

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

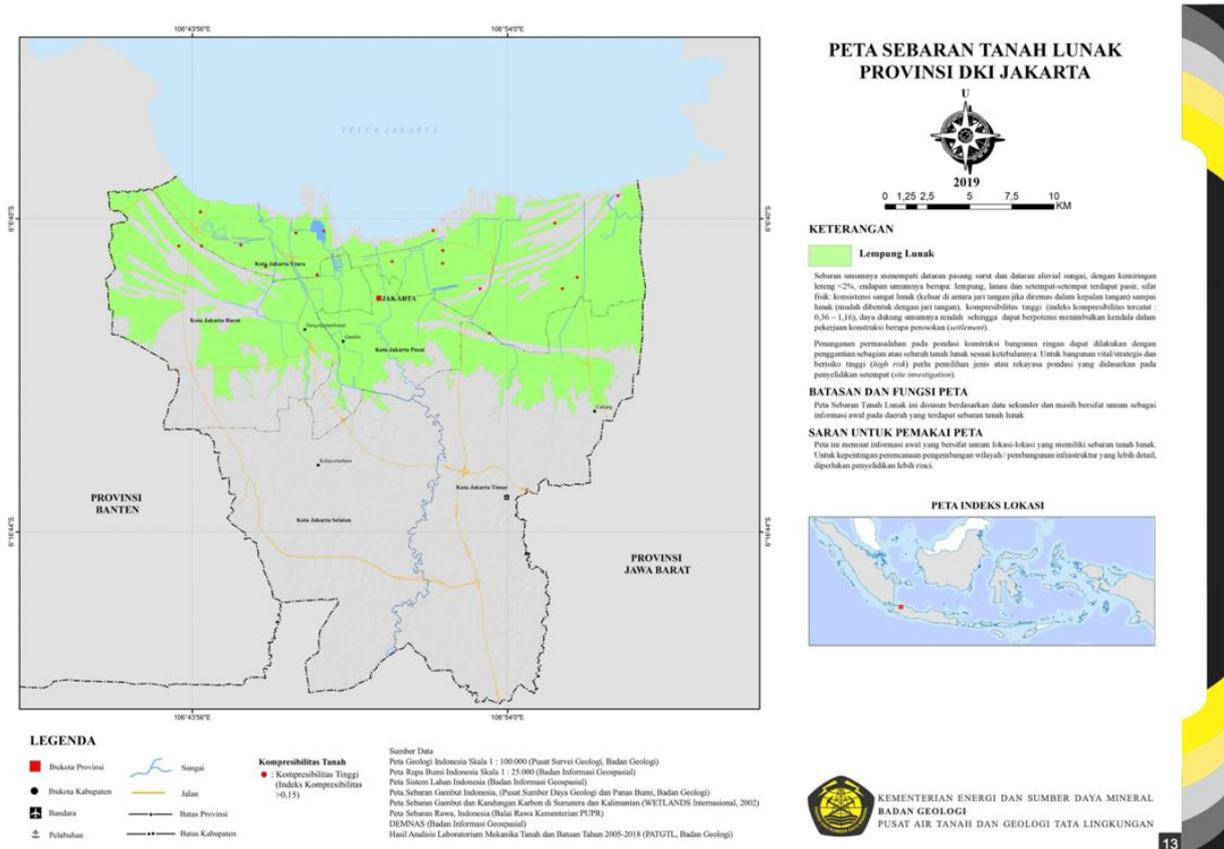
Indonesia adalah negara kepulauan terbesar di dunia. Indonesia memiliki lebih dari 17.000 pulau, di mana hanya sekitar 7.000 pulau yang berpenghuni. Kalimantan, Jawa, Sulawesi, Sumatera dan Papua merupakan pulau utama di Indonesia. Selain itu Indonesia juga memiliki pulau-pulau kecil seperti Bali, Karimun 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.

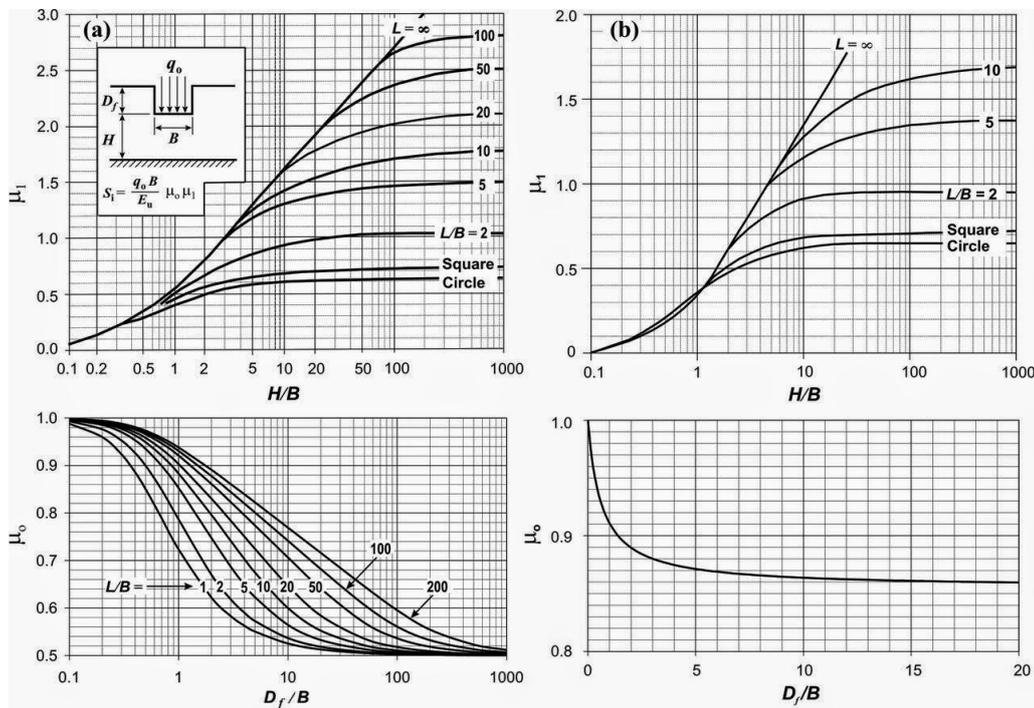
Penurunan tanah

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 $p_o' + \Delta p > p_c$

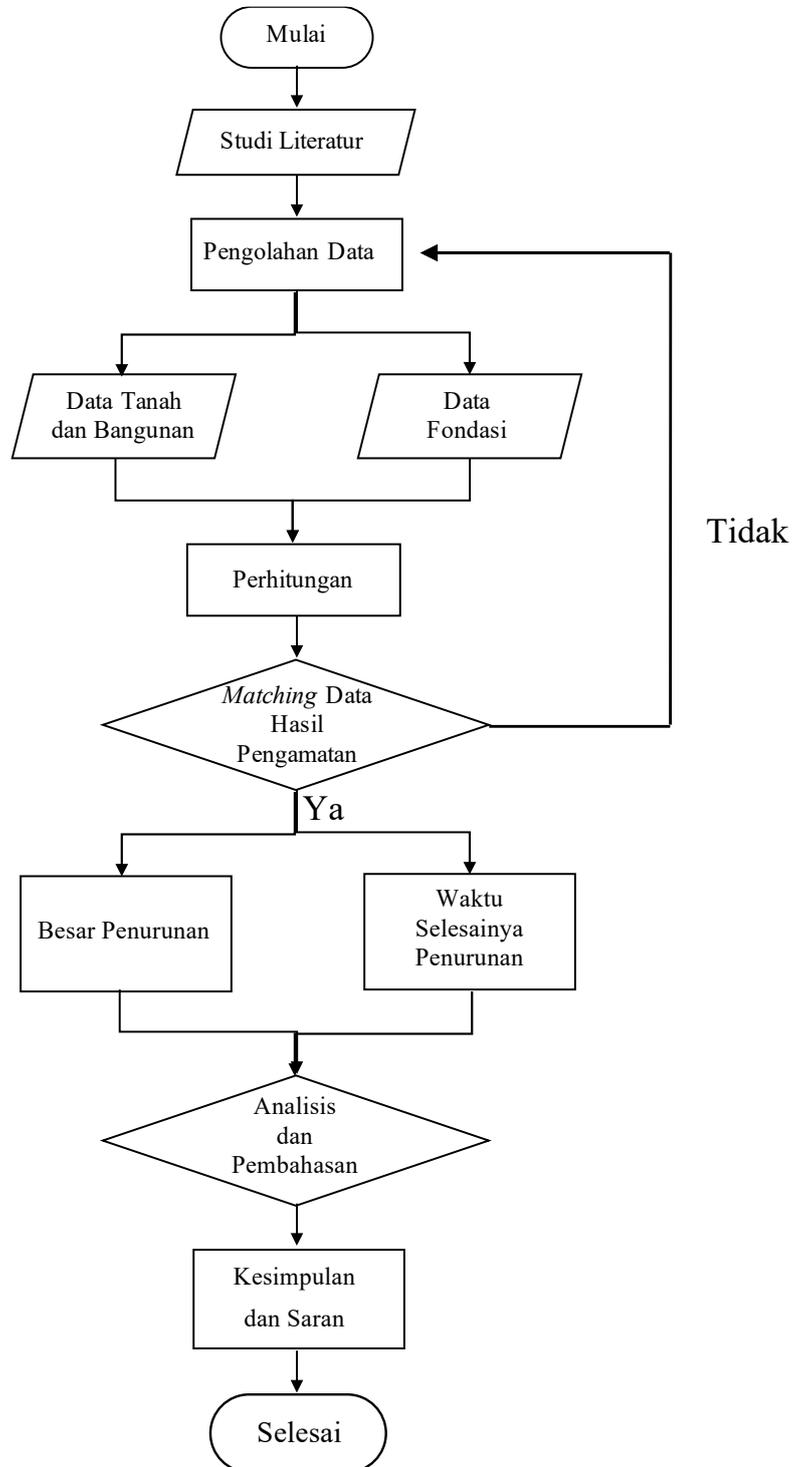
$$S_c = \frac{C_s}{1 + e_o} Hc \log \frac{p_o' + \Delta p}{p_o'} + \frac{C_c}{1 + e_o} Hc \log \frac{p_o' + \Delta p}{p_o'} \quad (4)$$

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.

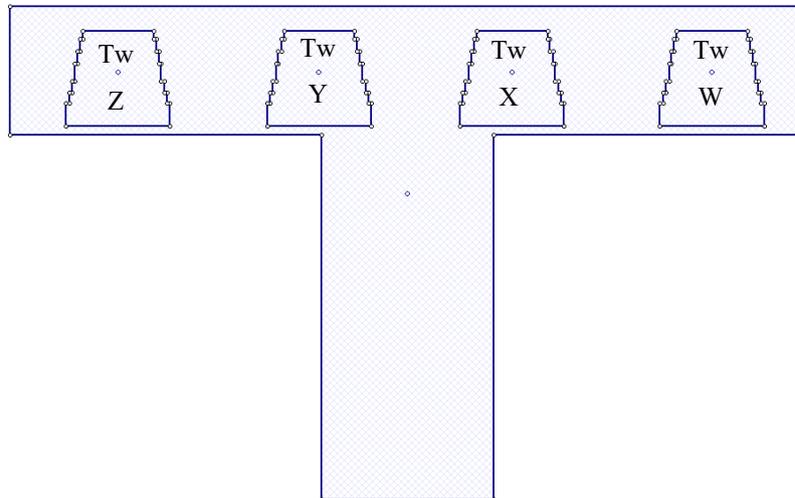


Gambar 3. Diagram alir penelitian

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

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

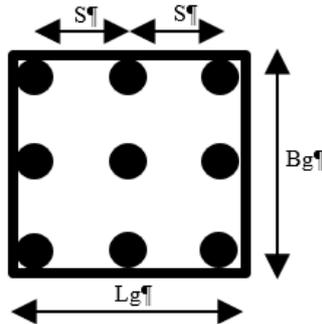
Efisiensi grup tiang dihitung dengan rumus menurut Converse-Labarre (Bowles, 1984):

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

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:

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

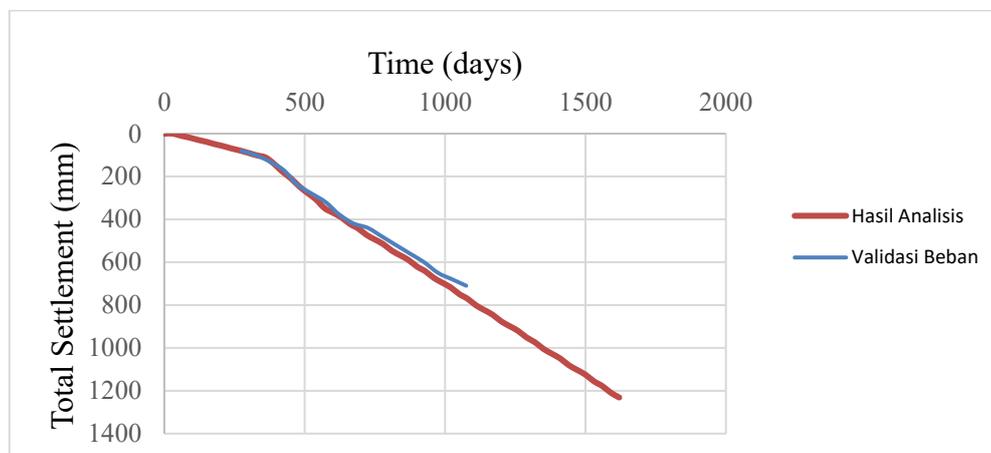
Bila $p_o' + \Delta p > p_c$, maka:

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

- 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
- 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
- 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
- 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

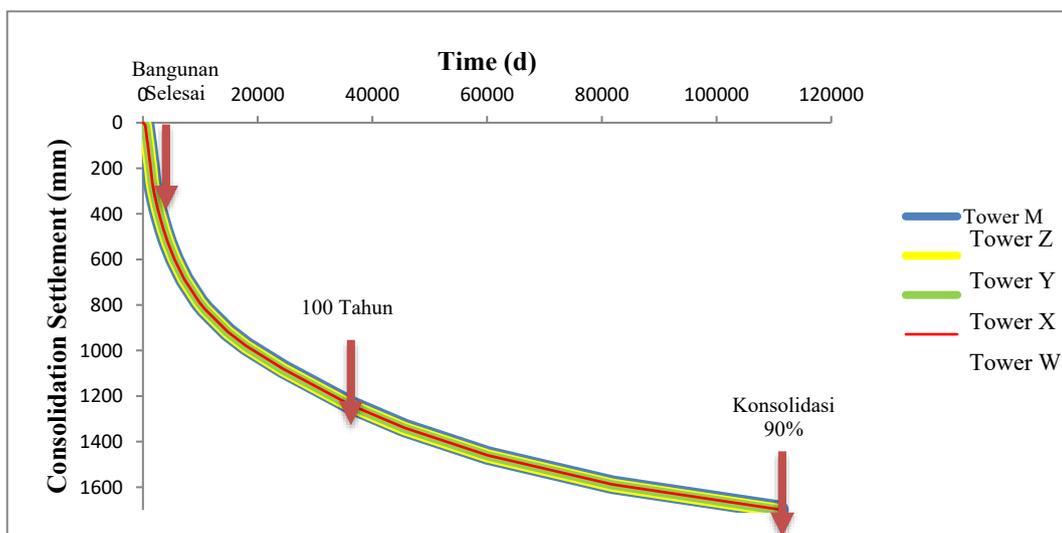
| Waktu (Hari) | Penurunan Konsolidasi (mm) | Penurunan Elastis (mm) | Penurunan Total (mm) | Derajat Konsolidasi (%) |
|--------------|----------------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|
| 1590 | 250,045 | 959,029 | 1209,07 | 13,3844 |
| 1620 | 256,324 | 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 |

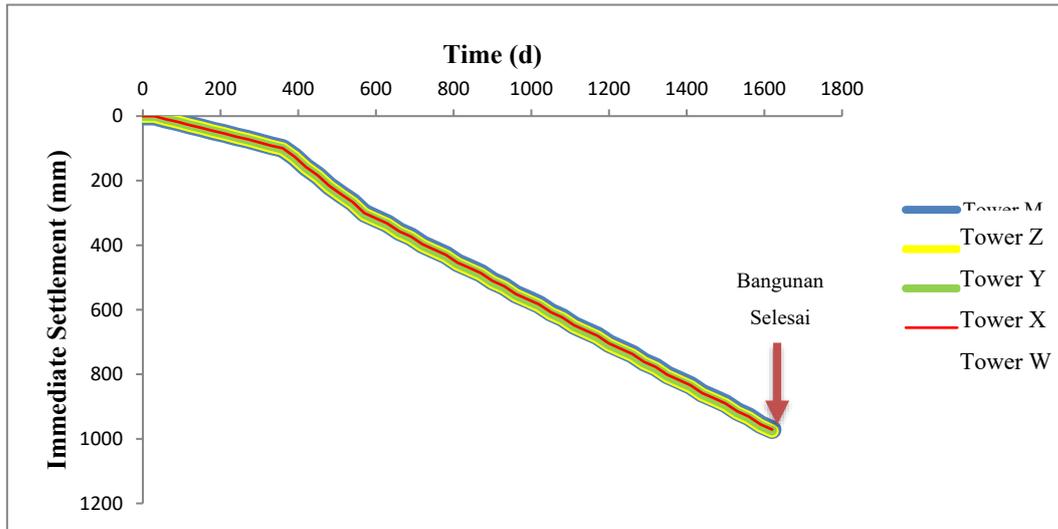
Berdasarkan hasil analisis, diperoleh t_{90} (waktu yang dibutuhkan untuk mencapai derajat konsolidasi sebesar 90%) adalah 110961 hari atau ± 308 tahun maka ditambahkan 1 *stage* dengan waktu t_{90} untuk memperoleh hasil analisis ketika tanah telah terkonsolidasi 90%.

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.



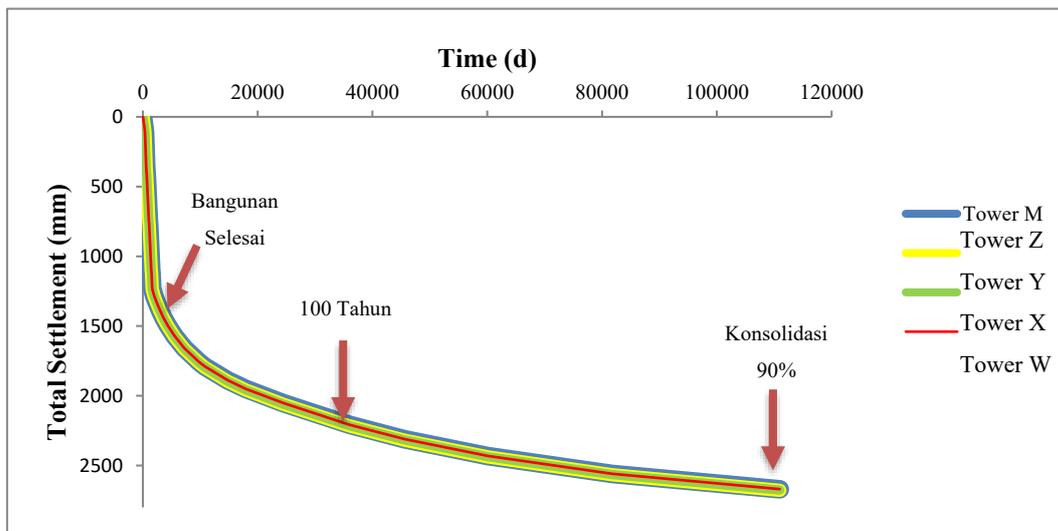
Gambar 5. Grafik time vs. consolidation settlement

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



Gambar 6. Grafik *time vs. immediate settlement*

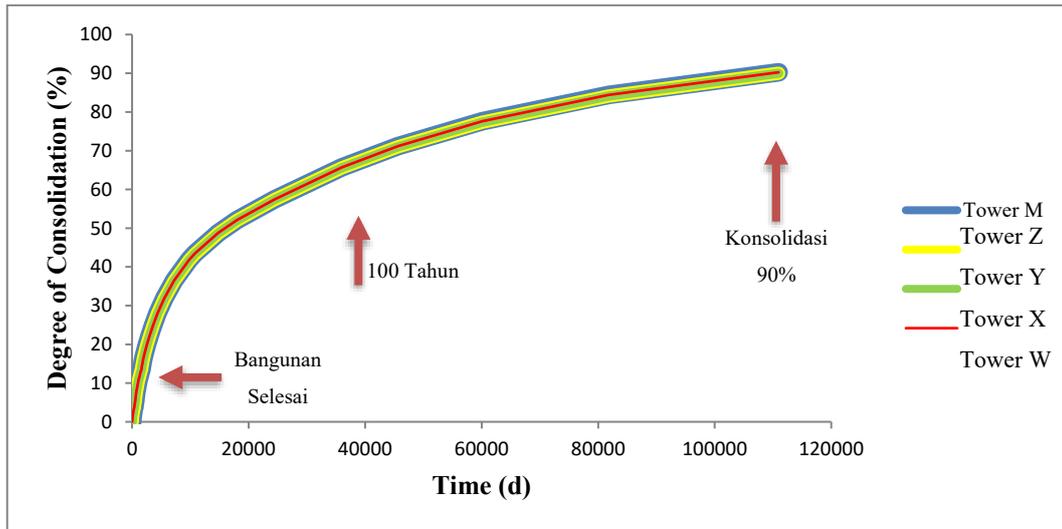
Berdasarkan Gambar 8 dapat dilihat bahwa penurunan total yang terjadi pada saat bangunan selesai sebesar ± 1200 mm, pada saat masa proyek 100 tahun sebesar ± 2200 mm, dan yang terbesar adalah pada saat tanah terkonsolidasi 90% sebesar ± 2600 mm.



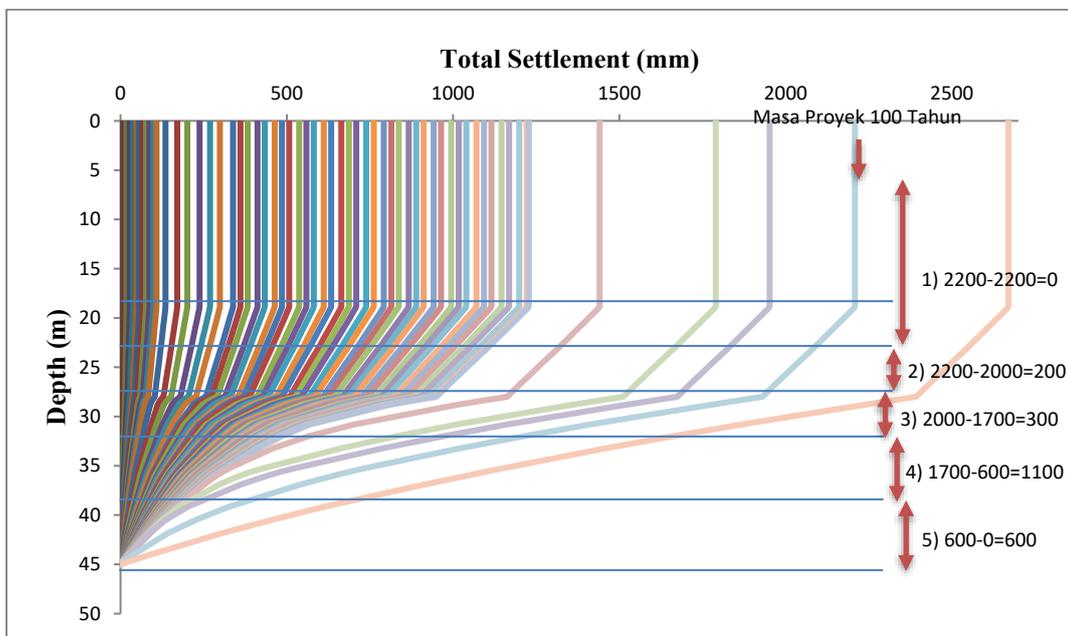
Gambar 7. Grafik *time vs. total settlement*

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>