

# Kajian Perilaku Penurunan Bangunan Tinggi: Studi Kasus dan Analisis

Hanny Juliany Dani <sup>[1]\*</sup>,

<sup>[1]\*</sup> Program Sarjana Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha, Bandung, 40164, Indonesia

Email: [hanny.jd@eng.maranatha.edu](mailto:hanny.jd@eng.maranatha.edu)\*

\*) Correspondent Author

**Received:** 21 March 2025; **Revised:** 05 April 2025; **Accepted:** 07 April 2025

**How to cited this article:**

Dani, H.J, (2025). Kajian Perilaku Penurunan Bangunan Tinggi: Studi Kasus dan Analisis. Jurnal Teknik Sipil, 21(1), 189–202.  
<https://doi.org/10.28932/jts.v21i1.11517>

## ABSTRAK

Masalah utama dalam konstruksi bangunan gedung tinggi adalah penurunan tanah yang dapat mempengaruhi stabilitas dan keamanan struktur. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis perilaku penurunan bangunan tinggi berdasarkan berbagai studi kasus di beberapa lokasi, seperti Chicago, Frankfurt, Shanghai, Singapura, Jakarta, dan Surabaya. Analisis dilakukan dengan membandingkan hasil prediksi teoritis yang diperoleh melalui perhitungan analitis dan metode elemen hingga (FEM) dengan data hasil pengukuran di lapangan. Studi ini juga mengevaluasi faktor-faktor yang mempengaruhi besar kecilnya penurunan, termasuk karakteristik tanah, beban struktur, serta fondasi yang digunakan. Pemilihan fondasi merupakan salah satu faktor yang penting. Pada tanah *overconsolidated clay*, penurunan yang paling besar terjadi adalah penurunan sampai dengan akhir masa konstruksi (*initial settlement*). Penurunan yang terjadi bisa mencapai sekitar 40 – 70% dari penurunan total, bahkan ada yang mencapai 90%. Untuk tanah yang memiliki kekakuan tinggi, penggunaan fondasi rakit untuk bangunan tinggi dapat direkomendasikan. Validasi model numerik menghadapi tantangan signifikan. Di Surabaya, penurunan aktual (3,5 cm) lebih kecil dari prediksi teoritis (13 cm) dan FEM (15 cm), ketidaksesuaian mencapai 77% diduga akibat *swelling pressure* tanah ekspansif yang tidak terdeteksi dalam model.

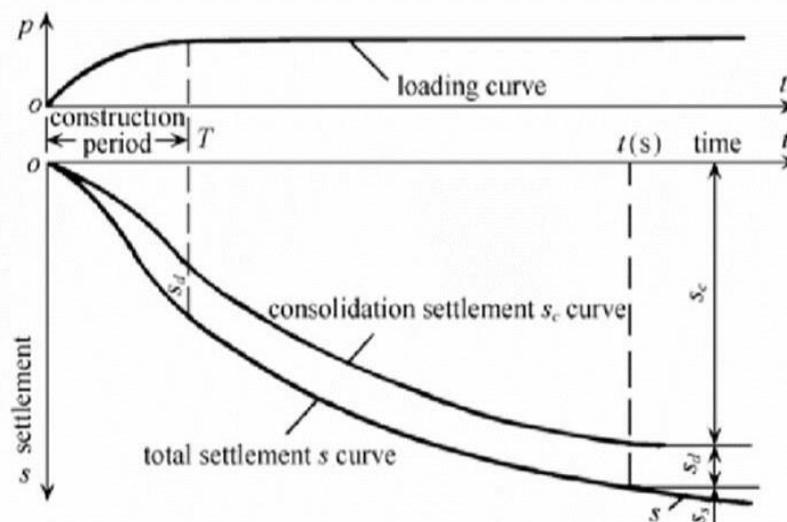
**Kata kunci:** Bangunan Tinggi, Metode Elemen Hingga, *Overconsolidated Clay*, Penurunan

**ABSTRACT.** *Behavior Studies of Settlement in Tall Building: Case Studies and Analysis.* The main problem in the construction of high-rise buildings is land subsidence which can affect the stability and safety of the structure. This study aims to analyze the behavior of the settlement of high-rise buildings based on various case studies in several locations, such as Chicago, Frankfurt, Shanghai, Singapore, Jakarta, and Surabaya. The analysis was carried out by comparing the results of theoretical predictions obtained through analytical calculations and finite element methods (FEM) with the data of measurement results in the field. The study also evaluated the factors that affect the magnitude of the settlement, including soil characteristics, structural loads, and the foundations used. The choice of foundation is one of the important factors. In overconsolidated clay soil, the largest settlement occurred was the settlement until the end of the construction period (*initial settlement*). The settlement that occurs can reach around 40-70% of the total settlement, some even reach 90%. For soils that have high rigidity, the use of raft foundations for tall buildings can be recommended. In Surabaya, the actual settlement (3.5 cm) was smaller than the theoretical prediction (13 cm) and FEM (15 cm), the mismatch reaching 77% was suspected to be due to expansive soil pressure swelling that was not detected in the model.

**Keywords:** Tall Building, Finite Element Method, *Overconsolidated Clay*, Settlement,

## 1. PENDAHULUAN

Perkembangan konstruksi bangunan tinggi (bangunan dengan tinggi  $\geq 100$  m) meningkat pesat secara global, termasuk di Indonesia. Menurut data *Council on Tall Buildings and Urban Habitat* (CTBUH), pada 2020 terdapat 198 bangunan *super-tall* ( $\geq 300$  m), meningkat dari 15 bangunan pada tahun 1995. Fenomena ini memicu tantangan geoteknik, terutama terkait penurunan (*settlement*) dan perbedaan penurunan (*differential settlement*). Penurunan total pada bangunan tinggi umumnya terdiri dari tiga komponen: penurunan segera (*immediate/initial settlement*), penurunan konsolidasi primer ( $S_c$ ), dan penurunan konsolidasi sekunder ( $S_s$ ). Penurunan segera terjadi karena deformasi elastis tanah yang diakibatkan oleh penerapan beban, sedangkan penurunan konsolidasi primer terjadi akibat aliran air pori yang menyebabkan pengurangan volume tanah. Penurunan konsolidasi sekunder, meskipun seringkali lebih kecil nilainya, merupakan fenomena *creep* yang terjadi setelah tekanan pori mencapai kondisi stabil, seperti pada **Gambar 1**. Persoalan ini semakin kompleks pada tanah lunak seperti Chicago Clay atau tanah ekspansif di Surabaya, di mana interaksi fondasi-tanah-struktur memengaruhi kinerja jangka panjang.



**Gambar 1.** Kuva Komponen Penurunan Total (Chen, 2011)

Studi ini bertujuan menganalisis kurva penurunan-beban pada berbagai jenis fondasi (rakit, tiang, dan tiang-rakit) di lapisan tanah berbeda, serta membandingkan hasil prediksi teoritis yang diperoleh dari hasil perhitungan analitis, maupun hasil yang diperoleh dari perhitungan dengan FEM, dengan data penurunan yang diperoleh dari pengamatan di lapangan. Kajian melibatkan beberapa bangunan tinggi yang ada di 7 (tujuh) lokasi yang berbeda, termasuk Monadnock Block di Chicago, BfG-Trianon di Frankfurt, dan Equity Tower di Jakarta.

Pemahaman mendalam tentang mekanisme penurunan dan validasi model numerik menjadi kunci untuk optimasi desain fondasi.

## 2. METODOLOGI

Penelitian ini menggunakan pendekatan kualitatif melalui studi literatur dan analisis sekunder data lapangan. Data diambil dari publikasi ilmiah, laporan proyek, dan hasil pengamatan in-situ seperti *extensometer*. Metode analisis meliputi:

### 2.1 Analisis Elastis dan Empiris

Persamaan elastis dan semi-empiris digunakan untuk menghitung penurunan fondasi (Poulos, 2004). Misalnya, penurunan fondasi lingkaran, persamaan ini memperhitungkan kekakuan fondasi, kedalaman fondasi, peningkatan modulus elastisitas tanah dengan kedalaman, dan lokasi lapisan kaku pada kedalaman terbatas ditunjukkan pada Persamaan 1 berikut.

$$\rho = \frac{q \cdot d \cdot I_g \cdot I_f \cdot I_E}{E_o} \cdot (1 - \nu^2) \quad (1)$$

Dimana :

- q = besarnya beban yang bekerja
- d = diameter telapak atau rakit
- I<sub>g</sub> = faktor pengaruh perpindahan (*displacement influence factor*)
- I<sub>f</sub> = faktor koreksi fleksibilitas fondasi (*foundation flexibility correction factor*)
- I<sub>E</sub> = faktor koreksi kedalaman fondasi (*foundation embedment factor correction factor*)
- ν = *Poisson's ratio* tanah
- E<sub>o</sub> = Modulus Elastisitas tanah

Penurunan pada fondasi kelompok tiang dapat dihitung dengan memperhitungkan interaksi antar tiang dengan menggunakan Persamaan 2.

$$S_i = x_i \cdot \sum (P_j \cdot \alpha_{ij}) + x_i \cdot P_i \quad (2)$$

dimana :

- S<sub>i</sub> = penurunan tiang ke-i akibat pengaruh tiang-tiang yang lain (mm)
- x<sub>i</sub> = besarnya penurunan satu tiang pada beban satu satuan (mm/ton)
- P<sub>i</sub> = beban pada tiang ke-i (ton)
- P<sub>j</sub> = beban pada tiang ke-j (ton)
- α<sub>ij</sub> = faktor interaksi untuk jarak antara tiang ke-i dan tiang ke-j

Untuk kelompok tiang yang memiliki ukuran dan geometri yang berbeda dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$S_i = \sum(x_{1j} \cdot P_j \cdot \alpha_{ij}) + x_{1i} \cdot P_i \quad (3)$$

$x_{1j}$  = besarnya penurunan tiang ke-j pada beban satu satuan (mm/ton)

$P_i$  = beban pada tiang ke-i (ton)

$P_j$  = beban pada tiang ke-j (ton)

$\alpha_{ij}$  = faktor interaksi untuk jarak antara tiang ke-i dan tiang ke-j, serta untuk parameter geometris dari tiang ke-j

Faktor interaksi untuk tiang gesekan dan tiang tahanan ujung berbeda. Poulos menurunkan kurva-kurva faktor interaksi pada nilai angka Poisson sama dengan 0.5.

Proses desain sistem fondasi tiang rakit meliputi :

- a. Tahap desain awal, untuk memastikan daya dukung fondasi rakit memiliki faktor keamanan yang mencukupi terhadap daya dukung ultimit, namun penurunan yang terjadi melebihi yang disyaratkan sehingga memerlukan penggunaan tiang rakit.
- b. Tahap kedua, mengestimasi jumlah tiang yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan desain
- c. Tahap desain rinci untuk menentukan jumlah optimum, lokasi dan konfigurasi fondasi tiang, dan menghitung penurunan yang terjadi, momen lentur dan gaya geser yang terjadi pada fondasi.

Dalam desain awal perlu dipertimbangkan keandalan sistem fondasi rakit itu sendiri tanpa adanya fondasi tiang, memperkirakan besarnya daya dukung ultimit, penurunan atau perbedaan penurunan yang mungkin terjadi. Jika penggunaan fondasi rakit sudah dapat memenuhi kebutuhan, namun penurunan yang terjadi masih cukup besar, maka dapat diindikasikan perlu penggunaan fondasi tiang untuk mengurangi potensi penurunan.

Ada beberapa metode analisis yang telah dikembangkan untuk dapat menganalisis sistem fondasi tiang rakit. Poulos dkk (1997) telah meresmikan dan membaginya dalam 3 (tiga) bagian, yaitu :

1. Metode perhitungan sederhana
2. Metode pendekatan “*strip on springs*” oleh Poulos, 1991. Pendekatan “*plate on springs*” oleh Clancy & Randolph, 1993; Poulos, 1994; Viggiani, 1998; Anagnostopoulos dan Georgiadis, 1998.
3. Metode penggunaan komputer dengan lebih teliti. Misalkan menggunakan metode elemen hingga atau beda hingga dengan menggunakan program komputer 2D maupun 3D.

Perkiraan penurunan kelompok fondasi tiang pada tanah lempung dapat diperkirakan dengan persamaan berikut :

- a. Untuk tanah lempung terkonsolidasi normal (NC) :

$$S_g = \sum \left[ \frac{C_c \cdot \Delta H}{1 + e_o} \cdot \log \left( \frac{p'_o + \Delta p}{p'_o} \right) \right] \quad (4)$$

- b. Untuk tanah lempung terkonsolidasi berlebih (OC), digunakan nilai *rebound compression index* ( $C_r$ ), dan harus ditinjau dulu nilai ( $p'_o + \Delta p$ ) terhadap tegangan prakonsolidasi ( $p'_c$ ).

1. Jika ( $p'_o + \Delta p$ )  $\leq$   $p'_c$

$$S_g = \sum \left[ \frac{C_r \cdot \Delta H}{1 + e_o} \cdot \log \left( \frac{p'_o + \Delta p}{p'_o} \right) \right] \quad (5)$$

2. Jika ( $p'_o + \Delta p$ )  $>$   $p'_c$

$$S_g = \sum \left[ \frac{C_r \cdot \Delta H}{1 + e_o} \cdot \log \left( \frac{p'_c}{p'_o} \right) + \frac{C_c \cdot \Delta H}{1 + e_o} \cdot \log \left( \frac{p'_o + \Delta p}{p'_c} \right) \right] \quad (6)$$

## 2.2 Pemodelan Numerik

*Software finite element* (Plaxis 3D, MIDAS GTS) digunakan untuk mensimulasikan interaksi tanah-fondasi. Validasi model dilakukan dengan membandingkan hasil simulasi dengan data *monitoring*, seperti pada proyek Shanghai World Financial Center (Wang et al., 2015), dan proyek di Surabaya.

## 2.3 Studi Kasus Komparatif

Data penurunan bangunan tinggi dihimpun dari tujuh lokasi, yaitu bangunan tinggi yang berada di Chicago, London, Frankfurt, Shanghai, Singapura, Jakarta dan Surabaya. Data dianalisis untuk mengidentifikasi pola penurunan berdasarkan jenis tanah, beban, dan konfigurasi fondasi. Parameter seperti modulus tanah ( $E$ ), koefisien konsolidasi ( $C_c$ ), dan *undrained shear strength* ( $c_u$ ) diuji konsistensinya. Besar penurunan yang diperoleh dari perhitungan analitis maupun dari pemodelan numerik dibandingkan dengan data penurunan hasil pengukuran di lapangan. Pengamatan dilakukan selama proses konstruksi.

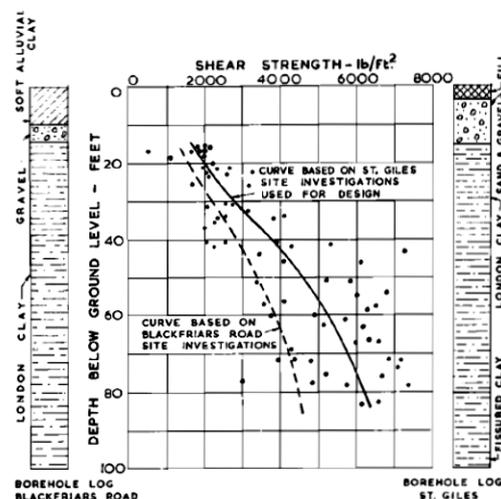
### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 3.1 Mekanisme Penurunan pada Jenis Tanah Berbeda

Perhitungan penurunan fondasi terutama untuk penurunan jangka panjang sangat kompleks yang dikaitkan dengan berbagai faktor, seperti : (i) parameter kompresibilitas yang diperoleh di laboratorium berasal dari sampel dengan ukuran relatif kecil, sehingga lebih homogen dibandingkan dengan kenyataannya di lapangan yang heterogen; (ii) keterbatasan dan adanya asumsi-asumsi yang berlaku dalam analisis konsolidasi konvensional. Karena itulah pengukuran penurunan langsung di lapangan penting dilakukan, untuk lebih mengetahui berapa besar penurunan yang terjadi dan juga memperkirakan besarnya penurunan final.

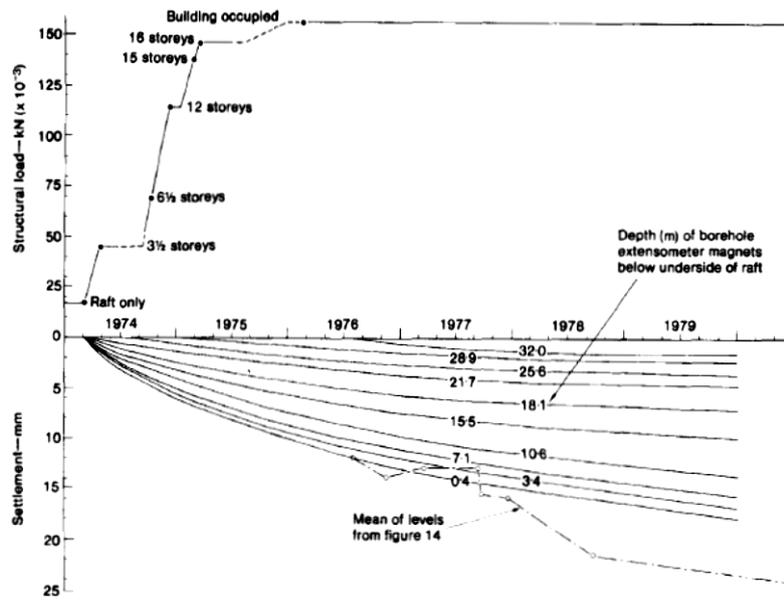
Pada tanah lempung terkonsolidasi normal seperti *Chicago Clay*, penurunan didominasi oleh konsolidasi primer akibat air pori yang terdrainase. Studi Peck, 1955 (Peck, 1955) pada 7 (tujuh) bangunan tinggi di Chicago yang menggunakan fondasi rakit, menunjukkan bahwa penurunan total mencapai 91 cm. Sampai dengan akhir masa konstruksi penurunan yang terjadi berkisar antara 20% sampai dengan 40% dari penurunan total. Mekanisme ini disebabkan oleh kompresibilitas tinggi tanah lunak (*soft clay*) yang memiliki nilai *compression index* ( $C_c$ ) 0,42–0,62. Hasil pengamatan di lapangan menunjukkan penurunan yang terjadi lebih besar sekitar 15% dibandingkan dari hasil perhitungan.

Cooke et al., 1981 melakukan pengamatan terhadap pembebanan dan penurunan fondasi pada bangunan tinggi yang berdiri di atas lapisan lempung London (*London Clay*). *London Clay* mempunyai nilai *undrained shear strength* bervariasi mulai dari 100 kN/m<sup>2</sup> pada kedalaman 3 meter dan terus meningkat sampai 260 kN/m<sup>2</sup> pada kedalaman 25 meter, seperti pada **Gambar 2**. *London clay* mempunyai nilai parameter tegangan pori Skempton,  $A$  pada kondisi runtuh negatif, sehingga termasuk tanah *overconsolidated clay* (Skempton, 1957).



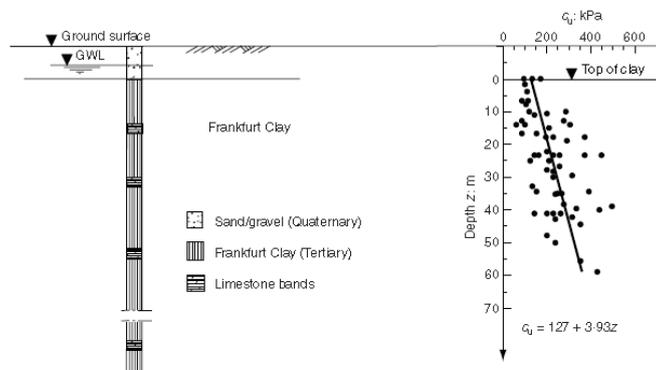
**Gambar 2.** Profil Tanah *London Clay* (Frischmann & Fleming, 1962)

Pengamatan dilakukan pada bangunan 16 lantai yang menggunakan fondasi rakit bertiang. Penurunan seketika (*initial settlement*) yang terjadi mencapai 60% sampai 70% dari total penurunan, seperti ditunjukkan pada **Gambar 3**. Hal ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh (Morton & Au, 1974) pada 8 (delapan) bangunan di London, dimana 5 (lima) bangunan menggunakan fondasi rakit dan 3 (tiga) bangunan menggunakan tiang bor dengan diameter besar. Hasil yang diperoleh penurunan maksimum berkisar 65% lebih besar dari penurunan pada akhir konstruksi.



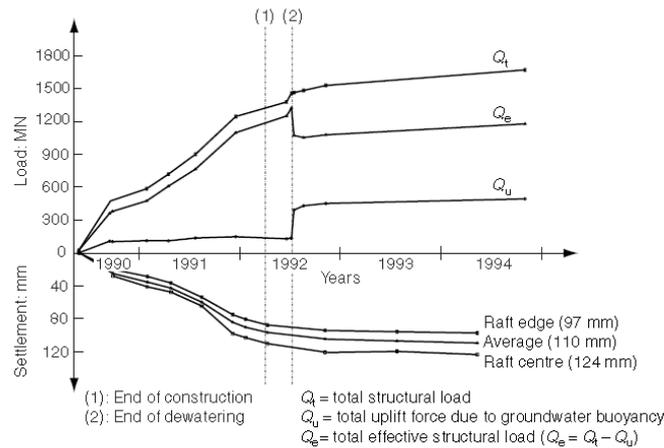
**Gambar 3.** Kurva Waktu vs Beban dan Waktu vs Penurunan pada Bangunan di London Clay (Cooke, 1981)

Franke et al., (2000), melakukan pengamatan penggunaan *raft foundation* (fondasi rakit) pada bangunan tinggi yang berdiri di atas lapisan *Frankfurt Clay*. *Frankfurt Clay* merupakan lapisan lempung dengan konsistensi teguh sampai semi padat dan *limestone* (**Gambar 4**).



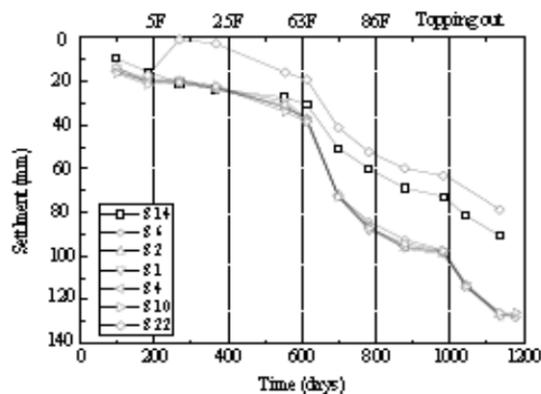
**Gambar 4.** Profil Tanah *Frankfurt Clay* (Franke et al., 2000)

Salah satu gedung tinggi yang diamati adalah gedung BfG Trianon. Hasil perhitungan memberikan penurunan maksimum sebesar 150 mm. Hasil pengukuran di lapangan penurunan yang terjadi lebih kecil dibandingkan dengan hasil perhitungan, dan penurunan yang terjadi sampai dengan akhir masa konstruksi mencapai 70% bahkan bisa mencapai 90%, seperti diperlihatkan pada **Gambar 5**.



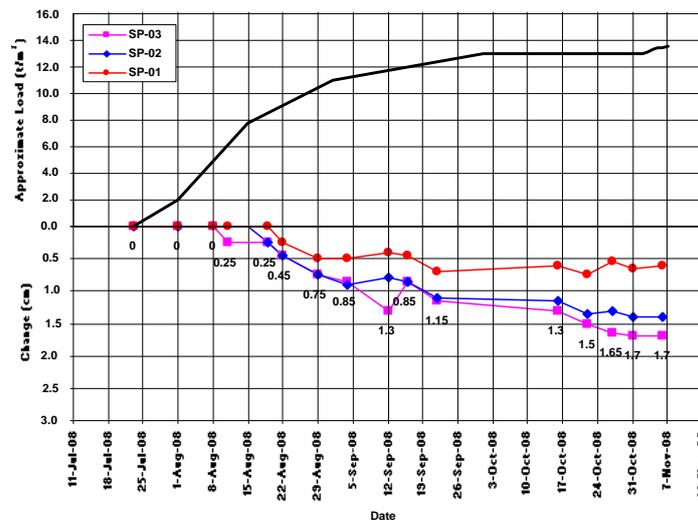
**Gambar 5.** Kurva Waktu vs beban dan Waktu vs Penurunan Gedung BfG-Trianon, Frankfurt (Franke et al.,2000)

W.D Wang, J.B.Wu dan Q. Li (2015), melakukan pengamatan pada gedung Shanghai World Financial Center (SWFC) yang merupakan bangunan 101 lantai dengan tinggi 492 m dan menggunakan *piled raf*. Gedung ini berada di Shanghai. Shanghai terletak di delta sungai Yangtze, umumnya terdiri dari *alluvial* dan *marine sediment* yang diendapkan selama periode *Quaternary*. Sampai dengan *topping off* penurunan yang terjadi mendekati dengan hasil perhitungan, tetapi 6 (enam) bulan setelah *topping off* penurunan masih terjadi sampai mencapai 130 mm, hasil perhitungan dengan menggunakan program yang dikembangkan oleh Wang et al. (2007) penurunan maksimum sebesar 113 mm (**Gambar 6**).



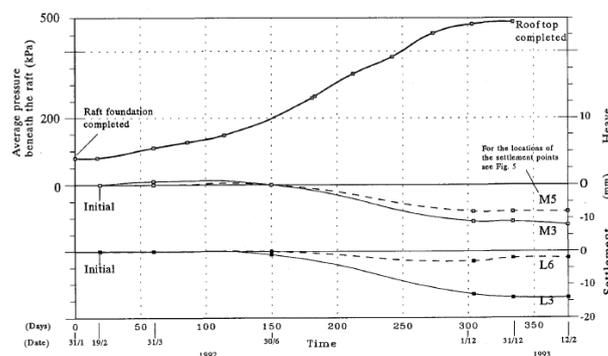
**Gambar 6.** Kurva Penurunan Terhadap Waktu pada Tower SWFC (Wang et al.,2015)

Bangunan tinggi 45 lantai di Jakarta berada pada lokasi yang memiliki lapisan *stiff clay* dan lapisan *cemented sand* dengan SPT lebih dari 40 didesain dengan menggunakan parameter yang diperoleh dari hasil uji *Pressuremeter*. Fondasi yang digunakan adalah fondasi rakit, dan hasil analisis menggunakan *3D finite element* menghasilkan penurunan terbesar sebesar 200 mm. Hasil pengamatan di lapangan menunjukkan penurunan yang terjadi sampai dengan konstruksi mencapai 5 (lima) lantai hanya sebesar 17 mm (**Gambar 7**). Kompresi yang terjadi pada lapisan *cemented sand* berkisar 0 sampai 3 mm dan pada lapisan *stiff clay* sekitar 14 mm (Rahardjo, 2016).



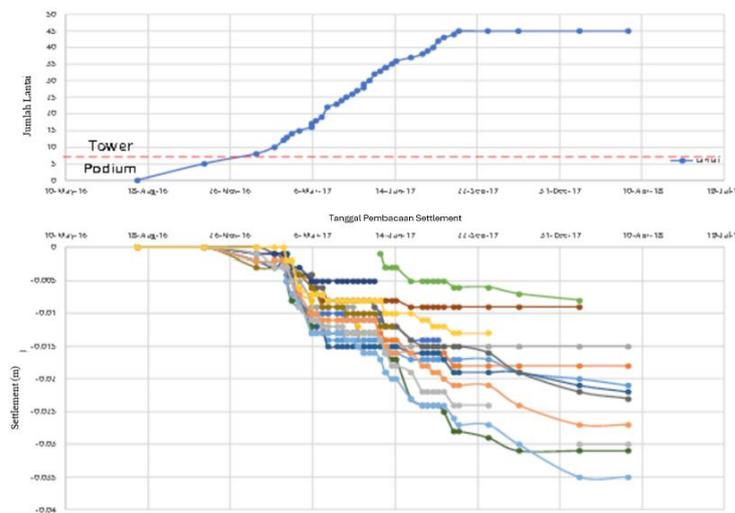
**Gambar 7.** Kurva Waktu vs Beban dan Waktu vs Penurunan Equity Tower, Jakarta (Rahardjo et al., 2016)

Pada tanah non-kohesif seperti *bouldery clay* di Singapura, penurunan bersifat segera (*immediate*) karena partikel pasir dan kerikil yang padat merespons beban secara elastis. (Wong et al., 1996) melaporkan bahwa Savu Tower II hanya mengalami penurunan 14 mm (**Gambar 8**), berkat nilai modulus tanah (*E*) yang tinggi (53–92 MPa).



**Gambar 8.** Kurva Penurunan terhadap Beban pada Savu Tower II (Wong, 1996)

Perbedaan signifikan terlihat pada bangunan tinggi di Surabaya. Lapisan tanah lempung menunjukkan perilaku unik, tekanan pengembangan (*swelling pressure*) hingga 250 kPa mampu mengurangi penurunan aktual. Fenomena ini diduga terjadi karena *heave* (pengangkatan tanah) akibat penurunan kadar air selama konstruksi mengimbangi kompresi vertikal. Rahardjo et al. (2018) menemukan bahwa penurunan teoritis 15 cm pada bangunan tinggi di Surabaya hanya terealisasi 3,5 cm di lapangan (**Gambar 9**). **Tabel 1** menyajikan besar penurunan yang terjadi di berbagai lokasi dengan karakteristik tanah yang berbeda, dan **Tabel 2** menyajikan data mekanisme penurunan yang terjadi.



**Gambar 9.** Kurva Waktu vs Beban dan Waktu vs Penurunan Proyek Apartemen, Surabaya (Rahardjo et al.,2015)

**Tabel 1.** Mekanisme Penurunan Berdasarkan Jenis Tanah

Jenis Tanah	Karakteristik Utama	Contoh Proyek	Penurunan Total	Dominasi Komponen Penurunan
Lempung NC (Chicago)	$C_c = 0,42 - 0,62$ $w = 36\%$	Monadnock Block	91 cm	Konsolidasi Primer (85%)
Bouldery Clay (Singapura)	$E = 53 - 92 \text{ Mpa}$ $N_{SPT} > 375$	Savu Tower II	14 mm	Segera (Elastis)
Lempung OC (Frankfurt)	$c_u = 100 - 260 \text{ kPa}$ $A = -0,5$	BfG-Trianon Frankfurt	13 cm	Segera (60-70%)
Tanah Ekspansif (Surabaya)	$PI = 45 - 85$ $swelling \text{ pressure} = 250 \text{ kPa}$	Apartemen 51 lantai	3,5 cm	Heave-kompensasi

**Tabel 2.** Mekanisme Penurunan Berdasarkan Kondisi Tanah

Lokasi	Kondisi Tanah	Fondasi yang digunakan	Mekanisme Penurunan
London	London Clay, nilai $c_u$ mulai dari 100kN/m <sup>2</sup> pada kedalaman 3m sampai 260 kN/m <sup>2</sup> pada kedalaman 25 m Merupakan lapisan <i>overconsolidated clay</i> .	Rakit bertiang	Pada akhir konstruksi penurunan yang terjadi sudah mencapai 60 – 70% dari penurunan final
Jerman	Frankfurt Clay, terdiri dari lapisan lempung kaku ( <i>stiff clay</i> ) sampai semi padat	Rakit	Pada akhir konstruksi penurunan yang terjadi sudah mencapai 60 – 70% dari penurunan final
Singapore	Bouldery Clay, terdiri dari batuan pasir yang tergabung dalam silty dan sandy clay dengan konsistensi <i>very stiff</i> sampai <i>hard</i> . Kekuatan dan karakteristik deformasinya mendekati batuan lemah ( <i>weak rock</i> ) atau <i>heavily overconsolidated clay</i> , Nilai $c_u$ diestimasi sebesar 1000 kPa	Rakit	Penurunan baru terjadi setelah bangunan memasuki 10 lantai Penurunan maksimum yang terjadi setelah struktur atas selesai dibangun sebesar 14 mm

### 3.2 Peranan Fondasi dalam Penurunan

Fondasi tiang-rakit (*piled raft*) telah menjadi solusi dominan untuk bangunan tinggi di tanah lunak atau heterogen. Sistem ini menggabungkan keunggulan fondasi rakit dalam mendistribusikan beban secara merata dan fondasi tiang dalam mentransfer beban ke lapisan tanah yang lebih dalam. Gedung Shanghai World Financial Center (SWFC) didesain dengan menggunakan *piled raft*, 70 m x 70 m, menggunakan 985 tiang baja dengan diameter 0.7 m dan panjang 60.7 m, dengan kedalaman rakit (*raft*) 14,5 m. *Differential settlement* terbesar sebesar 36 mm, memberikan *angular rotation* sebesar 1/500 (hasil perhitungan 1/850).

Pada bangunan apartemen di Surabaya, kombinasi 806 tiang pancang dan 1.131 tiang bor dengan rakit tebal 3,5 m menghasilkan penurunan maksimal hanya 3,5 cm (Rahardjo et al., 2018). Gedung DZ-Bank yang berdiri di atas lapisan Frankfurt Clay, merupakan gedung dengan tinggi 208 m, didesain menggunakan fondasi rakit bertiang (*pile raft*), dengan tebal rakit 3,0 – 4,5 m, 40 tiang bor berdiameter 1,3 m, panjang 30 m. Pada akhir masa konstruksi penurunan yang terjadi sebesar 10.5 cm. Beban yang dipikul rakit dan tiang hampir sama besar, dan pembagian ini cukup konstan selama sebagian besar konstruksi berlangsung.

Kinerja dari fondasi rakit untuk bangunan tingkat tinggi yang berada di atas lapisan *bouldery clay* di Singapura. Gedung Savu Tower II, terdiri dari 33 lantai, menggunakan fondasi rakit dengan tebal 2,8 m, menunjukkan hasil yang memuaskan, penurunan dan *differential settlement* memenuhi persyaratan. Fondasi rakit juga digunakan pada Equity Tower di Jakarta. Berdasarkan fakta ini, penggunaan fondasi rakit untuk bangunan tingkat tinggi yang berada pada

lapisan tanah *bouldery clay* atau jenis tanah lain yang mempunyai kekakuan yang sama dapat direkomendasikan. Perbandingan besar penurunan berdasarkan jenis tanah dapat dilihat pada **Tabel 3**.

**Tabel 3.** Komparasi Kinerja Fondasi

Proyek & Lokasi	Jenis Fondasi	Penurunan Maksimum
Apartemen Surabaya	Tiang-rakit	3,5 mm
Shanghai SWFC (Tiongkok)	Tiang-rakit	130 mm
DZ-Bank (Frankfurt)	Tiang-rakit	10,5 cm
Savu Tower II (Singapura)	Rakit	14 mm

### 3.4 Validasi Model Numerik dengan Data Lapangan

Validasi model FEM dan teoritis terhadap data lapangan menunjukkan variasi akurasi tergantung pada kompleksitas tanah, seperti diperlihatkan pada **Tabel 4**.

**Tabel 4.** Validasi Model Numerik pada Berbagai Kondisi Tanah

Proyek	Metode Analisis	Prediksi	Aktual	Deviasi
Apartemen (Surabaya)	FEM (MIDAS GTS)	15 cm	3.5 cm	77%
Shanghai SWFC	FEM	113 mm	130 mm	13%
BfG-Trianon (Frankfurt)	Elastis (Poulos & Davis)	13 cm	12 cm	8%
Savu Tower II (Singapura)	Elastis	20 mm	21 mm	5%

Keterbatasan model dalam prediksi perilaku tanah terlihat pada proyek di Surabaya, di mana deviasi mencapai 77% karena model FEM (MIDAS GTS) tidak mempertimbangkan faktor *swelling pressure* sebesar 250 kPa yang mempengaruhi respons tanah ekspansif. Sementara itu, di proyek Shanghai SWFC, metode FEM menunjukkan deviasi 13% akibat adanya nonlinieritas tanah aluvial dan efek *creep*, yang menyebabkan deformasi lebih besar dari perkiraan. Sebaliknya, pada proyek BfG-Trianon di Frankfurt, dan Savu Tower II di Singapura memberikan hasil yang sangat akurat dengan deviasi kurang dari 10% karena tanahnya lebih homogen, yang memiliki karakteristik lebih stabil dan lebih mudah diprediksi.

Untuk meningkatkan akurasi model, diperlukan rekomendasi kalibrasi yang lebih sesuai dengan karakteristik tanah di lokasi proyek. Selain itu, parameter *swelling pressure* juga perlu diperhitungkan dalam simulasi untuk memastikan bahwa model dapat merepresentasikan kondisi aktual dengan lebih baik. Dengan kalibrasi yang tepat, penyimpangan antara hasil prediksi dan data lapangan dapat dikurangi secara signifikan, sehingga model lebih andal dalam mendukung desain fondasi dan evaluasi stabilitas tanah di berbagai kondisi geoteknik.

#### **4. SIMPULAN**

Kajian ini mengungkap kompleksitas mekanisme penurunan pada bangunan tinggi, yang secara fundamental dipengaruhi oleh interaksi antara karakteristik tanah dan desain fondasi. Pada tanah *overconsolidated clay*, penurunan yang paling besar terjadi adalah penurunan sampai dengan akhir masa konstruksi (*initial settlement*). Penurunan yang terjadi bisa mencapai sekitar 40 – 70% dari penurunan total, bahkan ada yang mencapai 90%. Penggunaan fondasi rakit untuk bangunan tinggi pada lapisan tanah yang memiliki kekakuan yang tinggi, seperti pada lapisan *Bouldery clay* di Singapura ataupun lapisan *stiff clay* dan *cemented sand* yang ada di Jakarta, dapat direkomendasikan.

Pada tanah ekspansif, seperti yang ada di Surabaya, penurunan aktual akibat bangunan tinggi lebih kecil dibanding hasil perhitungan, diduga hal ini disebabkan adanya *heave*. Selama beban yang bekerja lebih kecil dari *swelling pressure*, maka yang terjadi adalah *heave*, setelah beban melewati besar *swelling pressure* barulah akan mengalami penurunan

Validasi model numerik menghadapi tantangan signifikan akibat keheterogenan tanah dan variabel lain yang dinamis. Di Surabaya, penurunan aktual (3,5 cm) lebih kecil dari prediksi teoritis (13 cm) dan FEM (15 cm), ketidaksesuaian mencapai 77% diduga akibat *swelling pressure* tanah ekspansif yang tidak terdeteksi dalam model. Penurunan aktual yang terjadi pada umumnya lebih kecil dari yang diprediksi atau dihitung.

#### **UCAPAN TERIMA KASIH**

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Fakultas Teknologi dan Rekayasa Cerdas, Jurusan Teknik Sipil, Universitas Kristen Maranatha, yang telah memberikan dukungan dan fasilitas dalam penyelesaian penelitian ini. Secara khusus, penulis menyampaikan rasa terima kasih yang mendalam kepada Prof. Paulus Pramono Rahardjo, Ph.D., Dr. Rinda Karlinasari dan Dr. Eddy Triyanto Sudjatmiko yang telah meluangkan waktu untuk memberikan diskusi dan tinjauan kritis terhadap tulisan ini.

#### **DAFTAR PUSTAKA**

- Chen, X. (2011). Settlement Calculation on High-Rise Buildings. In *Settlement Calculation on High-Rise Buildings*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-15570-3>
- Cooke, R. ., Smith Bryden, D. ., Gooch, M. ., & Sillett, D. . (1981). *Some Observations of The Foundation Loading and Settlement of A Multi-Storey Building on A piled Raft Foundation in London Clay*. 433–460.
- Franke, E., El-Mossallamy, Y., & Wittmann, P. (2000). 12. Calculation Methods for Raft Foundations in Germany. In *Design applications of raft foundations* (pp. 283–322). <https://doi.org/10.1680/daorf.27657.0012>
- Hemsley J.A., (2000), *Design applications of Raft Foundation*, Thomas Telford Ltd
- Katzenbach R., Leppla S., (2013), *Deformation Behaviour of Clay Due to Unloading and the*

- Consequences on Construction Project in Inner Cities*, Proceeding of the 18<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Paris.
- Katzenbach R., Leppla S., Choundhury D., (2017), *Foundation System for High-Rise Structure*, CRC Press, Taylor, and Francis Group.
- Morton, & Au. (1974). Settlement Observations on Eight Structures in London. *Settlement of Structure in London*.
- Peck, R. B. (1955). Observed and Computed Settlements of Structure in Chicago. *University of Illinois Bulletin*, 52.
- Poulos, H. G. (2004). Success and Failure in Predicting Pile Performance. *5th International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 1–14.
- Poulos H.G., (2016), *Tall Building Foundations : Design Methods and Applications*, Springerlink.com, 13 June 2016.
- Poulos H.G., (2017), *Tall Building Foundation Design*, CRC Press, Taylor and Francis Group.
- Rahardjo, P. P. (2016). *GEOTECHNICAL FAILURES IN CONSTRUCTION ON SOFT SOILS*.
- Rahardjo P.P., Tamsir Prieschila, (2018), *Behavior of Single Pile and Pile Group for High Rise Buildings on Expansive Soils*, South East Asia Geotechnical Conference XX and 3<sup>rd</sup> Association Geotechnical Societies of South East Asia, November 5-7
- Wang, W. D., Wu, J. B., & Li, Q. (2015). Design and performance of the piled raft foundation for Shanghai World Financial Center. *15th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, ARC 2015: New Innovations and Sustainability*, 162–165. <https://doi.org/10.3208/jgssp.CHN-44>
- Wong, I. ., Ooi, I. K., & Broms, B. B. (1996). Performance of Raft Foundation for High-Rise Buildings on The Bouldery Clay in Singapore. *Canadian Geotechnical Journal*.