

PREDIKSI PENURUNAN BANGUNAN TINGGI YANG BERLOKASI DI JAKARTA UTARA

Meli Susiyanti¹, Hendy Wijaya¹, dan Ali Iskandar^{1*}

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
ali.iskandar1999@gmail.com

Masuk: 07-10-2022, revisi: 06-05-2025, diterima untuk diterbitkan: 31-07-2025

ABSTRACT

Buildings can experience land subsidence caused by immediate settlement due to loading and consolidation. Land subsidence is a natural phenomenon and requires attention in areas around the coast or alluvial plains because the soil is very soft. Pile foundations are part of the construction that functions to transfer the load from the construction above to the hard soil layer that is very deep. This study discusses the settlement of the high-rise building studied located in the North Jakarta area. Data collection of soil, buildings and foundations was carried out and then analyzed using a 3D analysis program (finite difference method). The analysis was carried out to determine the amount of settlement that will occur and how long the settlement will continue. The settlement of the pile group foundation in this study was caused by elastic compression of the piles and consolidation settlement. The time required to reach 90% consolidation was 110961 days or 308 years from the beginning of the project period. The settlement that occurred when the building was completed was 1231.54 mm, during the 100-year project period was 2214.65 mm, and the largest settlement was when the soil was 90% consolidated at 2676.11 mm.

Keywords: Settlement; consolidation; soft soil; pile foundation; finite difference method

ABSTRAK

Bangunan dapat mengalami penurunan tanah yang disebabkan oleh penurunan segera akibat pembebanan dan konsolidasi. Penurunan tanah merupakan suatu fenomena alam dan perlu perhatian di daerah sekitar pantai atau dataran alluvial karena tanahnya sangat lunak. Fondasi tiang pancang merupakan bagian konstruksi yang berfungsi untuk mentransfer beban dari konstruksi di atasnya ke lapisan tanah keras yang letaknya sangat dalam. Penelitian ini membahas mengenai penurunan bangunan tinggi yang diteliti terletak di kawasan Jakarta Utara. Pengumpulan data tanah, bangunan dan fondasi dilakukan untuk kemudian dianalisis dengan bantuan program analisis 3D (metode beda hingga). Analisis dilakukan untuk mencari besarnya penurunan yang akan terjadi dan sampai kapan penurunan terus terjadi. Penurunan fondasi kelompok tiang dalam penelitian ini diakibatkan oleh kompresi elastis tiang dan penurunan konsolidasi. Waktu yang dibutuhkan untuk mencapai konsolidasi 90% adalah 110961 hari atau 308 tahun sejak awal masa proyek. Penurunan yang terjadi pada saat bangunan selesai adalah sebesar 1231,54 mm, pada saat masa proyek 100 tahun sebesar 2214,65 mm, dan penurunan terbesar yaitu pada saat tanah terkonsolidasi 90% sebesar 2676,11 mm.

Kata kunci: Penurunan; konsolidasi; tanah lunak; pondasi tiang pancang; metode beda hingga

1. PENDAHULUAN

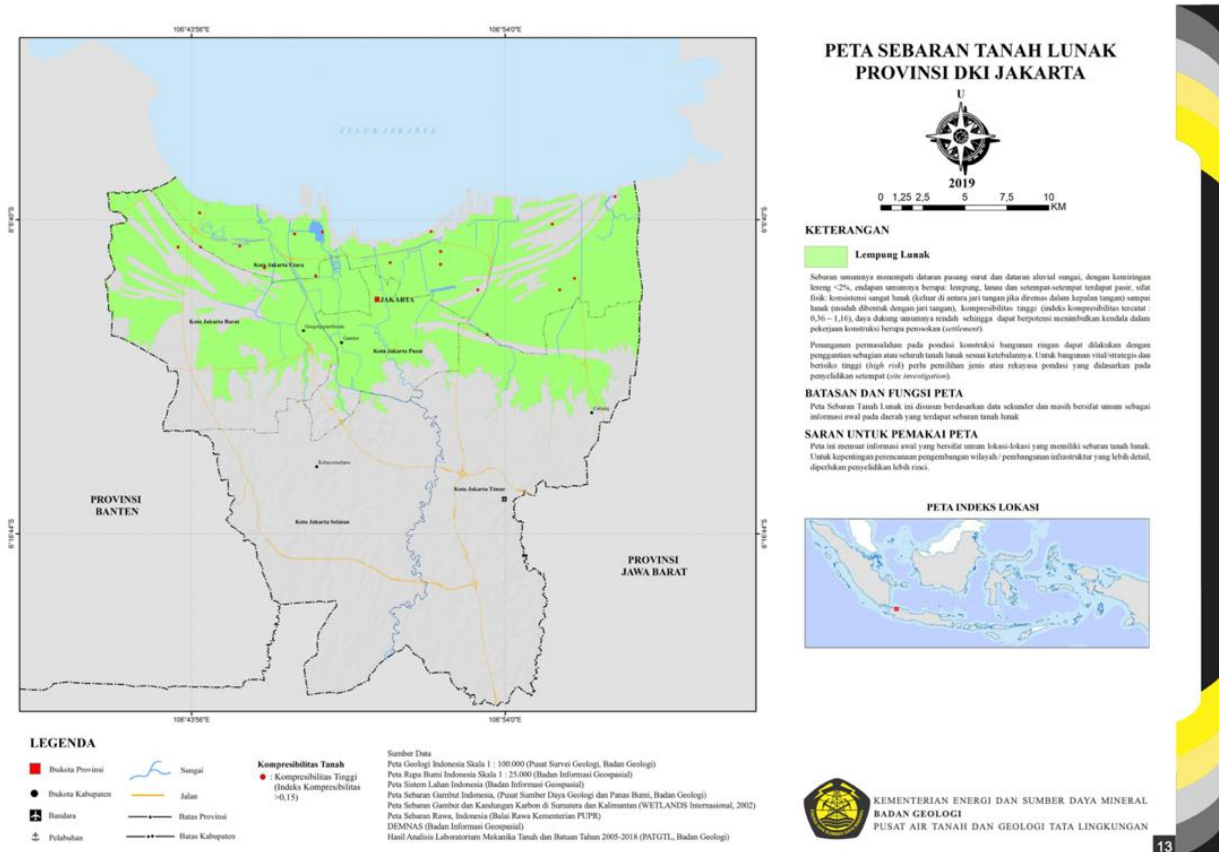
Indonesia adalah negara kepulauan terbesar di dunia. Indonesia memiliki lebih dari 17.000 pulau, di mana hanya sekitar 7.000 pulau yang berpenghuni. Kalimantan, Jawa, Sulawesi, Sumatera dan Papua merupakan pulau utama di Indonesia. Selain itu Indonesia juga memiliki pulau-pulau kecil seperti Bali, Karimun Jawa, Gili dan Lombok yang merupakan tujuan wisata lokal maupun internasional. Ibukota negara Indonesia adalah DKI Jakarta, yang terletak di Pulau Jawa (Pangastuti, 2022).

DKI Jakarta mengalami tekanan populasi dan perkembangan industri yang tinggi. Kondisi ini memicu peningkatan kebutuhan air tanah, yang dipenuhi melalui eksploitasi sumur bor secara masif (Hutabarat, 2017). Pengambilan air tanah yang berlebihan ini telah terbukti menjadi penyebab utama penurunan muka tanah di wilayah ini. Jakarta Pusat mengindikasikan adanya penurunan muka tanah berkisar antara 2 hingga 15 cm per tahun (Iskandar et al., 2025).

Permukaan tanah yang terus menurun (*land subsidence*) menjadi faktor utama yang akan mengancam kestabilan wilayah daratan DKI Jakarta, terutama di dekat kawasan perairan laut Teluk Jakarta. Ancaman tersebut, diprediksi bisa menenggelamkan sejumlah wilayah di Jakarta Utara. Ancaman lain yang juga muncul, adalah kenaikan permukaan air laut (*sea level rise*) yang juga diprediksi akan ikut berperan dalam proses tersebut. Keduanya diprediksi

akan berperan menenggelamkan pesisir Jakarta yang mencapai puncaknya pada 2050 mendatang (Biro Komunikasi Publik, Umum dan Kesekretariatan, 2021).

Jakarta Utara merupakan bagian dari DKI Jakarta dengan persebaran tanah lunak terbesar seperti yang terlihat pada Gambar 1 yang wilayahnya mudah mengalami penurunan muka tanah dikarenakan daerahnya merupakan pesisir dan juga dipengaruhi oleh kondisi muka air tanah serta pengaruh konsolidasi. Seiring berjalannya waktu, kebanyakan bangunan tinggi yang terletak di Jakarta Utara mengalami penurunan yang cukup pesat. Penelitian ini dilakukan untuk memprediksi waktu berakhirnya penurunan salah satu bangunan tinggi yang dibangun di atas tanah yang cenderung berjenis pasir di daerah utara Jakarta.



Gambar 1. Peta sebaran tanah lunak Provinsi DKI Jakarta (Badan Geologi, 2019)

Tujuan penelitian ini adalah untuk menganalisis besar penurunan tanah dan memprediksi waktu berakhirnya penurunan tanah pada salah satu bangunan tinggi di Jakarta Utara.

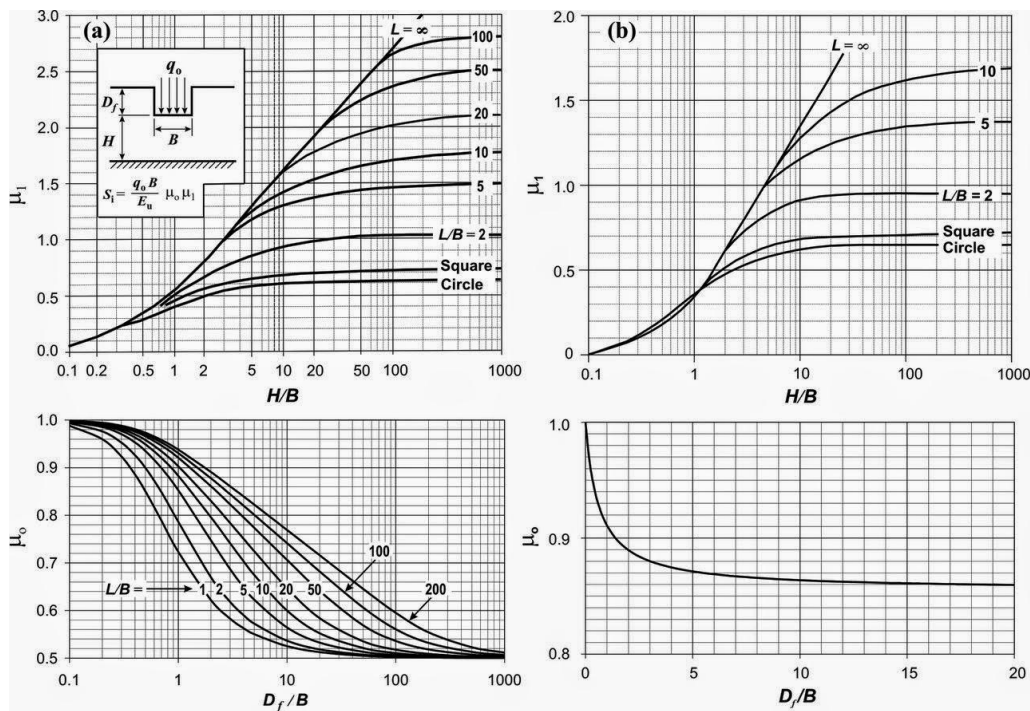
Penurunan tanah

Penurunan muka tanah (*land subsidence*) merupakan suatu proses gerakan penurunan muka tanah yang didasarkan atas suatu datum tertentu (kerangka referensi geodesi) dimana terdapat berbagai macam variabel penyebabnya (Marfai, 2006). Penurunan muka tanah ini di akibatkan oleh banyak hal seperti pembebanan di atas permukaan, hilangnya air tanah akibat eksploitasi berlebihan, gempa yang mengakibatkan rusaknya struktur tanah, ketidakstabilan bidang tanah akibat proses tertentu, dan sebagainya. Penurunan muka tanah ini secara tidak langsung pemaksaan memadatkan struktur tanah yang belum padat menjadi padat. Umumnya terjadi pada daerah yang tadinya berupa rawa, delta, endapan banjir dan sebagainya yang di alihkan fungsi tataguna lahannya tanpa melakukan rekayasa tanah terlebih dahulu.

Penurunan elastis dapat diperoleh dengan Persamaan 1.

$$Se = \frac{\mu_o \cdot \mu_1 \cdot Bg \cdot \sigma}{Eu} \tag{1}$$

dengan B_g = lebar blok tiang, σ = tegangan tiang, E_u = modulus elastisitas tanah *undrained*, μ_0 = faktor koreksi untuk kedalaman tiang D , μ_1 = faktor koreksi untuk lapisan tanah dengan tebal terbatas H . Faktor koreksi μ_0 dan μ_1 diperoleh dari grafik pada Gambar 2.



Gambar 2. Faktor koreksi μ_0 dan μ_1 (Janbu et al., 1956)

Penurunan konsolidasi dapat diperoleh dengan Persamaan 2-4 (Das, 2016).

A. Normal consolidation

Bila $p_c = p_o'$ atau $\frac{p_c}{p_o'} = 1$

$$S_c = \frac{C_c}{1 + e_o} Hc \log \frac{p_o' + \Delta p}{p_o'} \quad (2)$$

B. Over-consolidation

Bila $p_o' + \Delta p \leq p_c$

$$S_c = \frac{C_s}{1 + e_o} Hc \log \frac{p_o' + \Delta p}{p_o'} \quad (3)$$

Bila $p_o' + \Delta p > p_c$

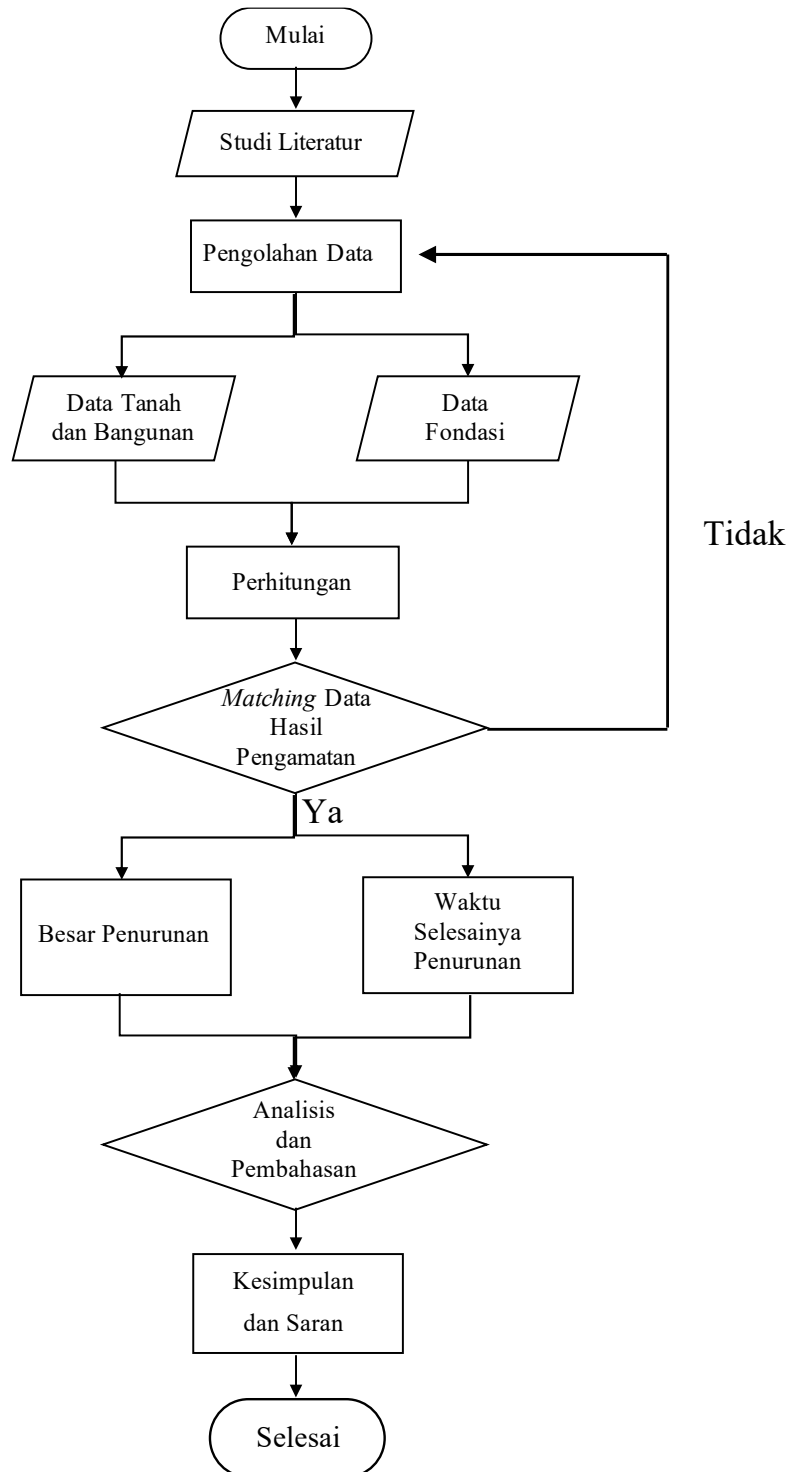
$$S_c = \frac{C_s}{1 + e_o} Hc \log \frac{p_o' + \Delta p}{p_o'} + \frac{C_c}{1 + e_o} Hc \log \frac{p_o' + \Delta p}{p_o'} \quad (4)$$

dengan e_o = angka pori awal yang didapat dari indeks test, C_c = indeks kompresi, didapat dari percobaan konsolidasi, C_s = indeks *swelling*, didapat dari percobaan konsolidasi, p_c = tegangan prakonsolidasi, didapat dari percobaan konsolidasi (ton/m²), p_o = tegangan *overburden* efektif awal (ton/m²), Δp = besarnya tegangan di muka tanah (*surchage*) (ton/m²).

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini dilakukan dalam beberapa tahapan seperti yang terlihat di Gambar 3. Pada tahap awal dimulai dengan menentukan topik yang akan dianalisis. Pada tahap kedua dilakukan pengumpulan tinjauan pustaka dan studi literatur terkait topik yang akan dianalisis. Pada tahap ketiga dilakukan analisis pada parameter data tanah seperti jenis tanah, penurunan tanah, penurunan bangunan, konsolidasi tanah, fondasi, dan daya dukung. Pada tahap keempat dilakukan olah data. Pada tahap kelima dilakukan perhitungan besar penurunan yang akan terjadi dan prediksi waktu selesai

penurunan dengan bantuan program. Pada tahap keenam dilakukan perbandingan dengan data hasil pengamatan, apabila belum *match* dilakukan pemeriksaan kembali terhadap parameter data. Pada tahap ketujuh apabila sudah *match* maka hasil perhitungan yang diperoleh valid dan dibahas hasil analisisnya. Pada tahap terakhir ditarik kesimpulan berdasarkan hasil analisis dan hasil perbandingan yang diperoleh.

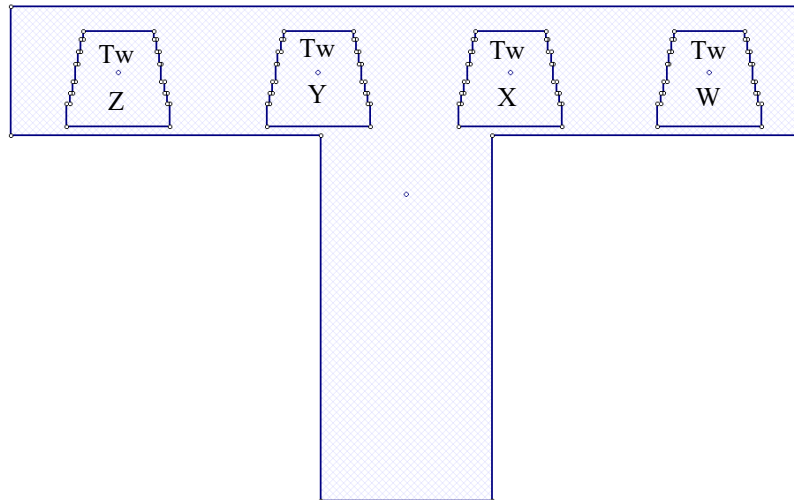


Gambar 3. Diagram alir penelitian

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proyek bangunan tinggi ini berlokasi di Jakarta utara. Dalam data proyek tidak terdapat informasi mengenai luas bangunan yang diteliti maka perkiraan luas bangunan diukur melalui *Google Earth Pro*. Berdasarkan *Google Earth*

Pro luas masing-masing tower adalah $\pm 1250 \text{ m}^2$, luas *shopping mall* adalah $\pm 27500 \text{ m}^2$, dan sketsa denah pada Gambar 4. Berdasarkan data tanah, proyek ini memiliki 7 buah titik bor dengan kedalaman 45 m dan 1 titik verifikasi dengan kedalaman 35 m. Ujung tiang pancang terletak pada kedalaman 22 m. Muka air tanah terletak pada kedalaman 1 m di bawah permukaan tanah. Berdasarkan data tanah proyek diolah dan dirata-ratakan sehingga diperoleh *summary* parameter tanah seperti yang ditampilkan pada Tabel 1 dan Tabel 2.



Gambar 4. Sketsa denah tower secara 2 dimensi

Tabel 1. *Summary* parameter tanah

Elevation (m)	Type Of Soil	Consistency	N-SPT	γ_{sat} (kN/m ³)	γ_{wet} (kN/m ³)	Su (kPa)	ϕ (°)	E (MPa)	Poisson Ratio (ν')
1-6	Silty Clay	Very Soft	1	16	15	5	-	5	0,4
6-13	Silty Clay	Very Soft	4	16	15	14	-	10	0,39
13-18	Sandy Silt/ Silty Clay	Medium to Hard	30	19	18	117	-	56	0,28
18-24	Cemented Sand	Very Dense	48	19	18	-	45	78	0,35
24-29	Cemented Sand	Very Dense	43	19	18	-	45	76	0,34
29-37	Silty Clay	Stiff to Hard	19	19	18	105	-	45	0,28
37-45	Silty Clay	Stiff to Hard	27	20	19	149	-	67	0,23

Tabel 2. *Summary* parameter tanah (lanjutan)

e_o	LL* (%)	PL* (%)	PI (%)	W* (%)	C_c^*	C_s^*	C_v	OCR*	c' (kPa)	E (Mpa)	P_c (kPa)
0,71	40	25	15	50	0,51	0,07	0,98	8,07	1	2	39
0,85	43	25	17	45	0,66	0,09	0,63	3,10	4	3	149
0,72	71	32	38	40	0,52	0,07	0,87	2,25	21	11	937
-	34	22	12	-	-	-	-	-	34	16	1501
-	106	41	65	-	-	-	0,70	-	31	15	1236
0,69	109	41	67	55	0,48	0,07	0,86	1,03	14	8	453
0,76	126	45	81	60	0,56	0,08	0,50	1,00	20	10	640

Daya dukung tiang pancang berdasarkan data proyek adalah sebesar 125 ton/ tiang, dengan ujung tiang pancang berbentuk persegi (50x50 cm). Beban yang bekerja adalah $P = 1 \text{ t/m}^2$, 1250 m^2 , dan 48 lantai = 60000 ton.

Asumsi awal $E_g = 0,6$

$$\text{Jumlah tiang } n = \frac{P}{E_g \cdot Q_{all}} = \frac{60000}{0,6 \times 125} = 800 \text{ tiang}$$

Asumsi $m = 32$ tiang, $n = 25$ tiang (persegi panjang)

Jarak antar tiang $S = 3D = 3 \times 0,5 = 1,5 \text{ m}$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{D}{S} \right) = 18,4213^\circ$$

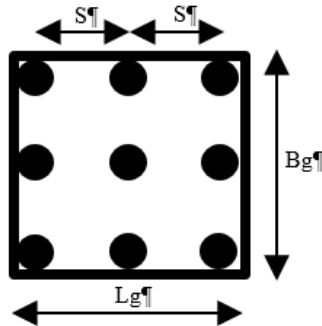
Efisiensi grup tiang dihitung dengan rumus menurut Converse-Labarre (Bowles, 1984):

$$E_g = 1 - \theta \frac{(n-1)m + (m-1)n}{90.m.n} = 1 - \theta \frac{(25-1)32 + (32-1)25}{90.32.25} = 0,5973$$

Ukuran kelompok tiang (Gambar 4) dapat dihitung:

$$B_g = (n-1)S + D = (25-1)1,5 + 0,5 = 36,5 \text{ m}$$

$$L_g = (m-1)S + D = (32-1)1,5 + 0,5 = 47 \text{ m}$$



Gambar 4 Penampang Kelompok tiang

Tegangan tiang diperoleh dengan (Das, 2016):

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{M_x.B_g}{2.I_x} \pm \frac{M_y.L_g}{2.I_y} = \frac{1}{B_g.L_g} \left(P \pm \frac{6M_x}{B_g} \pm \frac{6M_y}{L_g} \right)$$

$$\sigma_{max} = 40,9753 \text{ ton/m}^2$$

$$\sigma_{min} = 28,9751 \text{ ton/m}^2$$

$$Q_{max} = \sigma_{max}.B_g.L_g = 86120,9302 \text{ ton}$$

Daya dukung kelompok tiang diperoleh dengan (Das, 2016):

$$Q_{a,g} = E_g.m.n.Q_{all} = 59730 \text{ ton}$$

Penurunan elastis diperoleh dengan (Das, 2016):

$$S_e = \frac{\mu_0.\mu_1.B_g.\sigma}{E_u}$$

$$(D = 19-45 \text{ m}) D = 19 \text{ m}; E_u = 1000 \text{ ton/m}^2; H = 46,375 \text{ m}$$

$$B_g = 36,5 + 19/2 = 46 \text{ m}$$

$$L_g = 47 + 19/2 = 56,5 \text{ m}$$

$$D/B_g = 0,413$$

$$H/B_g = 1,0081$$

$$\mu_0 = 0,885$$

$$\mu_1 = 0,45$$

$$\sigma = 48 \text{ ton/m}^2$$

$$S_e = 879,336 \text{ mm}$$

Penurunan konsolidasi diperoleh dengan (Das, 2016):

Bila $p_o' + \Delta p \leq p_c$, maka:

$$S_c = \frac{C_s}{1+e_o} H c \log \frac{p_o' + \Delta p}{p_o'}$$

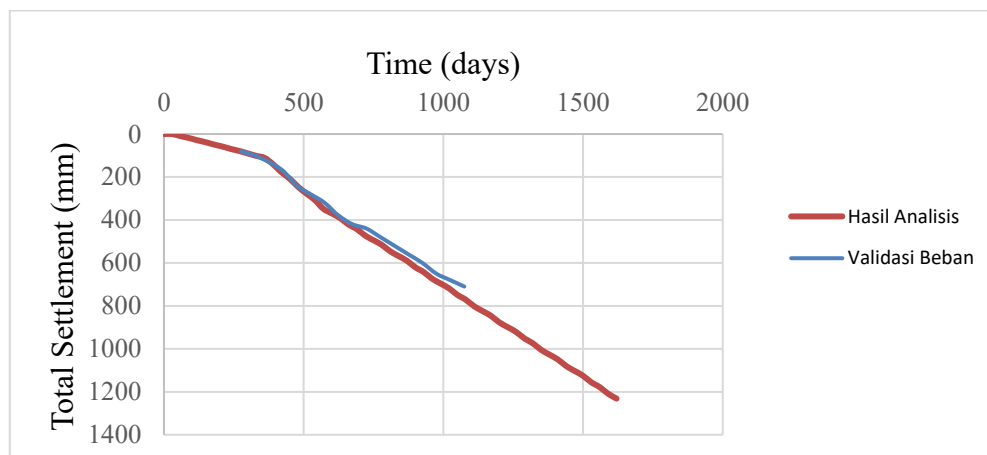
Bila $p_o' + \Delta p > p_c$, maka:

$$S_c = \frac{C_s}{1+e_0} Hc \log \frac{p_o' + \Delta p}{p_o'} + \frac{C_c}{1+e_0} Hc \log \frac{p_o' + \Delta p}{p_o'}$$

1. Lapisan 1 (D = 19-24 m)
 $H = 38,5$ m ; $D = 19$ m; $Po' = 40,1$ ton/m²; $\gamma' = 1,9$ ton/m³; $Cs = 0,07$; $e_0 = 0,41$; $Pc = 150,1$ ton/m².
 $Bg = Bg + H/2 = 39$ m
 $Lg = Lg + H/2 = 49,5$ m
 $Po' = Po + \gamma'(H/2) = 44,85$ ton/m²
 $\sigma = \frac{P}{Bg.Lg} = 31,08$ ton/m²
 $Po' + \sigma = 75,93$ ton/m²
 $Sc = 437,0318$ mm
2. Lapisan 2 (D = 24-29 m)
 $H = 39,75$ m ; $D = 24$ m; $Po' = 49,6$ ton/m²; $\gamma' = 1,9$ ton/m³; $Cs = 0,07$; $e_0 = 0,42$; $Pc = 123,6$ ton/m².
 $Bg = Bg + H/2 = 41,5$ m
 $Lg = Lg + H/2 = 52$ m
 $Po' = Po + \gamma'(H/2) = 54,35$ ton/m²
 $\sigma = \frac{P}{Bg.Lg} = 27,8035$ ton/m²
 $Po' + \sigma = 82,1535$ ton/m²
 $Sc = 351,5878$ mm
3. Lapisan 3 (D = 29-37 m)
 $H = 41,75$ m ; $D = 29$ m; $Po' = 64,8$ ton/m²; $\gamma' = 1,9$ ton/m³; $Cs = 0,07$; $e_0 = 0,57$; $Pc = 45,3$ ton/m².
 $Bg = Bg + H/2 = 45,5$ m
 $Lg = Lg + H/2 = 56$ m
 $Po' = Po + \gamma'(H/2) = 72,4$ ton/m²
 $\sigma = \frac{P}{Bg.Lg} = 23,5479$ ton/m²
 $Po' + \sigma = 95,9479$ ton/m² > Pc
 $Sc = 1788,688$ mm
4. Lapisan 4 (D = 37-45 m)
 $H = 43,75$ m ; $D = 37$ m; $Po' = 80,8$ ton/m²; $\gamma' = 2$ ton/m³; $Cs = 0,08$; $e_0 = 0,54$; $Pc = 64$ ton/m².
 $Bg = Bg + H/2 = 49,5$ m
 $Lg = Lg + H/2 = 60$ m
 $Po' = Po + \gamma'(H/2) = 88,88$ ton/m²
 $\sigma = \frac{P}{Bg.Lg} = 20,202$ ton/m²
 $Po' + \sigma = 109,002$ ton/m² > Pc
 $Sc = 1618,574$ mm

Maka diperoleh penurunan total sebesar $St = Se + Sc = 879,336 + 1788,688 = 2668,024$ mm.

Berdasarkan Gambar 5 dapat dilihat bahwa data hasil analisis dan data validasi beban hampir *match*. Oleh karena itu *Tower X* dipilih sebagai referensi karena hasil *matching*-nya mendekati data validasi beban.



Gambar 4 Time vs. total settlement tower X

Data hasil analisis dapat dilihat pada Tabel 3-6. Waktu yang dilampirkan hanya waktu-waktu perwakilan saja dan waktu yang diamati untuk memperkecil ukuran tabel. Pada waktu 1620 hari merupakan waktu dimana bangunan telah selesai, sedangkan pada waktu 3600, 10800, 18000, 36000 hari merupakan waktu prediksi, dan 110961 hari adalah waktu pada saat konsolidasi telah mencapai 90%.

Tabel 3. Hasil analisis tower Z

Waktu (Hari)	Penurunan Konsolidasi (mm)	Penurunan Elastis (mm)	Penurunan Total (mm)	Derajat Konsolidasi (%)
0	0	0	0	0
150	1,7156	35,9583	37,6739	2,01714
330	8,43561	91,5302	99,9659	3,39794
510	32,0267	242,458	274,485	5,10245
690	65,8155	373,593	439,408	7,23287
870	100,298	486,748	587,046	8,90005
1050	137,346	607,986	745,332	10,2552
1230	174,124	721,141	895,265	11,4424
1410	211,684	834,297	1045,98	12,516
1590	249,888	955,535	1205,42	13,4303
1620	256,163	971,7	1227,86	13,6088
3600	469,197	971,7	1440,9	24,9264
10800	818,314	971,7	1790,01	43,4734
18000	980,499	971,7	1952,2	52,0895
36000	1236,87	971,7	2208,57	65,7096
110961	1698,79	971,7	2670,49	90,249

Tabel 4. Hasil analisis tower Y

Waktu (Hari)	Penurunan Konsolidasi (mm)	Penurunan Elastis (mm)	Penurunan Total (mm)	Derajat Konsolidasi (%)
0	0	0	0	0
150	1,72722	36,6601	38,3873	1,96478
330	8,4735	93,3166	101,79	3,32163
510	32,1396	245,405	277,544	5,0413
690	65,9649	377,015	442,98	7,16772
870	100,473	490,296	590,769	8,83759
1050	137,53	611,668	749,198	10,1961
1230	174,315	724,949	899,264	11,3856
1410	211,882	838,23	1050,11	12,4614
1590	250,09	959,602	1209,69	13,3782
1620	256,37	975,785	1232,15	13,5569
3600	469,696	975,785	1445,48	24,8376
10800	819,98	975,785	1795,77	43,3607
18000	983,407	975,785	1959,19	52,0027
36000	1240,18	975,785	2215,97	65,581
110961	1701,98	975,785	2677,77	90,0011

Tabel 5. Hasil analisis pada tower X

Waktu (Hari)	Penurunan Konsolidasi (mm)	Penurunan Elastis (mm)	Penurunan Total (mm)	Derajat Konsolidasi (%)
0	0	0	0	0
150	1,72446	36,5297	38,2542	1,97351
330	8,46418	92,9848	101,449	3,3345
510	32,1134	244,88	276,993	5,05097
690	65,931	376,428	442,359	7,17774
870	100,433	489,711	590,145	8,84668
1050	137,489	611,087	748,575	10,2043
1230	174,273	724,37	898,643	11,3931
1410	211,837	837,654	1049,49	12,4682

Tabel 6 (lanjutan). Hasil analisis pada tower X

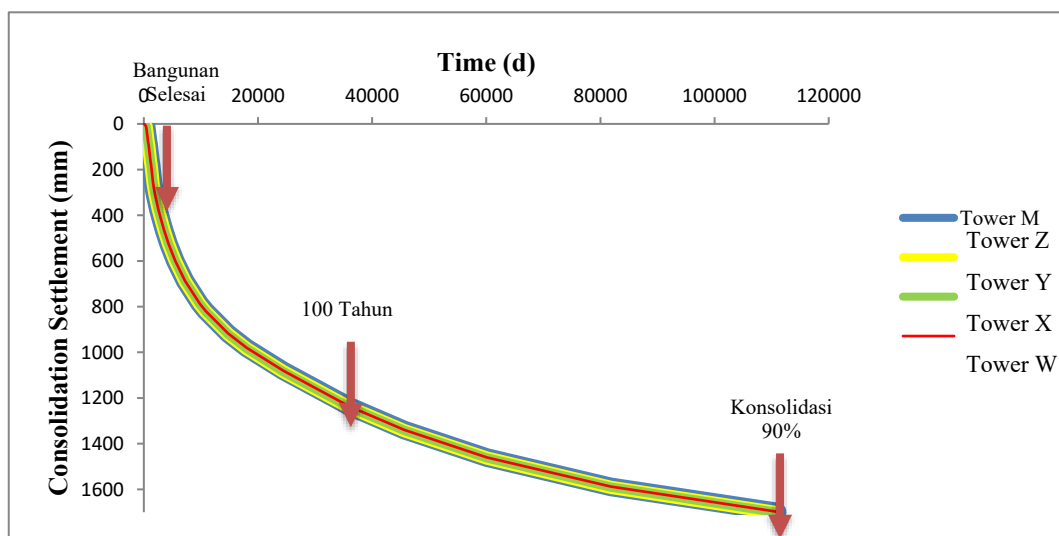
Waktu (Hari)	Penurunan Konsolidasi (mm)	Penurunan Elastis (mm)	Penurunan Total (mm)	Derajat Konsolidasi (%)
1590	250,045	959,029	1209,07	13,3844
1620	256,324	975,212	1231,54	13,5631
3600	469,602	975,212	1444,81	24,8484
10800	819,775	975,212	1794,99	43,3774
18000	983,072	975,212	1958,28	52,018
36000	1239,44	975,212	2214,65	65,5836
110961	1700,9	975,212	2676,11	90,0011

Tabel 7. Hasil analisis tower W

Waktu (Hari)	Penurunan Konsolidasi (mm)	Penurunan Elastis (mm)	Penurunan Total (mm)	Derajat Konsolidasi (%)
0	0	0	0	0
150	1,71387	35,851	37,5649	2,02553
330	8,43	91,2571	99,6871	3,41009
510	32,0103	242,026	274,037	5,11162
690	65,7941	373,11	438,904	7,24217
870	100,274	486,268	586,542	8,90853
1050	137,321	607,509	744,83	10,2628
1230	174,098	720,667	894,766	11,4494
1410	211,658	833,826	1045,48	12,5225
1590	249,862	955,066	1204,93	13,4362
1620	256,137	971,232	1227,37	13,6146
3600	469,147	971,232	1440,38	24,9369
10800	818,187	971,232	1789,42	43,4897
18000	980,259	971,232	1951,49	52,1044
36000	1236,26	971,232	2207,49	65,7117
110961	1697,89	971,232	2669,12	90,249

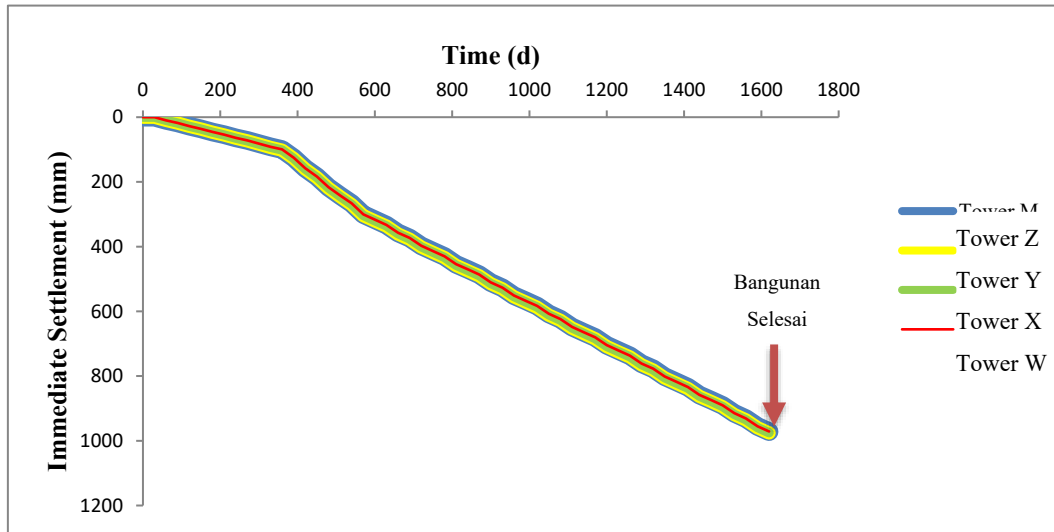
Berdasarkan hasil analisis, diperoleh t_{90} (waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi sebesar 90%) adalah 110961 hari atau ± 308 tahun maka ditambahkan 1 *stage* dengan waktu t_{90} untuk memperoleh hasil analisis ketika tanah telah terkonsolidasi 90%.

Berdasarkan Gambar 6 dapat dilihat bahwa besar penurunan konsolidasi pada saat bangunan selesai adalah sebesar ± 200 mm, pada saat masa proyek 100 tahun sebesar ± 1200 mm, dan yang terbesar adalah pada saat tanah terkonsolidasi 90% adalah sebesar ± 1600 mm.



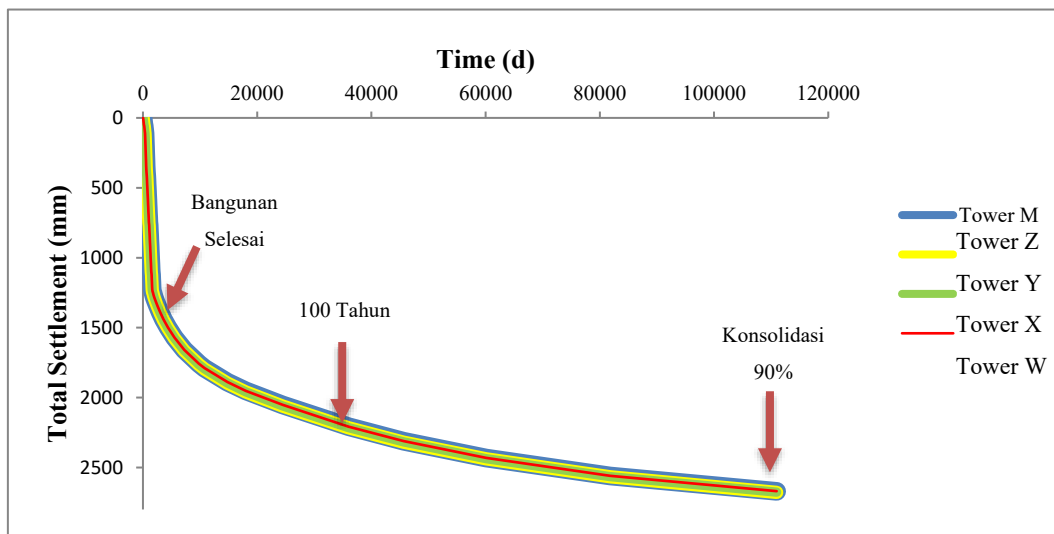
Gambar 5. Grafik *time vs. consolidation settlement*

Berdasarkan Gambar 7 dapat dilihat bahwa penurunan elastis pada saat bangunan selesai adalah ± 1000 mm.



Gambar 6. Grafik *time vs. immediate settlement*

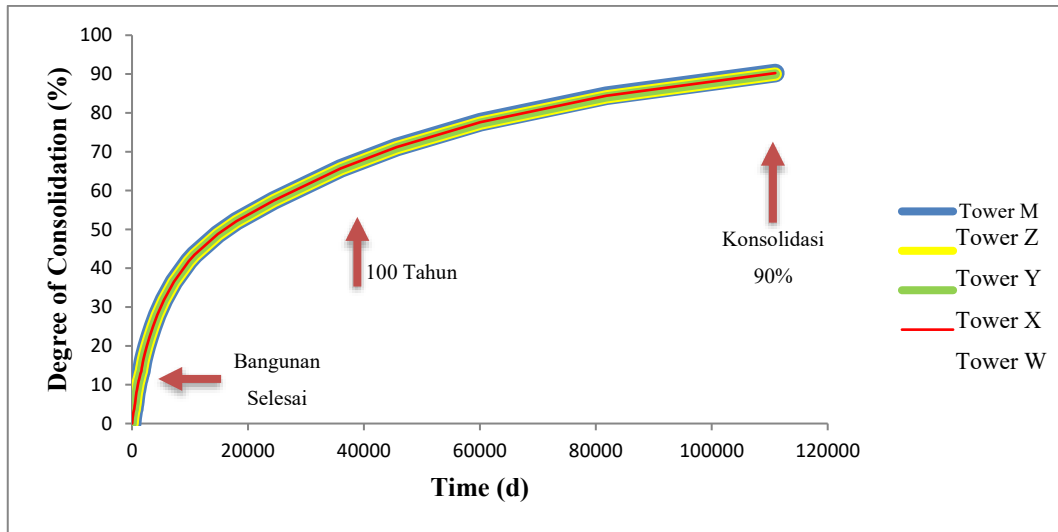
Berdasarkan Gambar 8 dapat dilihat bahwa penurunan total yang terjadi pada saat bangunan selesai sebesar ± 1200 mm, pada saat masa proyek 100 tahun sebesar ± 2200 mm, dan yang terbesar adalah pada saat tanah terkonsolidasi 90% sebesar ± 2600 mm.



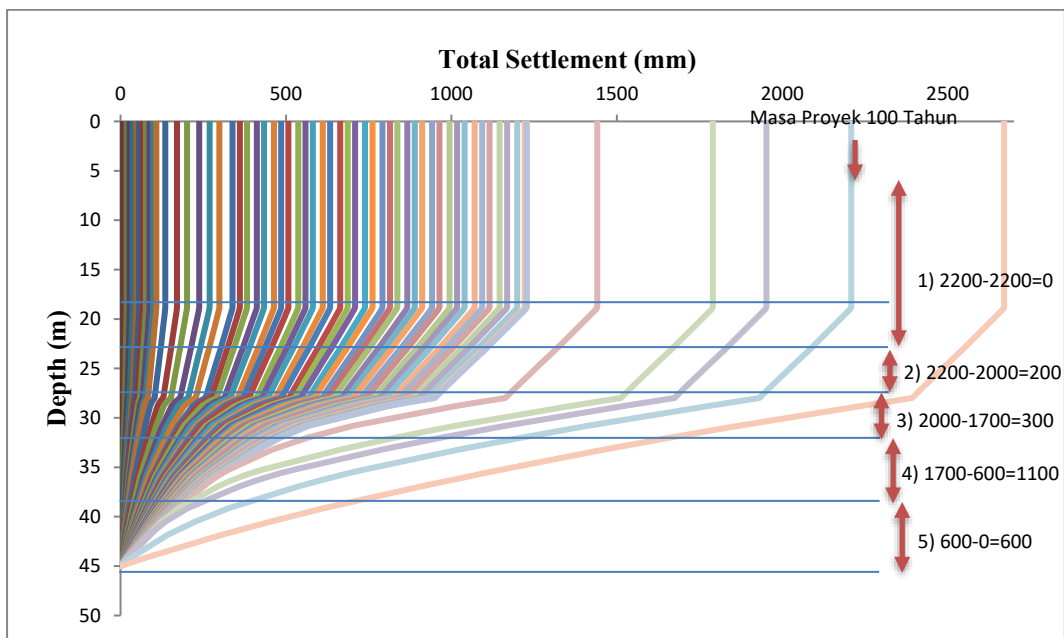
Gambar 7. Grafik *time vs. total settlement*

Berdasarkan Gambar 9 dapat dilihat bahwa pada saat bangunan selesai tanah baru terkonsolidasi sebesar $\pm 15\%$ dan pada saat masa proyek 100 tahun telah terkonsolidasi sebesar $\pm 65\%$.

Berdasarkan Gambar 10 diambil contoh grafik biru yaitu pada saat masa proyek 100 tahun. Selisih pada setiap lapisan diperhitungkan seperti pada grafik yang ditandai 1), 2), 3), 4), dan 5) untuk mendapatkan penurunan tiap lapisan. Lapisan pertama (0-13 m) dan lapisan kedua (13-18 m) yang ditandai 1) pada grafik belum mengalami penurunan, lapisan ketiga (18-24 m) yang ditandai 2) pada grafik mengalami penurunan sebesar ± 200 mm, lapisan keempat (24-29 m) yang ditandai 3) pada grafik mengalami penurunan sebesar ± 300 mm, lapisan kelima (29-37 m) yang ditandai 4) pada grafik mengalami penurunan sebesar ± 1100 mm, lapisan keenam (37-45 m) yang ditandai 5) pada grafik mengalami penurunan sebesar ± 600 mm, kemudian jika dijumlahkan secara akumulatif diperoleh penurunan pada masa proyek 100 tahun sebesar ± 2200 mm.



Gambar 8. Grafik *time vs. degree of consolidation*



Gambar 9. Grafik *total settlement vs. depth tower Z*

Berdasarkan Gambar 10 dari kanan ke kiri, garis paling kanan berwarna oranye adalah pada saat t_{90} , garis biru adalah pada saat masa proyek 100 tahun, garis ungu adalah pada saat masa proyek 50 tahun, garis hijau adalah pada saat masa proyek 30 tahun, garis merah adalah pada saat masa proyek 10 tahun, grafik biru tua adalah pada saat bangunan selesai dan grafik lainnya merupakan tahapan pembebanan per 30 hari.

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Lapisan tanah pada proyek ini cenderung lunak dengan tebal lapisan tanah berkonsistensi *very soft* pada kedalaman 0-13 meter sehingga proyek bangunan tinggi ini cenderung mengalami penurunan.
2. Berdasarkan hasil perhitungan penurunan maksimum yang terjadi pada kelompok tiang adalah sebesar 2668,024 mm.
3. Berdasarkan hasil analisis program, waktu yang dibutuhkan untuk mencapai konsolidasi 90% adalah 110961 hari atau ± 308 tahun sejak awal masa proyek. Pada waktu t_{90} , penulis menganggap bahwa penurunan telah selesai, walaupun setelah t_{90} masih akan terjadi penurunan dengan nilai yang sangat kecil.

4. Berdasarkan hasil analisis program penurunan yang terjadi di *Tower X* (*tower* referensi) pada saat bangunan selesai adalah sebesar 1231,54 mm, pada saat masa proyek 100 tahun sebesar 2214,65 mm, dan penurunan terbesar yaitu pada saat tanah terkonsolidasi 90% sebesar 2676,11 mm.
5. Berdasarkan hasil *matching* data validasi beban dengan data hasil analisis, pada *Tower X* menghasilkan *matching* yang paling mendekati, pada *Tower Y* hasil *matching* tidak terlalu mirip tetapi lebih mendekati jika dibandingkan dengan *Tower W* dan *Tower Z*. Penulis menyimpulkan dan menduga bahwa konsolidasi yang terjadi pada tanah sekitar *Tower W* dan *Tower Z* lebih kecil dibandingkan dengan tanah disekitar *Tower Y* terutama jika dibandingkan dengan *Tower X*.
6. Berdasarkan grafik hubungan antara waktu dengan penurunan total dapat disimpulkan bahwa terjadi penurunan yang cukup drastis pada waktu 390 hari yaitu pada saat tahap pembebanan lantai *tower* dimulai bersamaan dengan beban podium yang telah dimulai sejak masa awal proyek.

Berdasarkan kesimpulan di atas, adapun saran demi perbaikan hasil penelitian ini lebih lanjut, yaitu:

1. Mendapatkan parameter-parameter tanah yang diperlukan lebih lengkap, akurat dan valid supaya mendapatkan hasil analisis yang akurat.
2. Mendapatkan spesifikasi detail bangunan agar pemodelan bangunan dan analisis perhitungan yang dilakukan lebih akurat.
3. Perbaikan tanah sangat diperlukan sebelum memulai sebuah proyek terutama proyek yang berlokasi di tanah yang cenderung lunak ditambah lagi dengan beban pikul yang besar.

DAFTAR PUSTAKA

- Biro Komunikasi Publik, Umum dan Kesekretariatan. (2021, 5 Oktober). *Memproyeksi dampak perubahan iklim dan penurunan permukaan tanah di Pesisir Pantura*. Badan Riset dan Inovasi Nasional
- Bowles, J. E. (1984). *Foundation analysis and design* (Jilid II; P. Silaban, Penerj.). Erlangga.
- Das, B. M. (2016). *Principles of Foundation Engineering* (8th ed.). Cengage Learning.
- Hutabarat, L. E. (2017). Study of land subsidence due to excessive groundwater extraction in DKI Jakarta. *Kumpulan karya ilmiah dosen Universitas Kristen Indonesia Delapan Windu*, 360-374.
- Iskandar, A., Makarim, C. A., & Chandra, T. K. (2025). Studi kasus penurunan muka tanah dan muka air tanah di Jakarta Pusat tahun 2010-2022. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil*, 8(2), 549-558. <https://doi.org/10.24912/jmts.v8i2.21979>
- Badan Geologi. (2019). *Atlas: Sebaran tanah lunak Indonesia*. Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral.
- Janbu, N., Bjerrum, L., & Kjaernsli, B. (1956). *Soil mechanics applied to some engineering problems*. Norwegian Geotechnical Institute.
- Marfai, M. A. (2006). *Land subsidence in coastal cities: Causes, impacts, and mitigation strategies*. Gadjah Mada University Press.
- Pangastuti, D. (2022). *Penegasan Status Pulau Indonesia*. Badan Informasi Geospasial. <https://sipulau.big.go.id/news/5>