujung ultimit

Untuk tanah granuler/kerikil maka digunakan metode Meyerhof dengan besar tegangan referensi, $\sigma_r = 100 \text{ kN/m}^2$ yang mana penjabaran perhitungannya dapat dilihat di bawah ini.

$$f_b = 0,4 \cdot N_{60}' \cdot (L/d) \cdot \sigma_r \leq 4 \cdot N_{60}' \cdot \sigma_r$$

$$= 20800 \text{ kN/m}^2 > 10400 \text{ kN/m}^2$$

Diambil nilai 10400 kN/m^2 .

Besar tahanan ujung ultimit tiang bor:

$$Q_b = A_b \cdot f_b$$

$$= 1306,903 \text{ kN}$$

b) Tahanan gesek ultimit

Untuk tanah kohesif/lempung pada lapisan tanah satu sampai dengan empat, perhitungan selimut tiang bor menggunakan metode Briaud et al. (1985) dengan penjabaran perhitungan sebagai berikut.

$$f_s = 0,224 \cdot \sigma_r \cdot (N_{60}')^{0,29}$$

$$f_{s1} = 27,387 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{s2} = 33,485 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{s3} = 30,804 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{s4} = 47,129 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_s = K \cdot L \cdot f_s$$

$$Q_{s1} = 68,831 \text{ kN}$$

$$Q_{s2} = 8,416 \text{ kN}$$

$$Q_{s3} = 185,808 \text{ kN}$$

$$Q_{s4} = 59,225 \text{ kN}$$

Besar tahanan gesek ultimit tiang bor:

$$Q_s = \sum Q_s = 322,279 \text{ kN}$$

c) Kapasitas dukung ultimit

Besar kapasitas dukung ultimit tiang bor:

$$Q_u = Q_b + Q_s$$

$$= 1629,182 \text{ kN}$$

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{SF} \text{ (dengan SF= 2)}$$

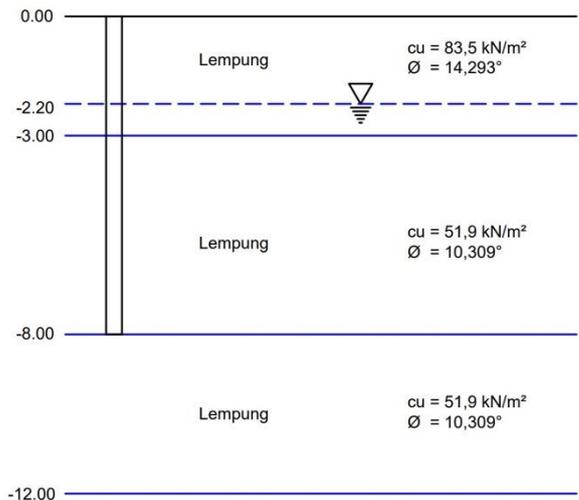
$$= 814,591 \text{ kN}$$

3. Berdasar data hasil uji

Karena adanya keterbatasan data hasil pengujian laboratorium yang hanya memiliki data parameter tanah pada kedalaman 3 m dan 7 m, maka untuk perhitungan kapasitas dukung tiang bor berdasar data hasil uji laboratorium dibuat kedalam dua asumsi berbeda. Yakni keseluruhan tanah disepanjang tiang bor dianggap lempung, serta pada kedalaman 7 m – 12 m diasumsikan sebagai tanah kerikil. Hal ini dimaksudkan untuk menyesuaikan dengan data hasil pengujian SPT yang menembus hingga kedalaman 12 m.

Berikut ini adalah ilustrasi perencanaan tiang bor terhadap data hasil pengujian laboratorium berdasar asumsi pertama, dengan

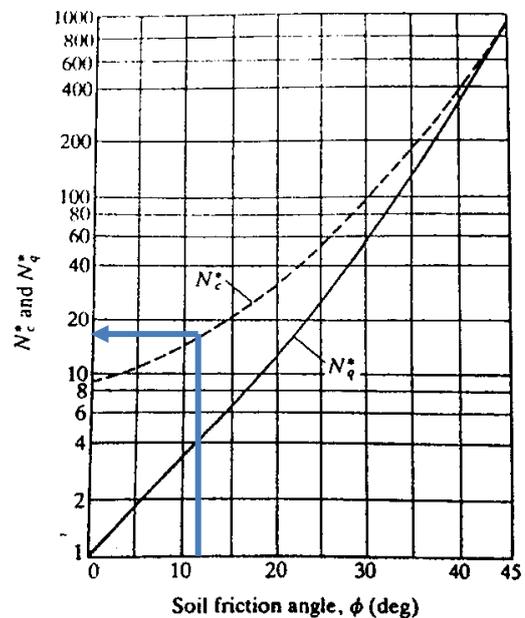
menganggap keseluruhan tanah disepanjang tiang bor sebagai tanah lempung (Gambar 6).



Gambar 6. Skema fondasi berdasar data laboratorium

a) Tahanan ujung ultimit

Untuk tanah lempung, digunakan metode alpha (Tomlinson) dimana perlu untuk menentukan nilai N_c^* terlebih dahulu. Dalam mencari nilai N_c^* diperlukan parameter tanah berupa sudut gesek tanah. Untuk tahanan ujung ultimit, maka digunakan nilai $\phi = 10,309^\circ$. Dengan demikian, besar N_c^* dapat diperoleh dengan menarik garis dari sudut gesek tanah ke kurva N_c^* seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Kurva untuk nilai N_c^*

Sumber: Universitas Katolik Parahyangan [4]

Maka diperoleh nilai N_c^* sebesar 17, selanjutnya untuk penjabaran perhitungan tahanan ujung ultimit sebagai berikut.

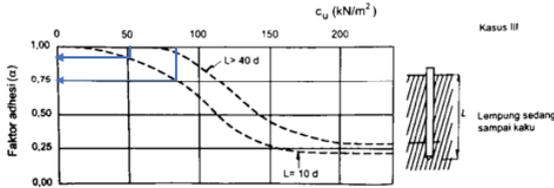
Besar tahanan ujung ultimit:

$$Q_b = A_b \cdot N_c^* \cdot c_u = 110,873 \text{ kN}$$

b) Tahanan gesek ultimit

Diasumsikan lapisan tanah sebagai lempung homogen, maka untuk mencari nilai adhesi (α) perlu menarik garis berdasar nilai kohesi *undrained* (c_u) terhadap kurva panjang tiang. Hal tersebut disajikan dalam Gambar 8 berikut ini.

$$L/d = 8 \text{ m}/0,4 \text{ m} = 20 \rightarrow L = 20d$$



Gambar 8. Penentuan nilai adhesi (α)
Sumber: Hardiyatmo [5]

Maka, diperoleh nilai adhesi (α) untuk lapisan lempung satu dan dua sebagai berikut.

$$c_{u1} = 83,5 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \alpha = 0,90$$

$$c_{u2} = 51,9 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \alpha = 0,75$$

Selanjutnya dilakukan perhitungan untuk mencari besar nilai tahanan gesek ultimit tiang bor pada tiap-tiap lapisan lempung.

$$f_s = \alpha \cdot c_u$$

$$f_{s1} = 75,150 \text{ kN/m}^2$$

$$f_{s2} = 38,925 \text{ kN/m}^2$$

$$Q_s = K \cdot L \cdot f_s$$

$$Q_{s1} = 283,309 \text{ kN}$$

$$Q_{s2} = 244,573 \text{ kN}$$

Besar tahanan gesek ultimit tiang bor:

$$Q_s = \sum Q_s = 527,882 \text{ kN}$$

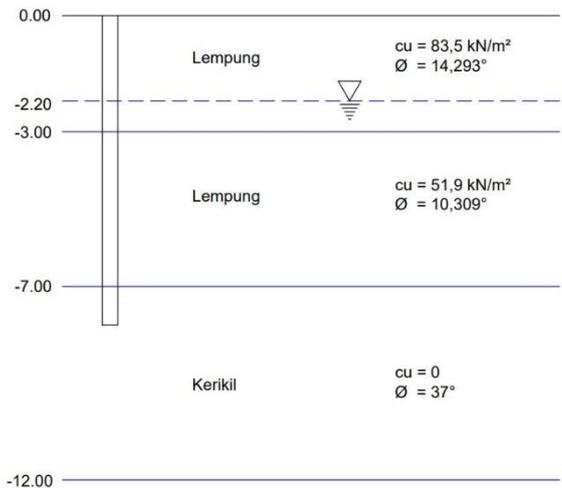
c) Kapasitas dukung ultimit

Besar kapasitas dukung ultimit tiang bor:

$$Q_u = Q_b + Q_s = 638,755 \text{ kN}$$

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{SF} \text{ (dengan SF=2)} = 319,377 \text{ kN}$$

Asumsi kedua adalah dengan menyesuaikan antara data hasil pengujian laboratorium dengan SPT. Oleh karena itu, kedalaman 7 m – 12 m tidak bisa dianggap sebagai lempung, melainkan tanah kerikil selayaknya ilustrasi yang tersaji pada Gambar 9.



Gambar 9. Skema fondasi berdasar data laboratorium

a) Tahanan ujung ultimit

Untuk menghitung tahanan ujung ultimit tanah kerikil yang merupakan tanah granuler, dapat digunakan metode NAFVAC DM 7.2. Namun sebelum itu, perlu untuk mencari nilai faktor kapasitas dukung tiang bor yang disajikan dalam Tabel 4 di bawah.

Diperoleh nilai N_q untuk tiang bor sebesar 38, selanjutnya penjabaran perhitungan tahanan ujung ultimit dapat dilihat berikut.

Besar tahanan ujung ultimit:

$$Q_b = A_b \cdot p_o' \cdot N_q = 353,427 \text{ kN}$$

b) Tahanan gesek ultimit

Tahanan gesek ultimit dihitung menggunakan metode NAFVAC DM 7.2 agar menyesuaikan, namun perlu untuk mencari nilai faktor adhesi (α) terlebih dahulu. Dalam mencari nilai α diperlukan parameter tanah berupa sudut gesek tanah sepanjang selimut tiang bor. Dengan demikian, besar α dapat diperoleh dengan menarik garis dari sudut gesek tanah ke kurva α selayaknya dalam Gambar 10 ini.

Diperoleh nilai faktor adhesi (α) untuk lapisan lempung satu dan dua sebagai berikut.

$$c_{u1} = 83,5 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \alpha = 0,53$$

$$c_{u2} = 51,9 \text{ kN/m}^2 \rightarrow \alpha = 0,74$$

Tabel 4. Hubungan antara ϕ' dengan N_q

ϕ' [°]	26	28	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
N_q untuk tiang bor	5	8	10	12	14	17	21	25	30	38	43	60	72

Sumber: Uzodimma [6]

$$f_s = \alpha \cdot c_u$$

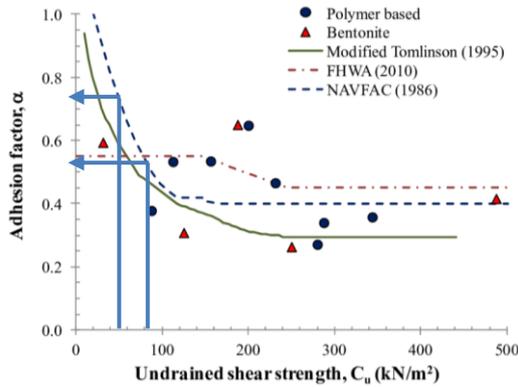
$$Q_s = K \cdot L \cdot f_s$$

$$Q_{s1} = 166,837 \text{ kN}$$

$$Q_{s2} = 241,312 \text{ kN}$$

Besar tahanan gesek ultimit tiang bor:

$$Q_s = \sum Q_s = 408,149 \text{ kN}$$



Gambar 10. Kurva untuk menentukan besar nilai faktor adhesi (α)

c) Kapasitas dukung ultimit

Besar kapasitas dukung ultimit tiang bor:

$$Q_u = Q_b + Q_s = 761,576 \text{ kN}$$

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{SF} \text{ (dengan SF=2)} = 380,788 \text{ kN}$$

Rekapitulasi data hasil perhitungan kapasitas dukung tiang bor tunggal berdasar data lapangan dan laboratorium adalah sebagai berikut (Tabel 5).

Tabel 5. Rekapitulasi kapasitas dukung tiang bor tunggal

No.	Metode	Q_u (kN)	Q_{all} (kN)
1	Hasil pengujian CPT	1123,6	561,8
2	Hasil pengujian SPT	1629,4	814,7
3	Hasil pengujian laboratorium 1	638,8	319,4
4	Hasil pengujian laboratorium 2	761,6	380,8

Nilai kapasitas dukung tiang bor tunggal berdasar hasil pengujian laboratorium adalah yang terkecil, maka nilainya digunakan sebagai patokan perbandingan dengan hasil program Geo5. Diperoleh hasil untuk asumsi keseluruhan kohesif adalah 633,4 kN sedangkan untuk asumsi kombinasi dengan nonkohesif adalah 774,2 kN, dengan besar perpindahan 14 cm.

Perhitungan untuk kelompok tiang bor dilakukan terhadap dua asumsi pula, dengan penjabaran perhitungan sebagai berikut.

1. Tiang kelompok sebagai tiang tunggal
Jumlah baris tiang bor, $m = 5$

Jumlah tiang bor dalam satu baris, $n' = 2$
Jarak antar tiang bor terkecil, $s = 1,4 \text{ m}$
Diameter tiang bor rencana, $d = 0,4 \text{ m}$

$$\theta = \text{arc tgn} \left(\frac{d}{s} \right) = 15,945^\circ$$

Besar efisiensi kelompok tiang bor:

$$E_g = 1 - \theta \frac{(n'-1)m+(m-1)n'}{90.m.n'} = 0,7697 \rightarrow 76,97\%$$

Besar kapasitas dukung ultimit kelompok tiang bor sebagai tiang tunggal:

$$Q_{ug} = Q_u \cdot n \cdot E_g = 5861,681 \text{ kN}$$

Faktor aman kelompok tiang bor:

$$SF = \frac{Q_{ug}}{Q_g} = 1,42 < 3 \dots \text{Tidak aman!}$$

2. Tiang kelompok

Ukuran kelompok tiang:

Kedalaman tiang bor, $D = 8 \text{ m}$
Lebar efektif blok tiang bor, $B_g = B_x = 2,6 \text{ m}$
Panjang efektif blok tiang bor, $L_g = B_y = 7,4 \text{ m}$

Nilai kohesi rata-rata, $c = \frac{c_1+c_2}{n} = 67,70 \text{ kN/m}^2$

Faktor pada tanah lempung, $N_c = 9$

Berat isi beton bertulang, $w_c = 25 \text{ kN/m}^3$

Besar kapasitas dukung ultimit kelompok tiang bor sebagai keruntuhan blok:

$$Q_{ug} = 2d (B_g + L_g) \cdot c + c_b \cdot N_c \cdot B_g \cdot L_g = 19819,004 \text{ kN}$$

Gaya-gaya yang harus didukung kelompok tiang:

Berat pelat penutup tiang (*pile cap*) = 348,800 kN

Beban total fondasi (Q_g) = 4511,744 kN

Faktor aman kelompok tiang bor:

$$SF = \frac{Q_{ug}}{Q_g} = 4,39 > 3 \dots \text{Aman!}$$

Permodelan ke dalam program Geo5 menghasilkan *output* sebanyak 3 buah untuk asumsi keseluruhan tanah kohesif, nonkohesif, dan kombinasi. Rekapitulasi hasil perhitungan oleh Geo5 dimuat sebagai berikut (Tabel 6).

Tabel 6. Rekapitulasi kapasitas dukung kelompok tiang bor dengan Geo5

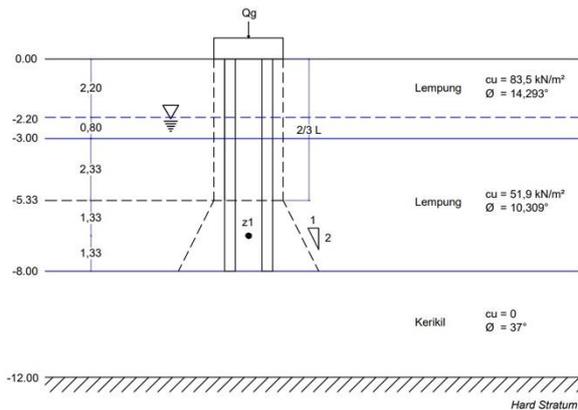
No.	Asumsi yang Digunakan	Q_u (kN)	SF
1	Keseluruhan tanah kohesif	18215,2	4,05
2	Keseluruhan tanah nonkohesif	6017,64	1,34
3	Kombinasi keduanya	25644,7	5,70

Sementara itu, rekapitulasi penurunan dari hasil *output* program Geo5 termuat dalam Tabel 7 di bawah ini.

Tabel 7. Rekapitulasi penurunan dengan Geo5

No.	Asumsi yang Digunakan	Penurunan (cm)
1	Keseluruhan tanah kohesif	14,47
2	Keseluruhan tanah nonkohesif	5,00
3	Kombinasi keduanya	13,27

Sedangkan untuk perhitungan penurunan untuk tiang bor kedalaman 8 m (Gambar 11) secara manual dapat dilihat dalam uraian berikut.



Gambar 11. Skema penurunan tiang bor 8 m

Panjang tiang, $L = 8$ m
 Maka besar $2/3L = 5,33$ m
 Lebar efektif blok tiang bor, $B_g = B_x = 2,6$ m
 Panjang efektif blok tiang bor, $L_g = B_y = 7,4$ m
 Beban total fondasi, $Q_g = 4511,744$ kN

Perhitungan penurunan pada titik 1, yakni z_1 :

$$H = 2,67 \text{ m} \rightarrow z = H/2 = 1,33 \text{ m}$$

$$\sigma' = 68,428 \text{ kN/m}^2$$

$$\Delta\sigma = \frac{Q_g}{(B_g+z)(L_g+z)} = 120,140 \text{ kN/m}^2$$

Kontrol:

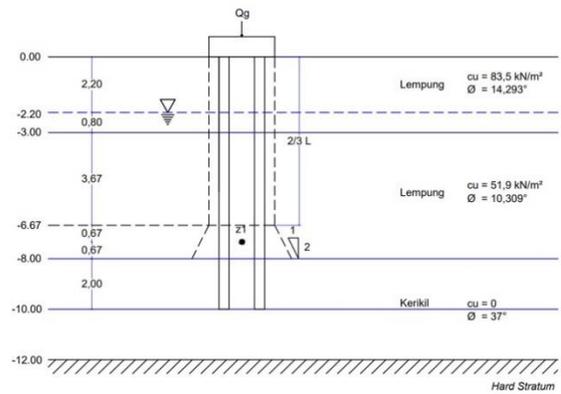
$$\frac{\sigma_{c'}}{\sigma'} = \frac{119 \text{ kN/m}^2}{68,428 \text{ kN/m}^2} > 1$$

Maka lempung tergolong terkonsolidasi berlebihan, dimana nilai $(\sigma' + \Delta\sigma) > \sigma_{c'}$ sehingga digunakan rumus berikut yang dimuat dalam Hardiyatmo [7]:

$$S_{c'} = \left[\frac{H}{1+e_0} C_s \log \frac{\sigma_{c'}}{\sigma'} \right] + \left[\frac{H}{1+e_0} C_c \log \frac{\sigma'_0 + \Delta\sigma}{\sigma_{c'}} \right]$$

$$= 0,136 \text{ m}$$

Dengan demikian, diperoleh besar nilai penurunan 14 cm yang mana melewati batas penurunan untuk abutmen, yang seharusnya maksimum hanya 10 cm. Jika tidak ditangani maka fondasi akan mengalami kegagalan, sehingga diperlukan solusi berupa penambahan panjang tiang bor rencana dari 8 m menjadi 10 m (Gambar 12).



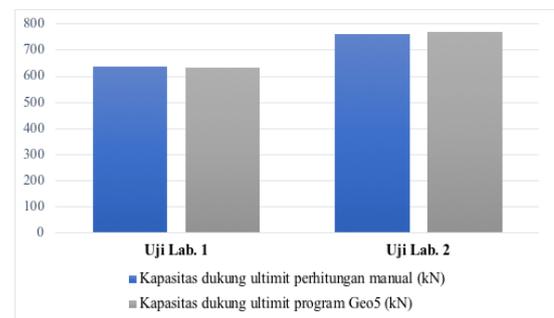
Gambar 12. Skema penurunan tiang bor 10 m

Dengan menggunakan konsep dan cara yang sama, diperoleh besar penurunan untuk tiang bor kedalaman 10 m sebesar 8,9 cm. Nilai ini sudah berada dalam batas toleransi, sehingga dapat ditetapkan. Hasil dari perhitungan manual dan menggunakan program Geo5 dimuat dalam Tabel 7 di bawah.

Tabel 7. Rekapitulasi penurunan tiang bor 10 m

No.	Metode yang Digunakan	Penurunan (cm)
1	Perhitungan manual	8,93
2	Program Geo5	9,81

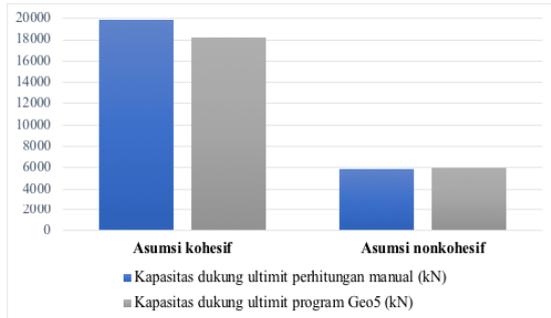
Berdasar perhitungan kapasitas dukung ultimit aksial tiang bor yang telah dilakukan, diperoleh pembahasan sebagai berikut. Nilai terkecil diperoleh berdasar data hasil pengujian laboratorium, yang selanjutnya digunakan sebagai pembanding antara perhitungan manual dengan menggunakan program Geo5. Perbandingan tersebut diinterpretasikan dalam diagram pada Gambar 13. Adapun besar selisih kedua metode adalah 0,845% pada asumsi 1 dan 0,897% pada asumsi 2.



Gambar 13. Perbandingan kapasitas dukung ultimit tiang bor tunggal

Perbandingan besar kapasitas dukung ultimit kelompok tiang bor antara perhitungan manual dengan program Geo5 dapat dilihat pada Gambar 14. Dimana terlihat bahwa pada kedua asumsi, antara perhitungan manual dengan program Geo5 selisih perbandingannya sangat

kecil, yakni 8,092% pada asumsi kohesif dan 2,661% pada asumsi nonkohesif. Metode yang diterapkan pada kedua asumsi tidak ada masalah dan tetap membuktikan bahwa nilai kapasitas dukung kelompok tiang bor baik cara manual maupun menggunakan program Geo5 tidak berselisih jauh.



Gambar 14. Perbandingan kapasitas dukung ultimit kelompok tiang bor

KESIMPULAN

Besar nilai kapasitas dukung aksial ultimit tiang bor tunggal perhitungan manual terkecil yakni menggunakan data hasil uji laboratorium, dengan nilai 638,8 kN untuk asumsi keseluruhan lempung dan 761,6 kN untuk asumsi kombinasi. Permodelan ke dalam program Geo5 menghasilkan nilai 633,4 kN dan 768,7 kN dengan besar perpindahan maksimum adalah 1,41 cm. Pada kelompok tiang bor, untuk asumsi tiang tunggal (*piles acting as a single pile*) perhitungan manual menghasilkan nilai 5861,68 kN dan menggunakan program Geo5 menghasilkan nilai 6017,64 kN. Sedangkan untuk asumsi keruntuhan blok (*piles acting as group*) perhitungan manual menghasilkan nilai 19819,00 kN dan menggunakan program Geo5 menghasilkan nilai 18215,20 kN.

Adapun perbandingan kapasitas dukung tiang bor tunggal berdasar perhitungan manual dengan program Geo5, adalah 0,845% pada asumsi keseluruhan kohesif dan 0,897% pada asumsi kombinasi antara lempung dengan kerikil. Sementara untuk kelompok tiang bor adalah 8,092% pada asumsi kohesif (tiang kelompok sebagai keruntuhan blok) dan 2,661% pada asumsi nonkohesif (tiang bor sebagai tiang tunggal). Besar penurunan kelompok tiang bor ialah 8,93 cm menggunakan perhitungan manual dan 9,81 cm menggunakan program Geo5.

SARAN

Agar dapat memperoleh hasil yang lebih akurat, pengujian laboratorium hendaknya dilakukan sampai dengan kedalaman yang direncanakan. Selain itu, akan lebih baik jika pada pengujian laboratorium dilakukan pada tiap-tiap lapisan dan tidak hanya mengambil 1-2 sampel tanah saja. Hal ini bertujuan untuk memperoleh data parameter tanah yang lebih bervariasi pada tiap lapisannya, sehingga akan menghasilkan perhitungan yang lebih akurat pula.

Selain itu, membuat beberapa asumsi ketika hendak melakukan permodelan ke dalam program Geo5 sangat diperlukan untuk meniadakan kekurangan program tersebut, yang mana tidak mampu menganalisis 2 jenis tanah (kohesif dan nonkohesif) sekaligus. Bahkan perbandingan menggunakan perangkat lunak (*software*) komputer tidak harus menggunakan program Geo5. Dapat juga dengan program lain seperti Plaxis 3D atau *L-pile*. Sebab metode dan sistem/cara kerja yang digunakan tiap program pasti berbeda-beda.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih kepada kontraktor PT. Bumi Indonesia yang telah bersedia untuk memberikan data terkait proyek Pembangunan Jembatan Ritan, sebagai bahan dalam penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] CV. Jeva Utama Konsulindo. (2016). Laporan Pendahuluan Proyek Pembangunan Jembatan Ritan. Samarinda: Kantor Utama.
- [2] Ayayda, O. (2019). Redesign of Foundation of Auditorium UMS by Manual Calculations and Using Geo5 Software. Surakarta: Universitas Muhammadiyah Surakarta.
- [3] Badan Standarisasi Nasional. (2005). RSNI T-02-2005 tentang Standar Pembebanan untuk Jembatan. Jakarta: Badan Litbang Pekerjaan Umum.
- [4] Universitas Katolik Parahyangan. (2013). Manual Pondasi Tiang. Bandung: Deep Foundation Research Institute.

- [5] Hardiyatmo, H. (2015). Analisis dan Perancangan Fondasi II. Yogyakarta: Gadjah Mada Univesity Press.
- [6] Hardiyatmo, H. (2014). Analisis dan Perancangan Fondasi I. Yogyakarta: Gadjah mada University Press.
- [7] Uzodimma, U. (2018, Maret 5). Design of Piles in Sand: Case Study of Lekki Pennisula, Lagos Nigeria. Retrieved from Structville.