

PENGARUH BEBAN BANGUNAN TINGGI PADA RAFT PILE TERHADAP STRUKTUR BANGUNAN SEKITARNYA

Giovann¹ dan Gregorius Sandjaja Sentosa²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
giovannhiu@gmail.com

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
gregoriuss@ft.untar.ac.id

Masuk: 30-06-2020, revisi: 06-07-2020, diterima untuk diterbitkan: 04-08-2020

ABSTRACT

Raft pile foundation is an option for high rise building that has more than 30 stories on soft to moderate soil conditions. Either spun pile or bored pile can be used as the pile foundation. This study focuses on 34-story building that is constructed near electric rail train station, where the soil type is dominantly clay with average N-SPT 20 – 30, there is also thin layer of soil with N-SPT 60. The study compares two types of piles, 30 m depth floating pile and 32 m depth end bearing pile, where the raft thickness is 2 m. The study was conducted by calculating the bearing capacity and settlement with formulas based from correlations of N-SPT and the N-SPT data. Midas 3D also used to simulate the settlement of the building and settlement around the building. The results show that for bored pile with depth of 30 and 32 m respectively has settlement of 20,757 cm and 3,0475 cm while the settlement around the building consecutively is around 10 – 11 cm and 1,5 – 2 cm. Bearing capacity of bored pile with 30 m depth is around 1593,6779 – 5382,5954 kN while bored pile with 32 m depth is around 1978,9153 – 6021,3859 kN.

Keywords: raft pile foundation; N-SPT; bearing capacity; settlement; Midas GTS NX 3D

ABSTRAK

Fondasi rakit merupakan salah satu pilihan yang dapat digunakan untuk bangunan tinggi lebih dari 30 lantai pada tanah kondisi lunak sampai sedang. Untuk jenis fondasi tiang dapat digunakan tiang bor atau tiang pancang. Dalam penelitian ini dilakukan studi fondasi bangunan 34 lantai yang didirikan dekat dengan stasiun kereta rel listrik di mana lapisan tanah dominan lempung dengan N-SPT rata-rata 20 – 30 dan juga ada nilai N-SPT 60 namun berupa lapisan tipis. Studi dilakukan dengan membandingkan dua jenis tiang yaitu tiang dengan daya dukung friksi kedalaman 30 m dan tiang dengan daya dukung ujung kedalaman 32 m dengan ketebalan fondasi rakit 2 m. Studi dilakukan dengan menghitung daya dukung serta penurunan menggunakan pendekatan rumus-rumus berdasarkan data N-SPT dan korelasi dari data N-SPT, juga dilakukan simulasi Midas 3D untuk mengetahui besar penurunan yang terjadi di sekitar bangunan. Dari hasil studi banding diperoleh penurunan fondasi tiang 30 m dan tiang 32 m berturut-turut sebesar 20,757 cm dan 3,0475 cm sedangkan penurunan sekitarnya diperoleh berturut-turut 10 – 11 cm dan 1,5 – 2 cm. Daya dukung yang diperoleh tiang 30 m berkisar 1593,6779 – 5382,5954 kN dan tiang 32 m berkisar 1978,9153 – 6021,3859 kN.

Kata kunci: fondasi rakit tiang; N-SPT; daya dukung; penurunan; Midas GTS NX 3D.

1. PENDAHULUAN

Pertumbuhan penduduk pada taraf yang tergolong cepat serta semakin berkurangnya lahan permukiman menjadikan apartemen salah satu alternatif tempat tinggal yang tergolong efisien jika dilihat dari segi penghematan lahan tinggal. Dari sekian banyak apartemen yang telah dibangun, baru-baru ini ada proyek pembangunan gedung apartemen yang memanfaatkan konsep *transit oriented development* (TOD) yaitu pendekatan pengembangan kota yang mengadopsi tata ruang campuran dan maksimalisasi penggunaan angkutan massal seperti *busway*, MRT dan LRT yang bertujuan untuk memberikan kemudahan bagi penghuni saat berpergian menggunakan transportasi umum.

Salah satu apartemen yang akan dibangun menggunakan konsep TOD adalah Apartemen X dengan jumlah tiga menara (A, B1 dan B2) masing-masing memiliki jumlah lantai 34 dan lokasinya terletak dekat stasiun kereta. Apartemen X ini menggunakan fondasi gabungan antara fondasi rakit dengan tiang bor atau disebut juga dengan *raft*

pile. Konsep *transit oriented development* ini memang terdengar menarik akan tetapi pelaksanaan konstruksinya tentu memiliki beberapa tantangan, salah satunya adalah dalam bidang geoteknik. Perencanaan pembangunan Apartemen X ini tentu tidak boleh sembarangan karena letaknya berdekatan dengan stasiun kereta, ada pun hal-hal yang perlu diperhatikan antara lain seperti proses pembuatan fondasi tidak boleh menimbulkan getaran yang berlebihan karena dapat mempengaruhi tanah di sekitar, lalu efek penurunan yang ditimbulkan pada bangunan terhadap tanah di sekitarnya juga harus dijaga seminimal mungkin.

Hal yang menarik dalam perencanaan Apartemen X ini adalah perencanaan fondasi tiang bor yang menurut *owner* bahwa ujung tiang harus berada pada tanah keras (*end bearing pile*), sedangkan letak tanah keras untuk menara B2 berada pada kedalaman 32 m dengan jumlah tiang sebanyak 165 tiang. Untuk dimensi dari fondasi rakit sendiri adalah sebesar $66,25 \times 18,835 \times 2 \text{ m}^3$.

Dalam penelitian ini perhitungan analisis fondasi dalam dilakukan dengan dua cara yaitu: perhitungan pendekatan manual dan menggunakan aplikasi berbasis metode elemen hingga. Penggunaan aplikasi berbasis metode elemen hingga dilakukan untuk memperoleh hasil yang lebih akurat karena dapat dilakukan pemodelan yang lebih rumit baik secara dua dimensi maupun tiga dimensi. Aplikasi berbasis metode elemen hingga yang digunakan adalah Midas GTS NX, yaitu sebuah aplikasi geoteknik yang dapat melakukan simulasi yang terjadi pada lapangan.

Batasan masalah dalam penelitian ini antara lain:

1. Menganalisis daya dukung serta penurunan tanah menggunakan perhitungan manual.
2. Penampang tiang bor berbentuk lingkaran dengan diameter tiang bor sebesar 1 meter.
3. Simulasi kemungkinan pengaruh terhadap bangunan di sekitarnya terutama penurunan
4. Beban yang diberikan pada gedung hanya merupakan beban gravitasi.

Rumusan masalah yang akan dibahas pada penelitian ini adalah:

1. Berapa kedalaman tiang bor yang dibutuhkan untuk fondasi rakit dengan daya dukung friksi?
2. Berapa daya dukung fondasi dalam pada pembangunan Apartemen X berdasarkan kedalaman yang didapat?
3. Berapa penurunan fondasi dalam yang terjadi?

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Menganalisis kedalaman tiang bor yang dibutuhkan untuk fondasi rakit.
2. Menganalisis hasil perhitungan daya dukung fondasi dalam pada pembangunan Apartemen X.
3. Menganalisis hasil perhitungan penurunan fondasi dalam berdasarkan kedalaman tiang bor yang didapat.

Klasifikasi tanah

Saat melakukan perencanaan fondasi, klasifikasi tanah berfungsi sebagai acuan awal dalam memprediksi sifat tanah. Metode klasifikasi tanah yang dipakai adalah USCS (*Unified Soil Classification System*) yaitu sebuah metode klasifikasi tanah yang umum digunakan dalam bidang geoteknik. Berdasarkan klasifikasinya (Tabel 1) tanah terbagi menjadi dua kelompok yaitu tanah berbutir kasar dan tanah berbutir halus, di mana tanah berbutir halus adalah tanah yang lebih dari setengah materialnya lolos uji saring nomor 200 atau diameter 0,074 mm. Berdasarkan USCS penggolongan tanah disimbolkan dengan 2 huruf di mana huruf pertama merupakan kode dari jenis tanah (Casagrande, 1948 dalam Bowles, 1995):

G	: Kerikil (<i>gravel</i>)	C	: Lempung (<i>clay</i>)
S	: Pasir (<i>sand</i>)	O	: Organik (<i>organic</i>)
M	: Lanau (<i>silt</i>)	Pt	: Gambut (<i>peat</i>)

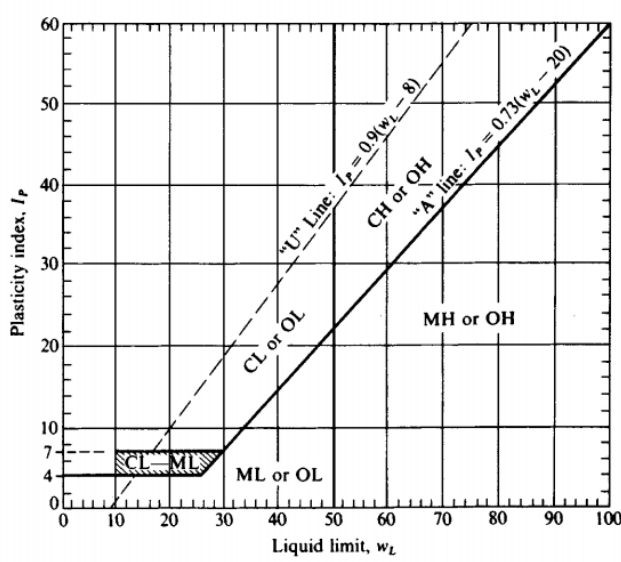
Sedangkan huruf kedua menunjukkan karakteristik tanah:

W	: Gradasi baik (<i>well graded</i>)	L	: Plastisitas rendah (<i>low plasticity</i>)
P	: Gradasi buruk (<i>poor graded</i>)	H	: Plastisitas tinggi (<i>high plasticity</i>)

Gambar 1. Klasifikasi tanah *unified* (Bowles, 1995)

Major divisions		Group symbols	Typical names	Laboratory classification criteria		
Coarse-grained soils (More than half of material is larger than No. 200 sieve size)	Gravels (More than half of coarse fraction is larger than No. 4 sieve size)	GW	Well-graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ greater than 4; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{10}}$ between 1 and 3		
		GP	Poorly graded gravels, gravel-sand mixtures, little or no fines	Not meeting C_u or C_c requirements for GW		
		GM*	d	Silty gravels, gravel-sand-silt mixtures	Atterberg limits below "A" line or I_P less than 4	Limits plotting in hatched zone with I_P between 4 and 7 are <i>borderline</i> cases requiring use of dual symbols.
			u			
	GC	Clayey gravels, gravel-sand-clay mixtures		Atterberg limits above "A" line with I_P greater than 7		
		Sands (More than half of coarse fraction is smaller than No. 4 sieve size)	SW	Well-graded sands, gravelly sands, little or no fines	$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$ greater than 6; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}}$ between 1 and 3	
	SP		Poorly graded sands, gravelly sands, little or no fines	Not meeting C_u or C_c requirements for SW		
	Sands with fines (Appreciable amount of fines)	SM*	d	Silty sands, sand-silt mixtures	Atterberg limits below "A" line or I_P less than 4	Limits plotting in hatched zone with I_P between 4 and 7 are <i>borderline</i> cases requiring use of dual symbols.
			u			
		SC	Clayey sands, sand-clay mixtures		Atterberg limits above "A" line with I_P greater than 7	
Determine percentages of sand and gravel from grain-size curve. Depending on percentages of fines (fraction smaller than No. 200 sieve size), coarse-grained soils are classified as follows: Less than 5% GW, GP, SW, SP More than 12% GM, GC, SM, SC 5 to 12% <i>Borderline</i> cases requiring dual symbols†						

Fine-grained soils (More than half of material is smaller than No. 200 sieve)	Silts and clays (Liquid limit less than 50%)	ML	Inorganic silts and very fine sands, rock flour, silty or clayey fine sands, or clayey silts with slight plasticity	For all soils plotting nearly on "A" line use dual symbols, i.e., $I_P = 29.5$, $w_L = 60$ gives CH-OH or CH-MH. When w_L is near 50 use CL/CH, ML/MH. Take "nearly on" as ± 2 percent.	
		CL	Inorganic clays of low to medium plasticity, gravelly clays, sandy clays, silty clays, lean clays		
		OL	Organic silts and organic silty clays of low plasticity		
	Silts and clays (Liquid limit greater than 50%)	MH	Inorganic silts, micaceous or diatomaceous fine sandy or silty soils, elastic silts		
		CH	Inorganic clays of high plasticity, fat clays		
		OH	Organic clays of medium to high plasticity, organic silts		
	Highly organic soils	Pt	Peat and other highly organic soils		



Tipe fondasi tiang

Berdasarkan pengaruhnya terhadap tanah, tiang dapat dibagi menjadi tiga tipe antara lain (British Standard 8004, 1986):

1. Tiang perpindahan besar (*large displacement pile*)

Tiang perpindahan besar mencakup semua jenis tiang padat dan tiang berongga dengan ujung tertutup lalu dipancang ke dalam tanah sehingga menghasilkan perpindahan volume tanah yang cukup besar. Contoh tiang perpindahan besar antara lain tiang kayu, tiang beton pracetak, tiang beton berongga dengan ujung tertutup.

2. Tiang perpindahan kecil (*small displacement pile*)

Tiang perpindahan kecil adalah tiang yang pelaksanaannya dilakukan dengan cara pemancangan tetapi menimbulkan perpindahan volume tanah yang kecil. Contoh tiang perpindahan kecil antara lain tiang baja H dan tiang baja bulat berongga.

3. Tiang tanpa perpindahan (*non displacement pile*)

Tiang tanpa perpindahan merupakan tiang yang tidak menimbulkan perpindahan volume tanah karena pelaksanaannya dilakukan dengan cara pengeboran atau metode penggalian lainnya. Contoh tiang tanpa perpindahan adalah tiang bor.

Daya dukung fondasi rakit

Dalam menentukan daya dukung fondasi rakit dapat digunakan formula daya dukung fondasi dangkal yang dikemukakan oleh (Terzaghi, 1943) sebagai berikut.

$$Q_u = A \cdot \frac{C \cdot N_c \cdot S_c + q \cdot N_q + 0,5 \cdot \gamma \cdot B \cdot N_\gamma \cdot S_\gamma}{SF} \quad (1)$$

dengan Q_u = daya dukung ultimit, A = luas permukaan fondasi, C = kohesi tanah, N_c = faktor kemiringan beban, S_c = faktor bentuk, q = tegangan tanah sepanjang tebal fondasi, N_q = faktor kemiringan beban, γ = berat jenis tanah, B = lebar fondasi, N_γ = faktor kemiringan beban, S_γ = faktor bentuk dan SF = faktor keamanan.

Daya dukung tiang bor

Dalam menentukan daya dukung fondasi tiang bor pada tanah kohesif, formula umum yang digunakan merupakan hasil penjumlahan tahanan ujung dan tahanan selimut tiang, di mana formula umum bisa dinyatakan dalam bentuk berikut. (Rahardjo, 2013)

$$Q_u = \frac{Q_p + Q_s}{SF} \quad (2)$$

dengan Q_u = daya dukung ultimit, Q_p = daya dukung ujung, Q_s = daya dukung friksi dan SF = faktor keamanan.

Untuk mencari nilai Q_p (daya dukung ujung) maka dapat digunakan persamaan berikut

$$Q_p = 9 \cdot S_u \cdot A \quad (3)$$

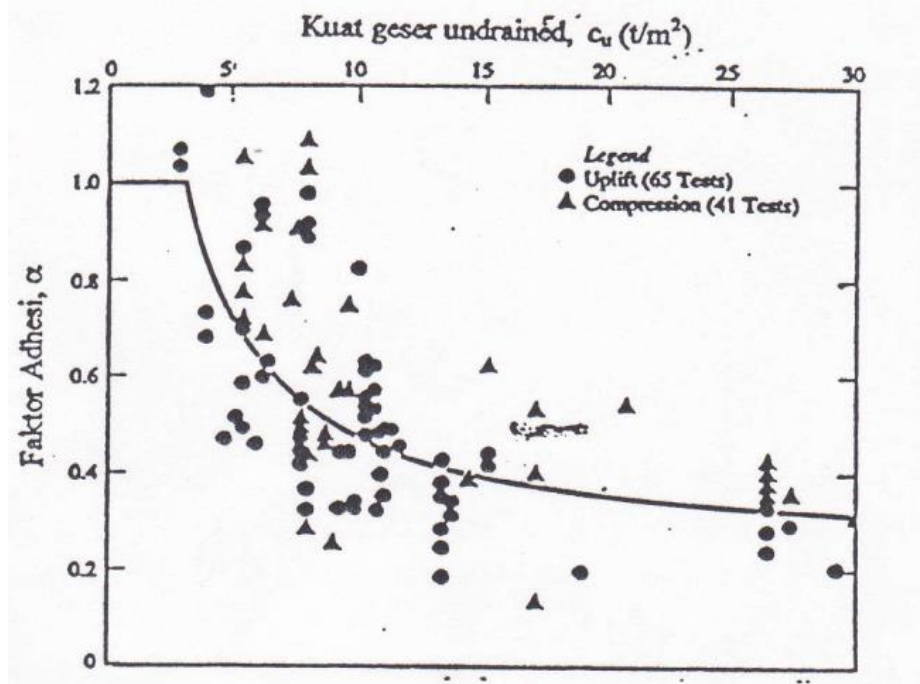
dengan Q_p = daya dukung ujung, S_u = *undrained shear strength* dan A = luas penampang tiang.

Sedangkan untuk mencari nilai Q_s (daya dukung friksi) dapat digunakan persamaan berikut

$$Q_s = \alpha \cdot C_u \cdot L \cdot p \quad (4)$$

dengan α = faktor adhesi, C_u = kohesi tanah, L = panjang tiang dan p = keliling penampang tiang.

Nilai α dapat diperoleh berdasarkan grafik pada Gambar 2.



Gambar 2. Faktor adhesi menurut Kulhawy, 1991 dalam (Rahardjo, 2013)

Formula yang sudah dipaparkan di atas merupakan formula yang memerlukan korelasi dari nilai N-SPT sehingga membutuhkan parameter-parameter seperti *undrained shear strength* dan kohesi. Untuk formula yang murni menggunakan nilai N-SPT untuk mendapatkan daya dukung ultimit dapat diperoleh dari formula yang dianjurkan oleh Meyerhof, 1956 dalam (Rahardjo, 2013) sebagai berikut.

$$Q_u = \frac{40 \cdot N_p \cdot A_p + X_m \cdot N_s \cdot A_s}{SF} \quad (5)$$

dengan Q_u = daya dukung ultimit, N_p = nilai N-SPT pada dasar tiang, A_p = luas penampang dasar tiang, $X_m = 0,5$ untuk *non displacement pile* seperti tiang bor, A_s = luas selimut tiang dan SF = faktor keamanan.

Efisiensi tiang kelompok

Apabila jarak antar tiang bor tidak beraturan maka (Rahardjo, 2013) menyarankan untuk menggunakan formula Feld. Dalam metode ini kapasitas individual fondasi tiang berkurang sebesar 1/16 akibat adanya tiang yang berdampingan baik dalam arah lurus maupun dalam arah diagonal. Ilustrasi perhitungan formula ini dapat dilihat pada Gambar 3.

$$E_g = \frac{4 \times \frac{13}{16} \times 6 \times \frac{11}{16} + 2 \times \frac{8}{16}}{12} = 0.7$$

Gambar 3. Efisiensi kelompok tiang formula Feld (Rahardjo, 2013)

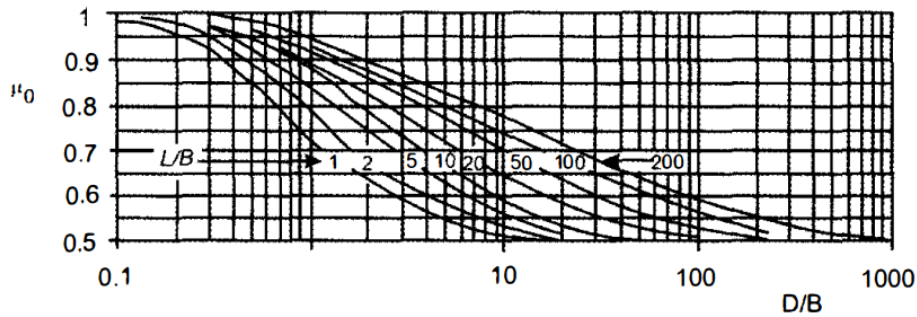
Penurunan tiang kelompok

Untuk perhitungan penurunan pada penelitian ini dibagi menjadi dua yaitu penurunan seketika dan penurunan konsolidasi. Untuk menghitung penurunan seketika rata-rata dapat dilakukan dengan menggunakan formula yang diusulkan Janbu et al. 1956 dalam (Tomlinson & Woodward, 2014) sebagai berikut.

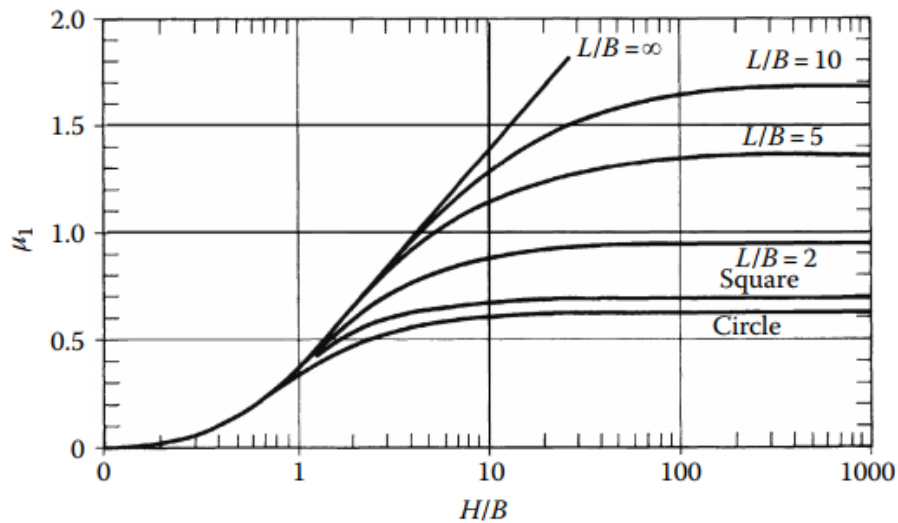
$$S_i = \mu_1 \mu_0 \frac{q_n B}{E} \quad (6)$$

dengan μ_1 = faktor koreksi ketebalan tanah, μ_0 = faktor koreksi kedalaman fondasi, q_n = tekanan fondasi netto, B = lebar area pembebanan dan E = modulus elastisitas tanah.

Nilai μ_1 dan μ_0 berturut-turut didapatkan melalui Gambar 4 dan Gambar 5.



Gambar 4. Faktor koreksi μ_0 Janbu et al. 1956 dalam (Tomlinson & Woodward, 2014)



Gambar 5. Faktor koreksi μ_1 Janbu et al. 1956 dalam (Tomlinson & Woodward, 2014)

Untuk perhitungan penurunan konsolidasi, formula yang digunakan dapat berbeda-beda sesuai dengan persyaratan yang berlaku. Jika $P_c < P_o$ maka digunakan formula berikut.

$$S_c = \frac{H}{1+e_o} Cc \log \frac{P_o + \Delta p}{P_o} \quad (7)$$

dengan H = ketebalan lapisan tanah yang ditinjau, e_o = initial void ratio, Cc = koefisien kompresibilitas, P_o = tegangan efektif tanah pada permukaan lapisan tanah yang ditinjau, Δp = tekanan fondasi netto.

Jika $P_o < P_c < P_o + \Delta p$ maka digunakan formula berikut.

$$S_c = \frac{H}{1+e_o} (Cr \log \frac{P_c}{P_o} + Cc \log \frac{P_o + \Delta p}{P_c}) \quad (8)$$

dengan H = ketebalan lapisan tanah yang ditinjau, e_o = *initial void ratio*, Cr = koefisien rekompresibilitas, P_c = tegangan kompresibilitas, P_o = tegangan efektif tanah pada permukaan lapisan tanah yang ditinjau, Cc = koefisien kompresibilitas, Δp = tekanan fondasi netto.

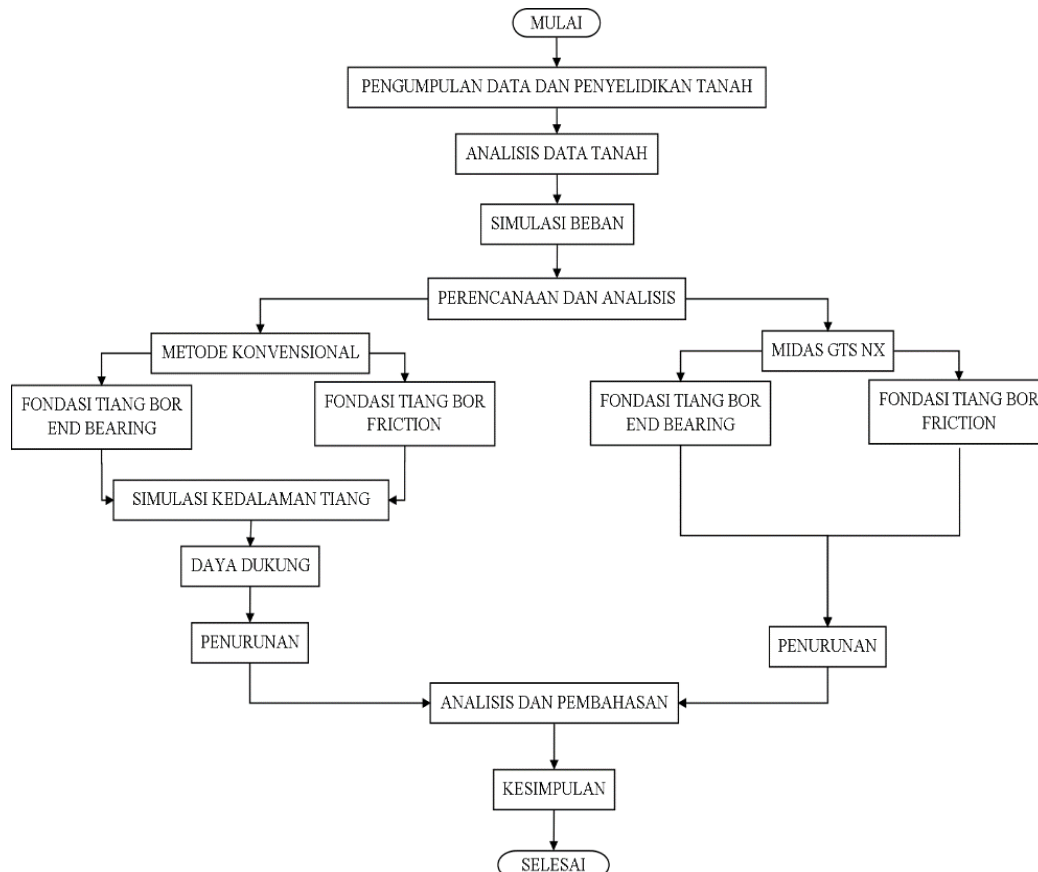
Jika $P_o + \Delta p < P_c$ maka digunakan formula berikut.

$$S_c = \frac{H}{1+e_o} Cr \log \frac{P_o + \Delta p}{P_o} \quad (9)$$

dengan H = ketebalan lapisan tanah yang ditinjau, e_o = *initial void ratio*, Cr = koefisien rekompresibilitas, P_o = tegangan efektif tanah pada permukaan lapisan tanah yang ditinjau, Δp = tekanan fondasi netto.

2. METODE PENELITIAN

Alur atau tahapan dari penelitian ini tertera dalam bentuk diagram pada Gambar 6.



Gambar 6. Diagram alur penelitian

Pada penelitian ini pengumpulan data dilakukan dengan menggunakan data laboratorium berdasarkan data *soil investigation* Apartemen X dan apabila jika ada data yang kurang lengkap maka diperlukan korelasi data tanah dengan parameter-parameter yang ada. Setelah data yang dimiliki sudah cukup maka tahap selanjutnya adalah simulasi beban pada fondasi dalam. Simulasi ini menggunakan berat bangunan *upper structure* serta berat dari fondasi rakit, di mana sebesar 25% berat total akan didistribusikan secara merata pada permukaan fondasi rakit dan 75% berat total akan didistribusikan secara terpusat kepada masing-masing tiang bor.

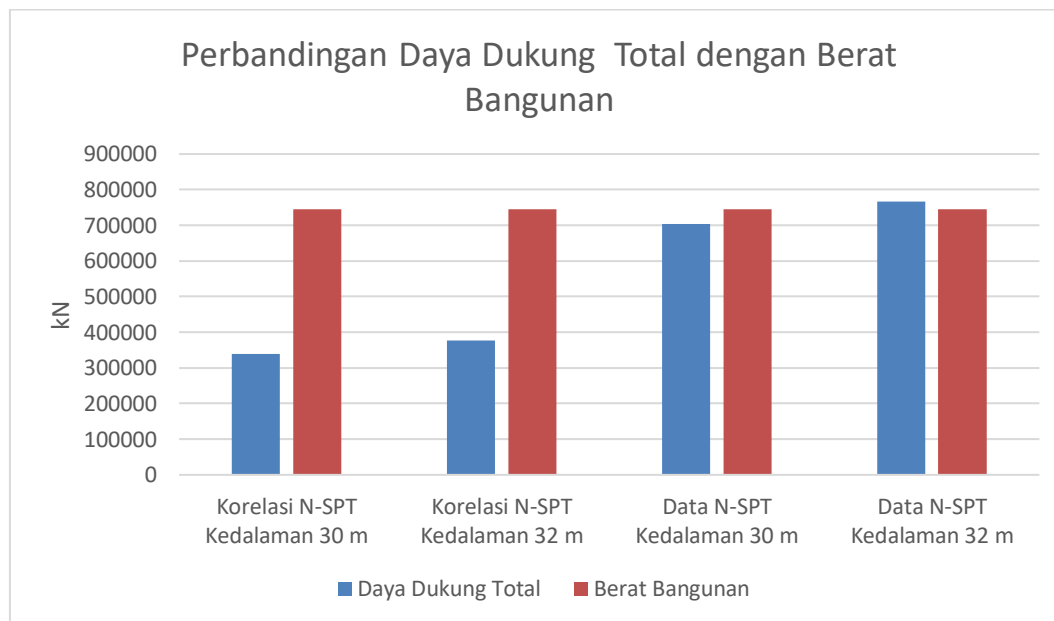
Berdasarkan data dan parameter tanah yang sudah dimiliki serta beban pada fondasi maka dapat dilakukan analisis daya dukung serta penurunan yang terjadi dengan perhitungan secara manual. Analisis dilakukan pada dua jenis kondisi yaitu tiang dengan daya dukung friksi (ujung tiang tidak berada pada tanah keras) serta tiang dengan daya

dukung ujung (ujung tiang berada pada tanah keras). Untuk kondisi di lapangan tiang ditanam pada tanah keras. sehingga penelitian ini ingin mengetahui berapa besar penghematan yang bisa dilakukan apabila kedalaman tiang dikurangi.

Selain menggunakan perhitungan manual, juga dilakukan simulasi dengan aplikasi Midas GTS NX 3D untuk mengetahui besar penurunan yang terjadi pada tanah di sekitar bangunan karena pada jarak kurang lebih 13 meter dari bangunan ada stasiun kereta rel listrik, sehingga apabila penurunan yang terjadi terlalu besar dapat menimbulkan dampak negatif pada rel kereta tersebut. Dari hasil perhitungan manual dan simulasi Midas, keduanya akan dibandingkan besarnya untuk memastikan bahwa analisis yang dilakukan sudah cukup akurat.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Analisis daya dukung total



Gambar 7. Perbandingan daya dukung total dengan berat bangunan

Berdasarkan gambar 7 dapat dilihat bahwa perhitungan dengan menggunakan data N-SPT memberikan hasil yang lebih akurat sedangkan perhitungan dengan menggunakan korelasi data N-SPT kurang akurat dikarenakan data laboratorium yang didapat sangat minim sehingga perlu dilakukan asumsi dan korelasi untuk parameter tanah yang belum diketahui nilainya.

Analisis penurunan total

Tabel 1. Ringkasan besar penurunan dan jenis tiang

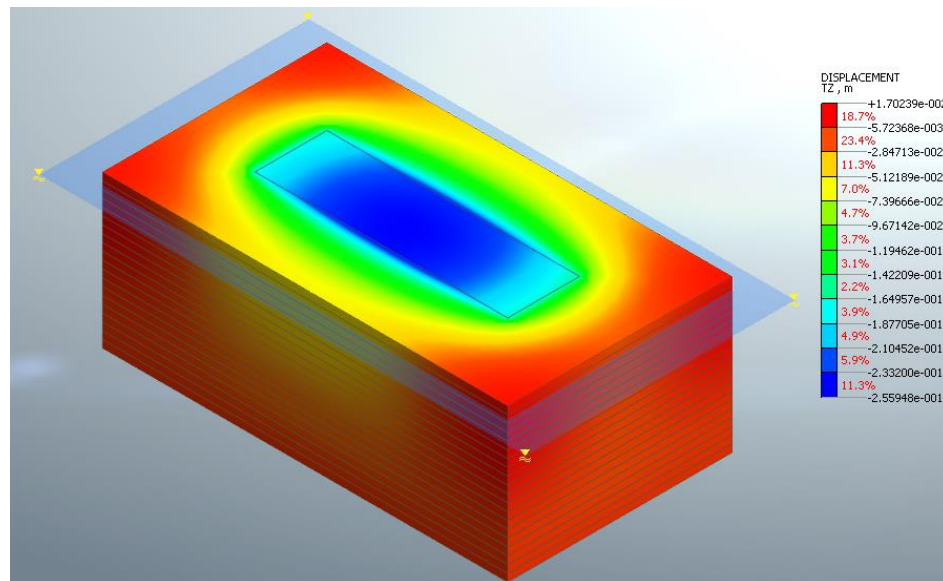
Titik Bor	Jenis Tiang	Penurunan Total (cm)	<i>Differential Settlement</i> < 1 / 300	Syarat Penurunan (cm)
<i>Borhole 1</i>	<i>end bearing</i>	3,4274		
<i>Borhole 2</i>	<i>end bearing</i>	3,3718	$4 \cdot 10^{-4}$	
<i>Borhole 3</i>	<i>end bearing</i>	2,9513	$4 \cdot 10^{-4}$	18,1392
<i>Borhole 4</i>	<i>end bearing</i>	4,5558	0,0016	
<i>Borhole 5</i>	<i>floating</i>	104,4	0,1051	
<i>Borhole 5</i>	<i>end bearing</i>	3,0475	0,0016	

Pada tabel 1 terdapat enam *borhole* di mana masing-masing menara diwakili oleh dua buah *borhole* (*borhole* 6 tidak dilakukan perhitungan penurunan karena data tanah identik dengan *borhole* 5 sehingga besar penurunan yang terjadi juga kurang lebih sama). Untuk jenis tiang *floating* maka perlu dilakukan perhitungan penurunan seketika dan penurunan konsolidasi, sedangkan untuk jenis tiang *end bearing* hanya perlu dilakukan perhitungan penurunan seketika.

Syarat penurunan menurut (SNI 8460, 2017) adalah $< 15 \text{ cm} + (b/600)$ di mana b (dalam cm) merupakan lebar fondasi. Dalam penelitian ini lebar fondasi yang digunakan mengikuti fondasi rakit yang sudah dibuat yaitu sebesar 18,835 m sehingga penurunan izin didapat sebesar 18,1392 cm. Berdasarkan analisis penurunan dapat ditarik kesimpulan bahwa untuk menara B2 (*borhole* 5 dan *borhole* 6) tidak bisa menggunakan fondasi tiang daya dukung friksi karena penurunannya melebihi penurunan izin.

Simulasi penurunan tiang bor kedalaman 30 meter

Simulasi pertama yaitu menggunakan tiang bor dengan daya dukung berdasarkan data N-SPT dengan jumlah tiang 165, dimensi fondasi rakit $66,25 \times 18,835 \times 2 \text{ m}^3$ dengan kedalaman tiang pada 30 m (*floating pile*), jarak dari tepi lapisan ke tepi *raft* adalah 20 m. Hasil yang diambil pada Midas adalah deformasi pada situs pembangunan dan daerah di sekitarnya untuk mengetahui efeknya terhadap struktur di sekitarnya. Deformasi dapat dilihat dari berbagai macam sudut pandang, untuk analisis ini saya memaparkan tampak keseluruhan.

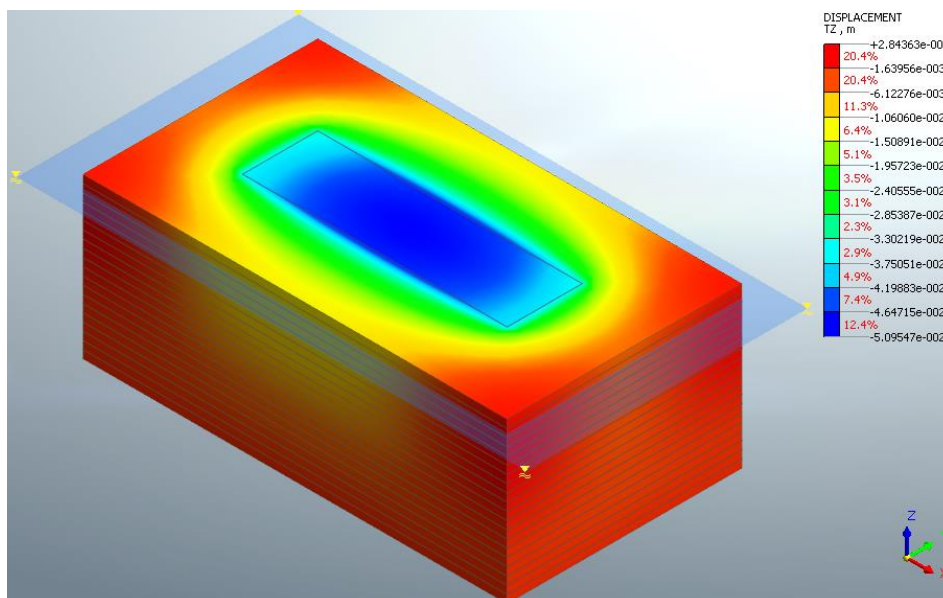


Gambar 8. Deformasi *raft pile* kedalaman 30 m dilihat dari tampak keseluruhan

Pada gambar yang sudah dipaparkan di atas dapat disimpulkan bahwa apabila tiang diletakkan pada kedalaman 30 m dan berfungsi sebagai *floating pile* maka akan menimbulkan penurunan tanah di bawah bangunan maksimum sebesar 25,5948 cm sehingga melebihi syarat yang diberikan yaitu harus $< 15 \text{ cm} + b/600$ di mana b (dalam cm) merupakan lebar fondasi. Lalu untuk efek terhadap rel kereta listrik yang berada $\pm 13 \text{ m}$ dari tepi *raft* terjadi penurunan sekitar 10 – 11 cm.

Simulasi penurunan tiang bor kedalaman 32 meter

Simulasi kedua yaitu menggunakan tiang bor dengan daya dukung berdasarkan data N-SPT dengan spesifikasi sama seperti kedalaman 30 m hanya pada simulasi ini tiang berdiri di tanah keras sehingga termasuk *end bearing pile*. Berikut deformasi yang terjadi tampak keseluruhan.



Gambar 9. Deformasi *raft pile* kedalaman 32 m dilihat dari tampak keseluruhan

Pada gambar yang sudah dipaparkan di atas dapat disimpulkan bahwa apabila tiang diletakkan pada kedalaman 32 m dan berfungsi sebagai *end bearing pile* maka akan menimbulkan penurunan tanah di bawah bangunan maksimum sebesar 5,0955 cm sehingga memenuhi syarat yang diberikan yaitu $< 15 \text{ cm} + b/600$ di mana b (dalam cm) merupakan lebar fondasi. Lalu untuk efek terhadap rel kereta listrik yang berada $\pm 13 \text{ m}$ dari tepi *raft* terjadi penurunan sekitar 1,5 – 2 cm.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil perhitungan manual, nilai daya dukung pada tiang dengan kedalaman 30 m yang didapat lebih kecil dibandingkan dengan berat total struktur sedangkan nilai daya dukung pada tiang dengan kedalaman 32 m lebih besar, hal ini mengindikasikan bahwa *floating pile* tidak dapat digunakan.
2. Penurunan berdasarkan perhitungan manual untuk *floating pile* didapat sebesar 104,4 cm sedangkan untuk *end bearing pile* didapat sebesar 3,0475 cm padahal syarat penurunan berdasarkan SNI 8460:2017 adalah harus $< 15 \text{ cm} + b/600$ (b dalam cm) maka untuk bangunan ini syarat penurunan $< 18,1392 \text{ cm}$. Sehingga selain tidak memenuhi daya dukung, *floating pile* juga tidak memenuhi penurunan izin.
3. Hasil simulasi Midas GTS NX 3D menunjukkan bahwa penurunan yang terjadi pada tanah di bawah rel kereta listrik ($\pm 13 \text{ m}$) dari tepi fondasi rakit mengalami penurunan sekitar 10 – 11 cm untuk *floating pile* dan 1,5 – 2 cm untuk *end bearing pile*, hal ini menunjukkan bahwa terdapat risiko terhadap struktur rel kereta api jika digunakan *floating pile* sebagai fondasi.
4. Penghematan panjang tiang tidak dapat dilakukan untuk menara B2 dan perencanaan aktual di lapangan sudah tepat untuk memanfaatkan *end bearing pile* sebagai fondasi tiang.

Saran terhadap penelitian selanjutnya

Berdasarkan penelitian yang sudah dilakukan dapat direkomendasikan saran terhadap penelitian selanjutnya, yakni:

1. Dalam perhitungan manual, sebaiknya lebih memberikan variasi terhadap jenis, ukuran, bentuk dan posisi tiang namun tetap menggunakan dimensi fondasi rakit eksisting sehingga hasil perhitungan yang didapat lebih beragam.
2. Untuk mendapatkan hasil analisis yang lebih akurat pada program Midas GTS NX 3D, disarankan untuk menggunakan *size mesh* yang lebih kecil serta *offset* dari pemodelan dilakukan lebih besar sehingga hasil simulasi bisa lebih akurat dan mendekati hasil aktual di lapangan.

DAFTAR PUSTAKA

- Bowles, Joseph E. *Foundation Analysis and Design*. Peoria: McGraw-Hill Education, 1995.
- British Standard 8004. *Code of Practice For Foundations*. United Kingdom: BSI British Standard, 1986.
- Rahardjo, Paulus P. *Manual Pondasi Tiang*. Bandung: Universitas Katolik Parahyangan, 2013.
- Standar Nasional Indonesia 8460:2017. *Persyaratan Perancangan Geoteknik*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2017.
- Terzaghi, Karl. *Theoretical Soil Mechanics*. New York: Wiley, 1943.
- Tomlinson, Michael and John Woodward. *Pile Design and Construction Practice*. Boca Raton: CRC Press, 2014.

