

Perencanaan Pondasi Tiang Lekatan pada Gedung Tingkat 3 s/d 5 di Atas Tanah Lunak yang Tebal dengan Ketentuan Penurunan Merata dalam Jangka Panjang

Widya Indriyani Manurung, Indrasurya Budisatria Mochtar, dan Putu Tantri Kumala Sari
Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember
e-mail: indrasurya@ce.its.ac.id

Abstrak—Di Banjarmasin, bangunan-bangunan berlantai dua yang menggunakan pondasi friction pile masih berdiri tetapi banyak bangunan berlantai tiga s/d lima mengalami differential settlement jika menggunakan pondasi end bearing pile pada bangunan tingkat tiga s/d lima, biaya pondasi tiang akan lebih mahal dibandingkan biaya konstruksi karena pondasi tiang mencapai tanah keras. Pada studi ini, dilakukan perencanaan pondasi friction pile yang dapat menjamin penurunan merata pada bangunan tingkat tiga s/d lima dengan kondisi tanah lunak yang tebal menggunakan metode P-Z curve. Perencanaan pondasi tersebut akan dibandingkan dengan metode konvensional, yaitu pondasi end bearing pile. Dari hasil perencanaan didapatkan suatu kesimpulan bahwa perencanaan pondasi friction pile lebih efektif dibandingkan dengan perencanaan pondasi end bearing pile dimana pondasi friction pile sudah memperhitungkan penurunan merata (tidak terjadi differential settlement) sehingga juga kuat untuk menahan gedung tingkat tiga s/d lima. Pondasi end bearing pile kuat juga untuk menahan gedung tersebut tetapi dalam segi biaya, perencanaan pondasi friction pile lebih hemat daripada perencanaan end bearing pile. Untuk jumlah dan kedalaman tiang dari hasil perencanaan pondasi friction pile pada gedung tingkat tiga s/d lima berturut-turut adalah 14m;116 buah, 18m;149 buah, dan 24m;198 buah sedangkan untuk pondasi end bearing pile pada gedung tiga s/d lima berturut-turut adalah 40 m;116 buah, 40m;149 buah, dan 40m;198 buah.

Kata Kunci—Metode P-Z Curve, Penurunan, Pondasi End Bearing Pile, Pondasi Friction Pile, Tanah Lunak.

I. PENDAHULUAN

BANJARMASIN adalah salah satu contoh daerah yang terletak pada daerah rawa dengan tanah lunak. Salah satu bangunan yang berada di atas tanah lunak adalah Rumah Sakit Suriansyah. Rumah sakit tersebut dibangun di atas tanah lunak yang relatif tebal hingga mencapai kedalaman 30 - 40 m. Di Banjarmasin, pada masa lalu banyak bangunan yang dibangun menggunakan pondasi friction pile pada kondisi tanah lunak. Bangunan-bangunan berlantai dua yang menggunakan pondasi friction pile masih berdiri tetapi banyak bangunan berlantai tiga s/d lima yang menggunakan pondasi tiang lekatan dengan kayu ulin, mengalami keretakan atau kemiringan akibat penurunan tidak merata (differential settlement), sehingga gedung menjadi tidak simetris. Saat ini untuk mengantisipasi terjadinya differential settlement, bangunan-bangunan berlantai tiga s/d lima di Banjarmasin pada umumnya menggunakan pondasi tahanan ujung (end bearing pile) dan ujung pondasi tersebut direncanakan sampai menyentuh lapisan tanah keras. Kondisi seperti ini oleh beberapa pengembang dianggap tidak ekonomis, hal ini

dikarenakan biaya konstruksinya tidak sebanding dengan biaya pondasi. Yudiawati dan Mochtar (2003) sudah membuat formula untuk merencanakan penurunan rangkak (creep) dan daya dukung pada pondasi friction pile. Metode yang digunakan untuk merencanakan jumlah pondasi tiang pancang adalah metode P-Z Curve.

Oleh karena itu, Tugas Akhir ini akan membahas perencanaan pondasi *friction pile* pada bangunan berlantai tiga s/d lima dimana Rumah Sakit Rusianyah dipakai sebagai lokasi perencanaan. Perencanaan pondasi *friction pile* akan menggunakan metode P-Z curve. Perencanaan pondasi tersebut akan dibandingkan dengan metode konvensional, yaitu pondasi *end bearing pile* yang akan dihitung jumlah dan kedalaman tiang yang dibutuhkan sedangkan pada pondasi *friction pile* akan dilihat kebutuhan jumlah tulangan dan kedalaman tiangnya. Dari perhitungan kedua pondasi tersebut akan dibandingkan dari segi biaya sehingga dapat disimpulkan perencanaan pondasi tiang yang efektif, yang dapat digunakan untuk menjawab masalah ini.

II. URAIAN PENELITIAN

A. Studi Literatur

Untuk mencari referensi teori yang relevan dengan kasus atau permasalahan yang ditemukan. Referensi dapat dicari dari buku, jurnal, artikel, dan laporan penelitian yang sudah dibuat sebelumnya. Adapun bahan studi yang nantinya digunakan dalam perencanaan adalah pengoperasian software SAP2000 dan PLAXIS, Modul Ajar Mekanika Tanah dan Pondasi untuk perhitungan penurunan pondasi, Buku Braja Das untuk perhitungan daya dukung tanah, perhitungan perencanaan pondasi tiang pancang. Referensi jurnal lainnya digunakan untuk perhitungan penulangan *poer*, perhitungan biaya bahan dari pondasi dan penulangan, dan sebagainya.

B. Pengumpulan Data Sekunder

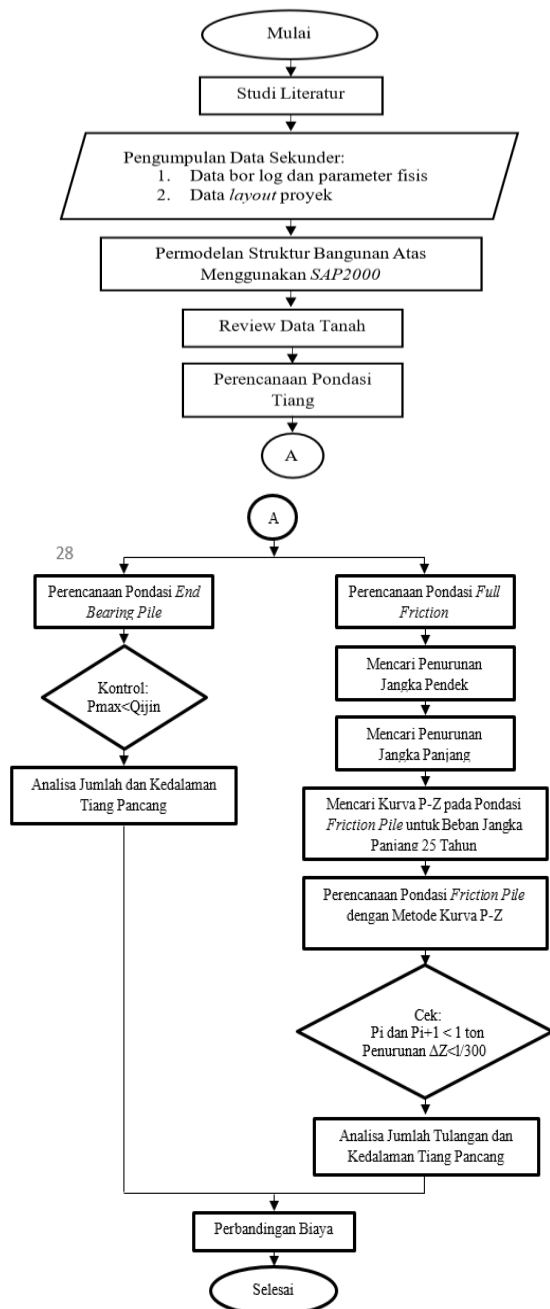
Data-data yang digunakan dalam perencanaan ini adalah data sekunder, dengan rincian sebagai berikut:

1) Data bor log dan parameter fisis

Terdapat tiga titik tinjau *Bore Hole* sampai kedalaman 50 meter. Pada data *Bore Hole* tersebut berisikan data N-SPT dan jenis tanah per kedalaman.

2) Data layout proyek (Autocad)

Terdapat denah balok, kolom, dan potongan struktur, yang terdiri dari elevasi -1.50, lantai 1 elevasi ± 0.00 , lantai 2 elevasi +4.59, lantai 3 elevasi +9.18, lantai 4 elevasi +13.77, lantai 5 +18.36, atap elevasi +22.95, dan atap elevasi +25.95.



Gambar 1. Bagan Alir Tahapan Perencanaan.

C. Permodelan Struktur Bangunan Atas

Permodelan struktur bangunan atas dilakukan dengan program bantu analisa struktur SAP 2000. Permodelan ini bertujuan untuk mendapatkan reaksi perletakan di dasar gedung yang nantinya akan digunakan pada perhitungan perencanaan pondasi tiang. Permodelan dilakukan untuk bangunan berlantai tiga, empat, dan lima.

D. Review Data Tanah

Review data tanah untuk menentukan jenis dan parameter tanah sesuai dengan harga SPT dan jenis tanah dari setiap kedalaman yang didapatkan dari lokasi proyek sehingga dapat menentukan langkah pengerjaan yang tepat sesuai dengan kondisi lapangan.

E. Perencanaan Pondasi Tiang

Perencanaan pondasi tersebut direncanakan dengan

Tabel 1. Data Tanah

Depth (m)	Konsistensi Tanah	γ_{sat} (t/m^3)	c_u (t/m^2)	ϕ ($^\circ$)	e_o	C_c	C_s
1	Very Loose	1,50	0,00	25	2,38	-	-
2	Very Loose	1,50	0,00	25	2,38	-	-
3	Very Loose	1,50	0,00	25	2,38	-	-
4	Very Loose	1,50	0,00	25	2,38	-	-
5	Very Loose	1,50	0,00	25	2,38	-	-
6	Soft	1,65	1,84	0,00	1,62	0,39	0,08
7	Soft	1,63	1,71	0,00	1,70	0,43	0,09
8	Soft	1,61	1,60	0,00	1,79	0,47	0,09
9	Soft	1,60	1,50	0,00	1,85	0,49	0,10
10	Soft	1,59	1,43	0,00	1,89	0,51	0,10
11	Medium	1,70	2,22	0,00	1,42	0,31	0,06
12	Medium	1,69	2,15	0,00	1,45	0,32	0,06
13	Medium	1,68	2,12	0,00	1,49	0,34	0,07
14	Medium	1,68	2,10	0,00	1,49	0,34	0,07
15	Medium	1,68	2,07	0,00	1,49	0,34	0,07
16	Medium	1,67	2,05	0,00	1,53	0,36	0,07
17	Medium	1,67	2,02	0,00	1,53	0,36	0,07
18	Medium	1,67	2,00	0,00	1,53	0,36	0,07
19	Medium	1,66	1,98	0,00	1,58	0,37	0,07
20	Medium	1,66	1,95	0,00	1,58	0,37	0,07
21	Medium	1,66	1,93	0,00	1,58	0,37	0,07
22	Medium	1,65	1,91	0,00	1,62	0,39	0,08
23	Medium	1,65	1,89	0,00	1,62	0,39	0,08
24	Medium	1,65	1,87	0,00	1,62	0,39	0,08
25	Medium	1,65	1,85	0,00	1,62	0,39	0,08
26	Medium	1,64	1,83	0,00	1,66	0,41	0,08
27	Medium	1,64	1,82	0,00	1,66	0,41	0,08
28	Medium	1,64	1,80	0,00	1,66	0,41	0,08
29	Medium	1,64	1,78	0,00	1,66	0,41	0,08
30	Medium	1,64	1,76	0,00	1,66	0,41	0,08
31	Medium	1,63	1,75	0,00	1,70	0,43	0,09
32	Medium	1,63	1,73	0,00	1,70	0,43	0,09

metode P-Z curve untuk pondasi full friction dan metode konvensional untuk pondasi end bearing pile. Berdasarkan hasil analisis permasalahan yang ada maka perencanaan pondasi yang memungkinkan untuk diterapkan adalah:

1) Perencanaan pondasi end bearing pile

Pada perencanaan pondasi end bearing pile, kedalaman tiang pancang sampai menyentuh lapisan tanah keras, yaitu 40 meter. Penurunan pada pondasi end bearing pile ini diasumsikan tidak ada karena hasilnya sangat kecil (dianggap 0). Saat merencanakan kebutuhan jumlah tiang harus dikontrol dengan $P_{max} < Q_{ijin}$.

2) Perencanaan pondasi full friction

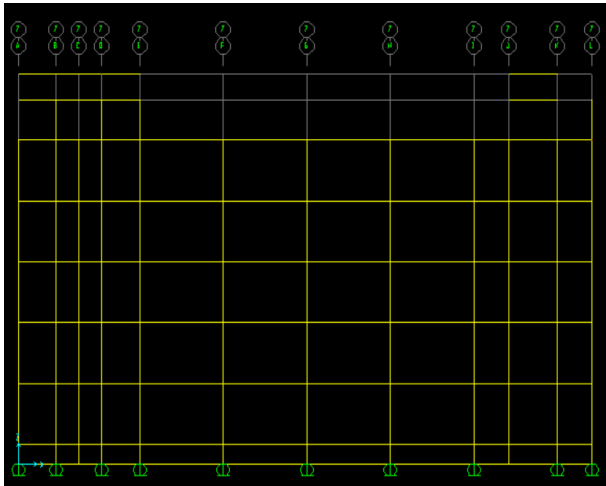
Pada perencanaan pondasi full friction, kedalaman tiang pancang direncanakan sesuai kebutuhan dimana tiang pancang tersebut pada lapisan tanah lempung maka perlu menghitung nilai penurunan pondasi full friction:

- Mencari penurunan segera (short term settlement)
- Mencari penurunan konsolidasi untuk jangka waktu 25 tahun (long term settlement)
- Mencari penurunan oleh pengaruh creep untuk jangka waktu 25 tahun (long term settlement).

Setelah itu, dilakukan iterasi pada nilai P nya hingga P_i dan P_{i+1} memiliki selisih 1 ton. Lalu dilihat nilai penurunannya, harus memenuhi syarat $\Delta Z_{max} < 1/300$.

Tabel 2.
Rekap Perhitungan Daya Dukung Tanah D 0,6 m

Depth (m)	Qult (ton)	Qijin (ton)
14	177,135	59,045
17	210,526	70,175
23	250,153	83,384
40	518,950	172,983



Gambar 2. Permodelan bangunan berlantai lima dengan perletakan rol

Tabel 3.
Rekap Nilai Efisiensi

PONDASI	D (m)	s (m)	n	m	Jumlah	Efpakai
Pondasi 1x1	0,6	1,5	1	1	1	1,000
Pondasi 2x1	0,6	1,5	2	1	2	0,879
Pondasi 3x1	0,6	1,5	3	1	3	0,839

F. Membandingkan dan Menentukan Perencanaan Pondasi Tiang yang Tepat

Apabila kedua pondasi tersebut sudah direncanakan secara aman, maka dilakukan pengecekan total biaya bahan untuk mengetahui perencanaan pondasi tiang pancang yang efektif/ekonomis. Pada pondasi *end bearing pile* menghitung jumlah tiang dan kedalaman tiang pondasi, untuk pondasi *full friction* menghitung jumlah tiang dan tulangnya. Dibandingkan biaya pondasi yang diperlukan dari kedua pondasi tersebut sehingga didapatkan suatu perencanaan pondasi yang efektif untuk menjawab masalah ini berdasarkan analisis yang telah dilakukan. Langkah ini dilakukan untuk bangunan tiga, empat, dan lima lantai. Bagan alir tahapan perencanaan dapat dilihat pada Gambar 1.

III. DATA TANAH DAN PEMBEBANAN

A. Analisa Data Tanah

Data tanah dalam Tugas Akhir ini, terdiri dari 3 titik *Bore Hole*. Data tanah tersebut merupakan Data Bor Log dan SPT (*Standart Penetration Test*) sampai kedalaman 50 meter dimana data tanah yang dipakai dalam Tugas Akhir ini adalah data tanah *Bore Hole 2* dikarenakan hasil penyelidikan tanah menunjukkan bahwa jenis tanah pada BH tersebut didominasi oleh tanah lempung, sehingga dianggap paling kritis (menghasilkan perencanaan yang paling aman).

Data tanah BH 2 tersebut dilakukan analisis koefisien variasi (CV), korelasi data tanah dengan menggunakan tabel

Tabel 4.
Rekap Beban Total dan Penurunan Konsolidasi

Bangunan	P (ton)	Sc konsolidasi (m)
Berlantai 3	12243	0,061
Berlantai 4	14923	0,067
Berlantai 5	17473	0,064

Tabel 5.
Rekap Beban dan Penurunan Creep

Bangunan	P (ton)	Ri (%)	Sc creep (m)
Berlantai 3	177	100	0,0825
Berlantai 4	211	100	0,0633
Berlantai 5	250	100	0,0373

Bowless [1], tabel Biarez [2] dan tabel Das [3]. Hasil analisis tersebut tercantum pada Tabel 1.

B. Daya Dukung Tiang Pancang

Dilakukan perhitungan daya dukung pondasi menggunakan persamaan Mayerhof dengan SF = 3 [2], [4]. Dicari nilai daya dukung *ultimate* dan daya dukung ijin, dengan persamaan :

$$Qujung = Cn ujung \times A ujung \tag{1}$$

$$\Sigma Rsi = Cli \times Asi \tag{2}$$

$$Qult = Qujung + \Sigma Rsi = Cli \times Asi \tag{3}$$

$$Qijin = \frac{Qult}{SF} \tag{4}$$

Nilai daya dukung *ultimate* dan daya dukung ijin pada kedalaman 14m, 17m, 23m, dan 40 m, dapat dilihat pada Tabel 2.

C. Analisa Denah dan Pembebanan Bangunan Rumah Sakit

Denah bangunan dan pembebanan bangunan rumah sakit dibutuhkan untuk mendapatkan reaksi perletakan yang nantinya akan digunakan untuk merencanakan pondasi yang efisien. Analisa beban bangunan dari bangunan rumah sakit dengan ketinggian 3 lantai, 4 lantai, dan 5 lantai menggunakan program bantu SAP2000.

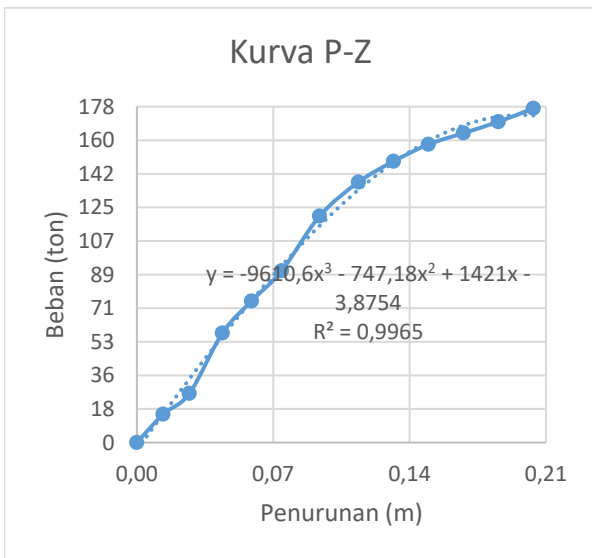
Dikarenakan di Banjarmasin daerah gempa kecil sehingga kombinasi beban bangunan akibat beban gempa diabaikan karena pada umumnya bangunan disana tidak ada yang rusak karena gempa, apalagi pada perencanaan ini untuk bangunan tidak tinggi (gedung tingkat 3 s/d 5).

Titik *fixation point* disini tidak diperlukan sehingga letak perletakan rol berada tepat di permukaan bangunan, untuk sketsanya dapat dilihat pada Gambar 2.

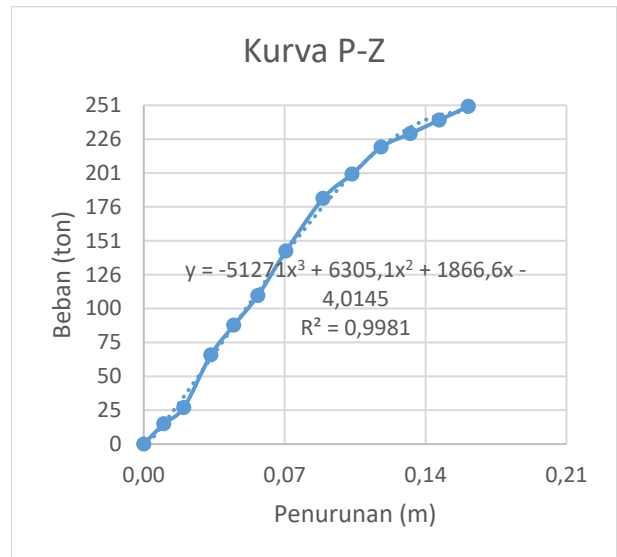
IV. PONDASI FRICTION PILE

A. Efisiensi Tiang Pancang

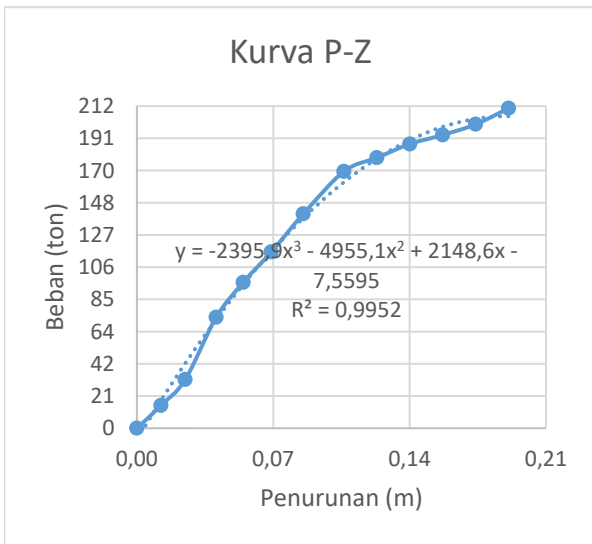
Dalam perencanaan pondasi tiang digunakan tiang pancang PC *spun pile*. Untuk batas jarak antar tiang (s) adalah 2,5D – 3D, dimana s yang dipakai adalah 1,5 m dengan D 0,6 m. Faktor efisiensi untuk tiang pancang dalam *group*, memiliki 3 persamaan [2], dimana nilai efisiensi yang dipakai adalah yang terkecil. Untuk rekapannya dapat dilihat pada Tabel 3.



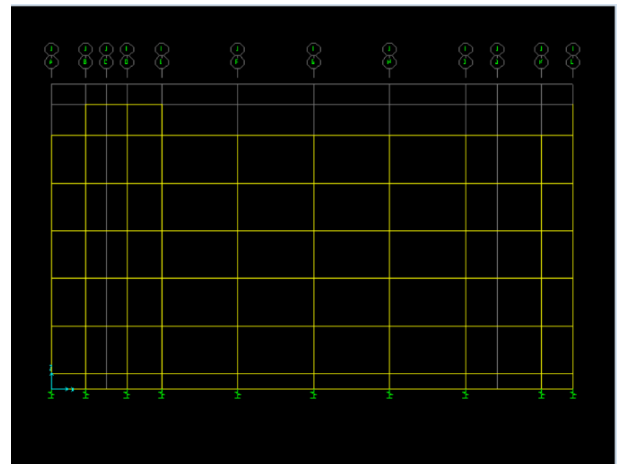
Gambar 3. Kurva P-Z pada bangunan berlantai 3.



Gambar 5. Kurva P-Z pada bangunan berlantai 5.



Gambar 4. Kurva P-Z pada bangunan berlantai 4.



Gambar 6. Permodelan bangunan berlantai 5 dengan perletakan pegas.

$$E_f = 1 - \left(\frac{\arctan \left(\frac{D}{S} \right) \left(\frac{(n-1)m + (m-1)n}{mn} \right)}{90} \right) \quad (5)$$

$$E_f = 1 - \frac{D}{\pi s} \left(\frac{m(n-1) + n(m-1) + (m-1)(n-1)\sqrt{2}}{mn} \right) \quad (6)$$

$$E_f = \left(1 - \left(\frac{36s}{(75s^2 - 7)} \right) \left(\frac{m+n-2}{m+n-1} \right) \right) + \frac{0.3}{m+n} \quad (7)$$

B. Penurunan Segera

Salah satu cara dalam mencari penurunan segera dengan aplikasi *PLAXIS* tetapi pada hasil kalkulasi program *PLAXIS* gagal maka perhitungan penurunan segera menggunakan aplikasi *PLAXIS* tidak dapat digunakan. Dicoba menggunakan grafik dari Reese dan O'Neill, yang menganggap nilai penurunan segera terbesar adalah 1/10 diameter tiang pancang. Dikarenakan pada Tugas Akhir ini merencanakan pondasi dengan diameter 0,6 m, maka besar penurunan segera max adalah 0,06 m.

C. Penurunan Konsolidasi

Terzaghi dan Peck (1967) menyarankan bahwa penyebaran beban pondasi tiang pada tipe tiang gesek dianggap berawal dari 2/3 panjang tiang ke arah bawah. Salah satu pendekatan

kadar yang sangat sederhana untuk menghitung tambahan tegangan akibat beban di permukaan untuk menghitung penurunan diusulkan oleh Boussinesq, caranya dengan membuat garis penyebaran 2V:1H (2 vertikal: 1 horizontal).

Dapat disimpulkan, bahwa pondasi tiang pancang mengalami penurunan dimulai dari kedalaman 2/3 L dari bagian atas tiang. Pada kedalaman 33 m, konsistensi tanah adalah *stiff*, dianggap tidak mengalami konsolidasi sehingga perhitungan penurunan konsolidasi dihitung sampai kedalaman 32 m dimana konsistensi tanahnya *medium* (lempung). Bangunan berlantai tiga, empat, dan lima direncanakan dengan kedalaman 14 m, 17 m, dan 23 m dengan diameter tiang 0,6 m.

Persamaan penurunan konsolidasi untuk tanah lempung adalah sebagai berikut [5]:

Tanah NC, OCR = 1

$$S_c = \sum \left(\frac{C_c H}{1 + e_o} \log \left(\frac{p'0 + \Delta p}{p'0} \right) \right) \quad (8)$$

Tanah OC, OCR > 1

Bila (p'0 + Δp) ≤ p'c

$$S_c = \sum \left(\frac{C_s H}{1 + e_o} \log \left(\frac{p'0 + \Delta p}{p'0} \right) \right) \quad (9)$$

Tabel 6.
Total Penurunan Maksimum dan Penurunan *Differential* yang Diizinkan

<i>Maximum settlement, S_{T(max)}</i>	
<i>In Sand</i>	32 mm
<i>In Clay</i>	45 mm
<i>Maximum differential settlement, ΔST(max)</i>	
<i>Isolated foundation in sand</i>	51 mm
<i>Isolated foundation in clay</i>	76 mm
<i>Raft in sand</i>	51-76 mm
<i>Raft in clay</i>	76-127 mm
<i>Maximum angular distortion, β_{max}</i>	1/300

Tabel 7.
Estimasi Biaya Material Pondasi *Friction Pile*

Uraian	Vol	Sat	Harga Satuan	Total Harga
Bangunan Berlantai 3				
Pondasi Spun Pile D60	1876	m	Rp 418.750	Rp 785.575.000
Pemancangan Tiang	1876	m	Rp 76.800	Rp 144.076.800
Penulangan Poer	306	m ³	Rp 3.754.825	Rp 1.148.976.450
Total Volume Biaya Material				Rp 2.078.628.250
Bangunan Berlantai 4				
Pondasi Spun Pile D60	2278	m	Rp 418.750	Rp 953.912.500
Pemancangan Tiang	2278	m	Rp 76.800	Rp 174.950.400
Penulangan Poer	306	m ³	Rp 3.754.825	Rp 1.148.976.450
Total Volume Biaya Material				Rp 2.277.839.350
Bangunan Berlantai 5				
Pondasi Spun Pile D60	3128	m	Rp 418.750	Rp 1.309.850.000
Pemancangan Tiang	3128	m	Rp 76.800	Rp 240.230.400
Penulangan Poer	306	m ³	Rp 3.754.825	Rp 1.148.976.450
Total Volume Biaya Material				Rp 2.699.056.850

Bila $(p'_{o} + \Delta p) > p'_{c}$

$$S_c = \sum \left(\left(\frac{C_s H}{1 + e_o} \log \left(\frac{p'_{c}}{p'_{o}} \right) + \left(\frac{C_c H}{1 + e_o} \log \left(\frac{p'_{o} + \Delta p}{p'_{c}} \right) \right) \right) \right) \quad (10)$$

Perencanaan pondasi tiang pancang untuk jangka waktu 25 tahun, maka nilai S_c saat t dapat dihitung menggunakan persamaan [5]:

$$t = \frac{T H d r^2}{C_v} \quad (11)$$

$$T = \frac{\pi}{4} \left(\frac{U\%}{100} \right)^2 \text{ untuk } U \leq 60\% \quad (12)$$

$$T = 1,781 - 0,933 \log (100 - U\%), \text{ untuk } U > 60\% \quad (13)$$

$$S_c \text{ saat } t = U \times S_{c \text{ total}} \quad (14)$$

Untuk rekapan nilai S_c saat t pada bangunan berlantai 3, 4, dan 5 dengan nilai beban aksial total pada masing-masing bangunan, dapat dilihat pada Tabel 4.

Tabel 8.
Estimasi Biaya Material Pondasi *End Bearing Pile*

Uraian	Vol	Sat	Harga Satuan	Total Harga
Bangunan Berlantai 3				
Pondasi Spun Pile D60	4320	m	Rp 418.750	Rp 1.809.000.000
Pemancangan Tiang	4320	m	Rp 76.800	Rp 331.776.000
Penulangan Poer	544	m ³	Rp 3.754.825	Rp 2.042.624.800
Total Volume Biaya Material				Rp 4.183.400.800
Bangunan Berlantai 4				
Pondasi Spun Pile D60	4720	m	Rp 418.750	Rp 1.976.500.000
Pemancangan Tiang	4720	m	Rp 76.800	Rp 362.496.000
Penulangan Poer	544	m ³	Rp 3.754.825	Rp 2.042.624.800
Total Volume Biaya Material				Rp 4.381.620.800
Bangunan Berlantai 5				
Pondasi Spun Pile D60	5160	m	Rp 418.750	Rp 2.160.750.000
Pemancangan Tiang	5160	m	Rp 76.800	Rp 396.288.000
Penulangan Poer	544	m ³	Rp 3.754.825	Rp 2.042.624.800
Total Volume Biaya Material				Rp 4.599.662.800

D. Penurunan Akibat Rangkak

Perumusan penurunan rangkak oleh Mochtar (1985) divalidasi melalui penelitian lanjutan yang dilakukan oleh Dengan melakukan analisa terhadap hasil uji pembebanan tiang sebenarnya dan tiang model di lapangan, melalui analisa data dari berbagai hasil pengujian pembebanan lapangan, dan menghasilkan formula sebagai berikut [6]:

$$\delta(cr) = \left(\frac{1}{10^{(0.0383L+4.361)}} \right) di \frac{u \exp(V Ri)}{w} t^w \quad (15)$$

Untuk rekapan nilai S_c *creep* dan beban pada bangunan berlantai 3, 4, dan 5 pada masing-masing bangunan, dapat dilihat pada Tabel 5. Untuk kurva P-Z pada bangunan berlantai 3, 4, dan 5 dapat dilihat pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5.

E. Iterasi Nilai P dengan Kurva P-Z

Iterasi ini dilakukan dengan analisa *trial and error* dimana langkah tersebut dilakukan berulang-ulang di semua titik *joint* pada bangunan berlantai 3, 4, dan 5 menggunakan Kurva P-Z yang dapat dilihat pada Gambar 3, Gambar 4, dan Gambar 5 sesuai bangunannya. Iterasi dilakukan hingga nilai P pada iterasi ke- i dan P_{i+1} memiliki selisih nilai P bernilai 1 ton. Jika selisihnya belum sesuai syarat maka perlu dilakukan iterasi kembali hingga mencapai syarat.

Saat beban aksial tersebut konvergen (sama) maka nilai Z_i dan Z_{i+1} dapat diasumsikan konvergen juga sehingga pada titik *joint* tersebut mengalami penurunan merata. Nilai P_{i+1} akan digunakan untuk perhitungan perencanaan pondasi *friction pile*. Perletakan yang digunakan pada bangunan berlantai 3, 4, dan 5 adalah pegas (*spring*), dapat dilihat pada Gambar 6. Adapun untuk mencari konstanta pegas dengan menggunakan rumus sebagai berikut [7]:

$$k = \frac{P}{Z} \quad (16)$$

Tabel 9.
Rekap Nilai Penurunan pada Masing-Masing Bangunan

Bangunan	Si (m)	Skonsolidasi (m)	Screep (m)	Sc Total (m)
Berlantai 3	0,060	0,061	0,0825	0,20
Berlantai 4	0,060	0,067	0,0633	0,19
Berlantai 5	0,060	0,064	0,0373	0,16

Tabel 10.
Rekap dari Hasil Perencanaan Pondasi Tiang

Keterangan	Friction Pile		End Bearing Pile	
	Panjang (m)	Jumlah (buah)	Panjang (m)	Jumlah (buah)
Tingkat 3	14	134	40	108
Tingkat 4	17	134	40	118
Tingkat 5	23	136	40	129

F. Pengecekan Batas Nilai Penurunan Maksimum

Perlu dilakukan kontrol terhadap nilai penurunan yang terjadi pada suatu pondasi, jika tidak dilakukan suatu pengecekan maka bangunan dapat mengalami *differential settlement* karena penurunan antar kolom tidak merata. Untuk syarat penurunan maksimum pada suatu pondasi tertentu [5]. Total penurunan maksimum dan penurunan *differential* yang diizinkan dapat dilihat pada Tabel 6.

Pada Tugas Akhir ini, syarat penurunan yang dipakai pada perencanaan pondasi *friction pile* adalah $1/300$ dimana L adalah jarak antar kolom.

V. PONDASI END BEARING PILE

A. Perencanaan Pondasi Tiang

Pondasi *end bearing pile* diasumsikan tidak ada penurunan pada tiang pancang ($\Delta \approx 0$). Pada input *SAP2000* pondasi ini diasumsikan sebagai perletakan rol. Dalam perencanaan ini digunakan tiang pancang *PC spun pile* dengan memenuhi syarat: nilai $Q_{ijin} > P_{max}$ [2]. Untuk batas jarak antar tiang adalah $2,5D - 3D$, dimana jarak antar tiang (s) yang dipakai adalah 1,5 m untuk diameter 0,6 m, untuk rekapannya dapat dilihat pada Tabel 3.

Cara mengetahui jumlah tiang pancang yang dibutuhkan pada satu kolom jika direncanakan syarat: $Q_{ijin} > P_{max}$. Kontrol beban maksimum yang bekerja pada satu kolom dihitung berdasarkan gaya aksial yang bekerja pada kolom tertentu dibagi dengan jumlah tiang.

B. Perencanaan Poer

Pada perencanaan pondasi *friction pile* menggunakan dimensi *poer* 3x3 dengan tebal dengan *poer* 500 mm, digunakan tulangan lentur arah X: D22-250 dengan jumlah tulangan 13 buah. Tulangan lentur arah Y: D22-270 dengan

jumlah tulangan 12 buah.

Sedangkan untuk perencanaan pondasi *end bearing pile* menggunakan dimensi *poer* 4x4 dengan tebal dengan *poer* 500 mm, digunakan tulangan lentur arah X: D22-250 dengan jumlah tulangan 17 buah. Tulangan lentur arah Y: D22-260 dengan jumlah tulangan 16 buah.

C. Perbandingan Biaya

Perhitungan rencana anggaran biaya pada Tugas Akhir ini, hanya sebatas biaya bahan yang dikeluarkan dari perhitungan pondasi tiang pancang (*spun pile*) dan tulangan *poer* (HSPK Surabaya 2018). Untuk estimasi biaya material perencanaan pondasi *friction pile* pada bangunan baerlantai 3, 4, dan 5 dapat dilihat pada Tabel 7.

Sedangkan untuk estimasi biaya material perencanaan pondasi *end bearing pile* pada bangunan baerlantai 3, 4, dan 5 dapat dilihat pada Tabel 8.

VI. KESIMPULAN/RINGKASAN

Dalam perencanaan Tugas Akhir ini dapat ditarik beberapa kesimpulan, di antaranya sebagai berikut: (1) Besar penurunan maksimum pondasi *friction pile* yang dapat terjadi pada jangka panjang (dalam jangka waktu 25 tahun) untuk masing-masing gedung bertingkat, dapat dilihat pada Tabel 9; (2) Penurunan yang terjadi pada pondasi *friction pile* relatif merata dimana selisih nilai penurunan antar kolom tidak melebihi $1/300$ (syarat penurunan *differential* yang diizinkan). Untuk selisih nilai antara Z_{max} dan Z_{min} juga tidak melebihi $1/300$; (3) Hasil perencanaan pondasi *friction pile* dan *end bearing pile*, dapat dilihat pada Tabel 10; (4) Biaya perencanaan pondasi yang lebih murah pada gedung tingkat 3 s/d 5 adalah perencanaan pondasi *friction pile* dengan metode *P-Z curve* daripada pondasi *end-bearing pile* dengan metode konvensional.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] E. Bowles, Joseph, *Sifat-Sifat Fisis dan Geoteknis Tanah (Mekanika Tanah)*, 2nd ed. Jakarta: Erlangga, 1984.
- [2] H. Wahyudi, *Daya Dukung Pondasi Dalam*, 1st ed. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember Press, 1999.
- [3] M. Das, Braja, *Principle of Geotechnical Engineering*, 5th ed. Canada: Thomson, 2006.
- [4] Asrurifak, "SNI 8460:2017 Tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik." Badan Standarisasi Nasional, Jakarta, 2017.
- [5] M. Das, Braja, *Mekanika Tanah I*, 1st ed. Jakarta, 1995.
- [6] Y. Yudiawati, "Penurunan Rangkak Tiang Pancang Lekatan Berdasarkan Data Lapangan dan Hasil Percobaan Tiang Tunggal dan Kelompok," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2007.
- [7] S. Devina, Reta, "Analisis Perbandingan Perencanaan Pondasi Tiang Pancang Menggunakan Metode Konvensional dan Metode P-Y Curve pada Lapisan Tanah Lunak yang Tebal: Studi Kasus Kota Banjarmasin dengan Kedalaman Tanah Keras 40 Meter," Institut Teknologi Sepuluh Nopember, 2015