

Analisa Komparasi Penurunan Pondasi Tiang Tunggal Menggunakan Metode Analitis Dan Perangkat Lunak Berbasis Metode Elemen Hingga Pada Slab On Pile Proyek Pembangunan Jalan Tol

*Ahmad Yusuf Habibur Rouf, Dian Purnamawati Solin

*Program Studi Teknik Sipil, Fakultas Teknik, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jawa Timur, Surabaya

*) diansolin.ts@upnjatim.ac.id

Abstract

Settlement in pile foundations is a crucial aspect in structural planning, particularly in slab on pile systems that transfer loads directly to hard soil layers. This study aims to compare the settlement analysis results of a single pile foundation using analytical methods and finite element methods. The case study focuses on a slab on pile structure in a toll road construction project. The comparison results indicate small differences between the two methods. This research is expected to serve as a reference for selecting the appropriate analysis method for efficient and accurate pile foundation design.

Keywords: Settlement, Single Pile, Analytical Method, Finite Element Method

Abstrak

Penurunan pada pondasi tiang merupakan salah satu aspek krusial dalam perencanaan struktur, terutama pada sistem *slab on pile* yang digunakan untuk menyalurkan beban secara langsung ke tanah keras. Penelitian ini memiliki tujuan untuk membandingkan hasil analisis penurunan pondasi tiang tunggal menggunakan metode analitis dan metode elemen hingga. Studi ini dilakukan pada struktur *slab on pile* proyek pembangunan jalan tol. Hasil perbandingan menunjukkan perbedaan yang kecil antara kedua metode. Penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi dalam memilih metode analisis yang tepat untuk perencanaan pondasi tiang secara efisien dan akurat.

Kata Kunci: Penurunan, Pondasi Tiang, Metode Analitis, Metode Elemen Hingga

PENDAHULUAN

Pertumbuhan pembangunan infrastruktur di Indonesia menunjukkan peningkatan yang pesat, termasuk pada kawasan dengan karakteristik tanah lunak seperti wilayah dengan dominan tanah berpasir. Tanah lunak dikenal memiliki sifat fisik yang kurang mendukung konstruksi, antara lain karena daya dukungnya rendah, permeabilitas tinggi, dan rentan terhadap deformasi (Wulandari, 2021). Kondisi ini menjadi tantangan utama dalam pelaksanaan proyek teknik sipil, karena struktur yang didirikan di atasnya berpotensi mengalami ketidakstabilan, deformasi berlebih, serta risiko penurunan diferensial yang signifikan (Tjitradi et al., 2021).

Masalah yang muncul akibat kondisi tanah seperti ini menuntut adanya solusi yang dapat meningkatkan stabilitas dan keandalan struktur. Salah satu solusi yang bisa diterapkan adalah dengan menggunakan sistem struktur *slab on pile*, yaitu metode konstruksi yang memadukan pelat beton bertulang dengan dukungan tiang pancang. Sistem ini berfungsi untuk mendistribusikan beban struktur secara lebih merata ke lapisan tanah yang lebih kuat di kedalaman tertentu, sehingga mampu mengurangi potensi penurunan berlebih dan memastikan stabilitas struktur atas tetap terjaga (Sartika Hutapea et al., 2021).

Namun dalam merancang sistem pondasi tiang, diperlukan perhitungan dan prediksi yang tepat, khususnya dalam memperkirakan besar penurunan yang mungkin terjadi akibat beban yang bekerja. Tujuan utama dari prediksi ini adalah untuk memastikan bahwa penurunan pondasi masih berada dalam batas toleransi yang aman dan tidak berdampak negatif terhadap kinerja struktur secara

keseluruhan. Oleh karena itu, pemilihan metode analisis yang tepat menjadi hal yang krusial dalam proses perencanaan.

Prediksi terjadinya penurunan ini dapat dilakukan dengan berbagai macam cara, mulai dari metode analitis berbasis teori hingga permodelan numerik menggunakan *software* bantu geoteknik. Oleh karena itu, penting dilakukan studi komparatif antara metode analitis dan metode berbasis *software* bantu geoteknik. Hal tersebut dilakukan untuk mengetahui tingkat akurasi dan efisiensi masing-masing metode dalam perencanaan pondasi tiang tunggal. Hasil dari studi ini diharapkan memberikan referensi dan bantuan yang lebih baik dalam pengambilan keputusan teknis pada proyek konstruksi.

TINJAUAN PUSTAKA PONDASI TIANG DAN SLAB ON PILE

Pondasi merupakan elemen penting dalam suatu sistem struktur bangunan karena berperan sebagai penghubung antara struktur atas dengan tanah sebagai media penopang utama. Fungsi utama pondasi adalah menyalurkan seluruh beban dari struktur bangunan baik beban mati, beban hidup, maupun beban dinamis ke lapisan tanah keras yang berada di kedalaman tertentu (Fakhrudin et al., 2022)(Tampubolon et al., 2024). Dengan demikian, pondasi memiliki peran krusial dalam menjaga kestabilan dan keamanan bangunan secara keseluruhan.

Salah satu jenis pondasi yang sering digunakan, khususnya pada bangunan bertingkat atau infrastruktur

berat, adalah pondasi tiang. Pondasi tiang dirancang untuk memikul beban yang besar dan mampu menembus lapisan tanah lemah di permukaan hingga mencapai lapisan tanah dengan daya dukung yang lebih tinggi (Muhshi et al., 2020)(Zain et al., 2021). Oleh karena itu, pondasi tiang sangat cocok digunakan pada wilayah dengan karakteristik tanah lunak atau berkompresi tinggi. Jenis pondasi ini tersedia dalam beberapa bentuk pelaksanaan, di antaranya adalah tiang pancang (*precast piles*), yang diproduksi dan dipancang ke dalam tanah menggunakan alat berat, serta tiang bor (*cast in situ piles*), yang dibentuk langsung di lokasi konstruksi melalui proses pengeboran dan pengecoran (Hardiyatmo, 2008).

Perencanaan pondasi harus mempertimbangkan karakteristik teknis tanah di lokasi proyek, termasuk daya dukung tanah, kedalaman lapisan keras, serta potensi penurunan dan perubahan volume tanah. Setiap jenis pondasi perlu dirancang secara khusus agar mampu beradaptasi dengan kondisi geoteknik yang ada dan menjamin kestabilan struktur di atasnya (Rumbyarso & Pribadi, 2024).

Dalam konteks pembangunan infrastruktur pada tanah lunak, salah satu sistem struktur pondasi yang terbukti efektif adalah *slab on pile*. Sistem ini mengandalkan pelat beton bertulang (*slab*) yang secara langsung ditumpukan pada kepala tiang (*pile head*), tanpa adanya lapisan timbunan atau tanah urugan di antara keduanya. Sistem ini umumnya diterapkan pada proyek-proyek jalan tol, jalan layang, maupun struktur ringan lainnya yang melintasi lahan basah atau daerah dengan daya dukung tanah rendah (Tarigan et al., 2020). Prinsip kerja dari sistem ini adalah memindahkan beban dari pelat beton langsung ke pondasi tiang, sehingga menghindari interaksi langsung dengan tanah lunak di permukaan dan meminimalkan potensi penurunan diferensial yang dapat merusak struktur. Kombinasi slab dan tiang ini dirancang sedemikian rupa agar berfungsi sebagai satu kesatuan sistem struktural yang efisien dan tahan terhadap deformasi.

PENURUNAN DENGAN METODE ANALITIS

Penurunan pondasi merupakan deformasi vertikal yang terjadi akibat pembebanan pada pondasi (Chaerania et al., 2024). Penurunan terjadi akibat berkurangnya pori-pori tanah akibat beban yang bekerja (Dananjaya et al., 2022). Selain itu, hal lain yang mungkin menjadi penyebab penuruna antara lain erosi di bawah tanah atau dikarenakan terdampak getaran yang menyebabkan tergeraknya butiran tanah sehingga mengalami pengurangan volume (Mahmudi, 2021). Penurunan pondasi termasuk salah satu parameter kunci dalam perencanaan struktur bawah. Metode analitis digunakan secara luas karena kemudahannya dalam penerapan dan tidak membutuhkan perangkat khusus. Pada umumnya, perhitungan ini didasarkan pada teori elastisitas dan pendekatan empiris yang telah dikembangkan dari hasil penelitian laboratorium dan lapangan. Salah satu contoh dari metode analitis adalah dengan menggunakan persamaan milik Vesic (Tahismasari et al., 2024).

Penurunan elastis merujuk pada pendekatan batang tiang akibat gaya aksial yang bekerja. Sementara itu, penurunan ujung tiang terjadi karena tekanan yang

disalurkan dari dasar tiang ke lapisan tanah keras dibawahnya. Sedangkan gesekan sisi yang bekerja sepanjang permukaan tiang, menyebabkan deformasi tambahan akibat interaksi antara tanah dan material tiang.

PENURUNAN BERBASIS FINITE ELEMENT METHOD

Finite Element Method merupakan metode numerik yang mampu memecahkan permasalahan geoteknik dengan melalui pendekatan diskretisasi elemen kecil. FEM mampu menangani kondisi batas kompleks, perilaku non linier material, serta interaksi antara struktur dan tanah (Potts & Zdravković, 1999). Dalam geoteknik, FEM umumnya digunakan untuk menganalisis stabilitas lereng, deformasi pondasi, dan juga penurunan tanah.

Penerapan FEM dalam analisis penurunan tanah memungkinkan simulasi yang lebih akurat dibandingkan dengan pendekatan analitis. Menurut (Brinkgreve et al., 2015), program geoteknik berbasis FEM dapat mensimulasikan proses konsolidasi tanah berbutir halus dengan mempertimbangkan aliran air pori secara *time-dependent*. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh (Susila & Apoji, 2012) menunjukkan bahwa model FEM mampu memprediksi penurunan pondasi pada tanah lunak dengan hasil yang mendekati pengukuran lapangan.

Keunggulan utama dari penggunaan FEM adalah kemampuannya untuk memodelkan kondisi geometri yang kompleks, lapisan tanah heterogen, serta beban yang berubah seiring waktu. Hal ini sangat membantu dalam menganalisis penurunan jangka pendek maupun jangka panjang akibat konsolidasi, terutama di daerah dengan tanah lunak atau berkompresi tinggi. Selain itu, hasil simulasi biasanya disajikan dalam bentuk visualisasi kontur deformasi, grafik penurunan, dan distribusi tegangan, yang memudahkan proses interpretasi dan pengambilan keputusan teknik.

METODE

PERHITUNGAN PENURUNAN METODE ANALITIS

Pendekatan analitis masih relevan dan banyak digunakan. Salah satu persamaan yang digunakan adalah milik Vesic (1977). Persamaan yang digunakan dalam penurunan pondasi tiang tunggal menurut Vesic (1977) adalah sebagai berikut:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 \quad (1)$$

Keterangan,

S = Penurunan tiang total (m).

S₁ = Penurunan batang tiang (m).

S₂ = Penurunan tiang akibat beban titik (m).

S₃ = Penurunan tiang akibat beban yang tersalur di sepanjang tiang (m).

Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan nilai penurunan batang tiang (S₁) adalah sebagai berikut:

$$S_1 = \frac{(Q_{wp} + \xi Q_{ws})L}{ApEp} \quad (2)$$

Keterangan,

- Qwp = Beban yang dipikul ujung tiang dibawah kondisi beban kerja (ton).
Qws = Beban yang dipikul kulit tiang dibawah kondisi beban kerja (ton).
Ap = Luas penampang tiang (m²).
L = Panjang tiang (m).
Ep = Modulus *Young* bahan tiang (ton/m²).
ξ = Tegangan geser.

Modulus Young bahan tiang didapatkan dari mutu bahan yang digunakan. Persamaan untuk nilai modulus Young adalah sebagai berikut:

$$E_p = 4700 \sqrt{f'c} \quad (3)$$

Keterangan,

f'c = mutu bahan tiang yang dimana digunakan 30 Mpa

Nilai dari tegangan geser bergantung pada sifat distribusi tahanan kulit sepanjang batang tiang. Distribusi f dianggap seragam sehingga memiliki nilai 0,5.

Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan nilai penurunan batang tiang (S2) adalah sebagai berikut:

$$S_2 = \frac{Q_{wp} C_p}{D q_p} \quad (4)$$

Keterangan,

- Cp = Koefisien empiris
D = Diameter tiang (m)
qp = Tahanan ujung batas tiang (ton)

Nilai Koefisien Empiris ditunjukkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Nilai Cp

Jenis tanah	Tiang Pancang	Tiang Bor
Pasir (padat ke lepas)	0,02-0,04	0,09-0,18
Lempung (kaku ke lunak)	0,02-0,03	0,03-0,06
Lanau (padat ke lepas)	0,03-0,05	0,09-0,12

Sumber: Das (2004)

Persamaan yang digunakan untuk mendapatkan nilai penurunan batang tiang (S3) adalah sebagai berikut:

$$S_3 = \frac{Q_{ws} C_s}{L q_p} \quad (5)$$

Keterangan,

Cs = Konstanta empiris

Nilai konstanta empiris didapatkan dari persamaan sebagai berikut:

$$C_s = \left(0,93 + 0,16 \sqrt{\frac{L}{D}} \right) C_p \quad (6)$$

SIMULASI PENURUNAN BERBASIS FINITE ELEMENT METHOD

Simulasi penurunan pada pondasi tiang tunggal dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak bantu geoteknik berbasis metode elemen hingga (*Finite Element Method/FEM*), yang dirancang khusus untuk menganalisis respons tanah terhadap beban struktural. Proses simulasi ini dilakukan secara sistematis melalui beberapa tahapan penting guna memastikan hasil yang representatif terhadap kondisi lapangan. Adapun tahapan-tahapan dalam simulasi ini dijelaskan sebagai berikut:

1. Pemodelan Geometri

Tahap awal dimulai dengan pemodelan geometri yang mencakup lapisan-lapisan tanah serta elemen struktur pondasi tiang tunggal. Model geometri dibuat sedemikian rupa agar menyerupai kondisi sebenarnya di lapangan, baik dari segi ukuran, bentuk, maupun kedalaman, dengan memperhatikan skala dan proporsi asli agar hasil simulasi dapat mencerminkan kondisi aktual.

2. Pendefinisian Material

Selanjutnya, dilakukan proses pendefinisian material, di mana sifat fisik dan mekanik dari tanah dimasukkan ke dalam perangkat lunak berdasarkan data hasil investigasi geoteknik, seperti uji laboratorium atau uji lapangan. Jenis material tanah dimasukkan per lapisan dengan tebal yang disesuaikan dengan kondisi lapangan. Selain itu, properti material dari tiang pondasi, seperti modulus elastisitas, berat jenis, dan parameter kekuatan lainnya, juga diinput untuk mendapatkan hasil analisis yang lebih akurat.

3. Pemberian Beban Aksial

Setelah material dan geometri ditetapkan, tahap berikutnya adalah pemberian beban aksial pada kepala tiang sesuai dengan beban rencana atau beban aktual yang bekerja di atas pondasi. Beban ini bisa bersifat statis maupun dinamis, tergantung pada kondisi kasus yang disimulasikan. Beban ditempatkan tepat di atas pondasi tiang yang sudah dimodelkan.

4. Proses Simulasi

Tahap terakhir melibatkan proses simulasi yang dilakukan secara bertahap atau *staged construction*, yang memungkinkan representasi urutan pelaksanaan konstruksi secara lebih realistis. Selama proses ini, perangkat lunak akan menghitung dan memvisualisasikan respon tanah terhadap beban, termasuk distribusi tegangan, regangan, dan deformasi vertikal (penurunan atau *settlement*) yang terjadi pada tiang pondasi.

Melalui tahapan-tahapan tersebut, simulasi ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai kinerja pondasi tiang tunggal terhadap beban vertikal yang diterimanya, sehingga dapat menjadi dasar pertimbangan teknis dalam perencanaan atau evaluasi struktur pondasi.

KOMPARASI HASIL PENURUNAN

Untuk mengetahui nilai perbedaan antara penurunan dengan metode analitis dan penurunan berbasis *finite element method*, digunakan persamaan rasio perbedaan sebagai berikut:

$$\text{Rasio perbedaan} = \frac{y-x}{y} \times 100\% \quad (7)$$

Keterangan,

Y = Nilai penurunan perhitungan analitis

X = Nilai penurunan berbasis FEM

**HASIL DAN PEMBAHASAN
HASIL PERHITUNGAN PENURUNAN METODE ANALITIS**

Pondasi yang direncanakan berupa pondasi tiang pancang. Pondasi memiliki kedalaman 17 meter dari permukaan tanah. Beban aksial tunggal yang dipikul pondasi sebesar 91,5 ton. Untuk menentukan Qwp yaitu 40% dari beban tiang tunggal dan Qws yaitu 60% dari beban tiang tunggal (Ridar & Khatib, 2015). Dari pernyataan tersebut didapatkan nilai Qwp 36,6 ton, sedangkan nilai Qws 54,9 ton.

Data tanah yang digunakan dalam perencanaan pondasi ditunjukkan pada tabel 2 berikut.

Tabel 2. Tabel Penurunan Pondasi Analitis

Kedalaman (m)	N-SPT	Tipe Tanah
0		
1	30	Pasir
2	19	Pasir
3	10	Pasir Berlanau
4	13	Lanau Berpasir
5	17	Pasir
6	15	Pasir
7	18	Lanau Berpasir
8	14	Lanau Berpasir
9	10	Lanau Berpasir
10	22	Lempung Berlanau
11	21	Pasir Berlanau
12	21	Pasir Berlanau
13	21	Pasir Berlanau
14	20	Pasir Berlanau
15	20	Pasir Berlanau
16	20	Pasir Berlanau
17	36	Lanau

Sumber: Data Proyek Jalan Tol (2024)

Hasil dari perhitungan penurunan pondasi dengan diameter 0,6 m secara analitis berdasarkan persamaan Vesic (1977) ditunjukkan pada Tabel 3 dan Tabel 4 berikut.

Tabel 3. Tabel Penurunan Pondasi Analitis

Kedalaman (m)	Qws (ton)	Qwp (ton)	ξ	Cp	Cs	qp (ton)
0						
1	36,6	54,9	0,5	0,04	0,94	111,9
2	36,6	54,9	0,5	0,04	0,94	81,1
3	36,6	54,9	0,5	0,04	0,94	55,3
4	36,6	54,9	0,5	0,04	0,95	50,4
5	36,6	54,9	0,5	0,04	0,95	56,6
6	36,6	54,9	0,5	0,04	0,95	56,0
7	36,6	54,9	0,5	0,04	0,95	64,7
8	36,6	54,9	0,5	0,04	0,95	55,3
9	36,6	54,9	0,5	0,04	0,95	44,8
10	36,6	54,9	0,5	0,04	0,95	69,6
11	36,6	54,9	0,5	0,04	0,96	72,1
12	36,6	54,9	0,5	0,04	0,96	79,0
13	36,6	54,9	0,5	0,04	0,96	78,3
14	36,6	54,9	0,5	0,04	0,96	75,8
15	36,6	54,9	0,5	0,04	0,96	75,2
16	36,6	54,9	0,5	0,04	0,96	74,6
17	36,6	54,9	0,5	0,04	0,96	114,4

Sumber: Hasil Pengolahan Data (2025)

Tabel 4. Tabel Penurunan Pondasi Analitis S1, S2, S3, S

Kedalaman (m)	S1 (m)	S2 (m)	S3 (m)	S (m)
0				
1	0,0001	0,022	0,460	0,482
2	0,0002	0,030	0,319	0,349
3	0,0003	0,044	0,312	0,357
4	0,0004	0,048	0,258	0,307
5	0,0004	0,043	0,184	0,228
6	0,0005	0,044	0,155	0,200
7	0,0006	0,038	0,115	0,154
8	0,0007	0,044	0,118	0,163
9	0,0008	0,055	0,130	0,185
10	0,0009	0,026	0,075	0,102
11	0,0010	0,034	0,066	0,101
12	0,0011	0,031	0,056	0,088
13	0,0011	0,031	0,052	0,084
14	0,0012	0,032	0,050	0,083
15	0,0013	0,032	0,047	0,081
16	0,0014	0,033	0,044	0,078
17	0,0015	0,021	0,027	0,050

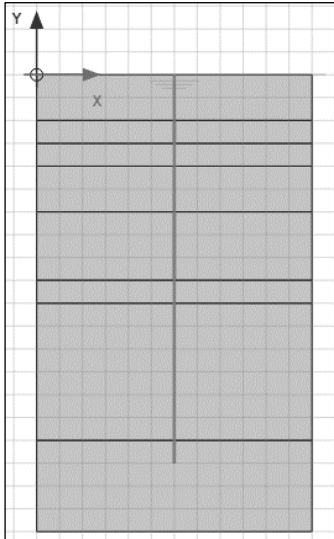
Sumber: Hasil Pengolahan Data (2025)

Berdasarkan hasil perhitungan tersebut, penurunan yang terjadi pada pondasi tiang tunggal pada kedalaman 17 m dari permukaan memiliki nilai sebesar 0,050 m. Berdasarkan peraturan AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications*, hasil penurunan menunjukkan bahwa pondasi masih berada dalam batas toleransi penurunan yang diizinkan yaitu sebesar 0,05 m, sehingga masih dianggap aman terhadap resiko deformasi berlebih yang dapat berpengaruh pada keamanan dan kenyamanan struktur di atasnya.

HASIL SIMULASI PENURUNAN BERBASIS FEM

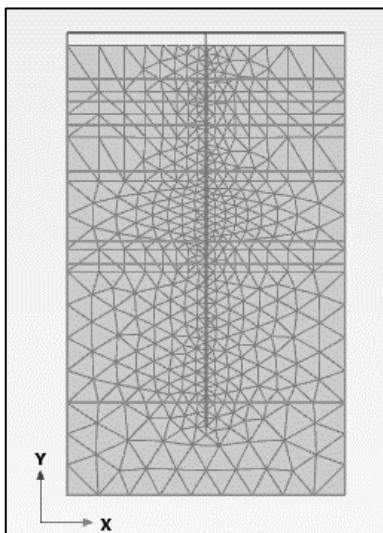
Tahap pertama dalam proses simulasi penurunan dilakukan dengan membuat model perlapisan tanah yang sesuai dengan kondisi tanah aktual di lapangan. Permodelan ini didasarkan pada hasil penyelidikan tanah yang berupa data borlog. Setiap lapisan tanah dimodelkan dengan ketebalan yang sesuai sehingga karakter geoteknis dapat tergambarkan secara akurat dalam analisis. Ketebalan ini penting karena berpengaruh terhadap besarnya penurunan yang dihitung pada tahap selanjutnya.

Hasil permodelan dari lapisan struktur tanah dan pondasi tiang tunggal pada perangkat lunak berbasis FEM ditunjukkan pada gambar 1 berikut.



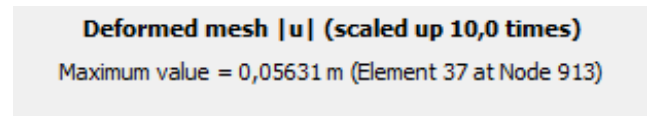
Gambar 1. Pemodelan dari Struktur Tanah dan Pile Berbasis FEM
Sumber: Penulis (2025)

Setelah model selesai dibuat, beban tiang tunggal diletakkan arah vertikal tepat diatas pondasi. Hasil dari simulasi penurunan pondasi tiang tunggal dengan diameter 0,6 m ditunjukkan pada gambar 2 berikut.



Gambar 2. Hasil Simulasi Penurunan Pondasi Tiang Tunggal Berbasis FEM
Sumber: Penulis (2025)

Hasil simulasi penurunan tiang tunggal berbasis FEM mempunyai nilai maksimal 0,05631 m yang ditunjukkan pada gambar 3 berikut.



Gambar 3. Hasil Simulasi Penurunan Pondasi Tiang Tunggal Berbasis FEM
Sumber: Penulis (2025)

Hasil tersebut sedikit melampaui batas penurunan yang diizinkan dari AASHTO LRFD *Bridge Design Specifications*, yang menyatakan bahwa penurunan pondasi pada jembatan maksimum senilai 50 mm atau 0,05 m. Namun menurut SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik besar penurunan maksimum tidak dinyatakan sebagai angka pasti, melainkan berdasarkan toleransi struktur atas dan fungsi struktur. Nilai tersebut masih bisa diterima jika struktur atas memiliki fleksibilitas yang memadai.

KOMPARASI HASIL PENURUNAN

Komparasi dari hasil penurunan antara metode analitis dan metode elemen hingga (FEM) dapat dilihat dari rasio perbedaan sebagai berikut.

$$\text{Rasio perbedaan} = \frac{0,056 - 0,050}{0,056} \times 100\% \quad (7)$$
$$= 0,11 \%$$

Dari rasio yang menunjukkan nilai deviasi dibawah 5% memberikan hasil yang saling mendukung dan konsisten. Hal tersebut dikarenakan tidak berdampak signifikan pada keputusan desain dan menunjukkan konsistensi antar metode baik analitis maupun numerik. Simulasi dari permodelan FEM dapat diterima dan divalidasi oleh hasil perhitungan analitis.

SIMPULAN

Berdasarkan hasil pengolahan data dan analisis yang telah dilakukan pada penelitian ini, terdapat kesimpulan yang dapat diambil yaitu:

1. Penurunan pondasi tiang tunggal yang dihitung dengan menggunakan metode analitis menghasilkan nilai sebesar 0,050 meter. Sedangkan, hasil simulasi dari perangkat lunak berbasis metode elemen hingga (FEM) menunjukkan nilai penurunan terjadi sebesar 0,056 meter.
2. Hasil perhitungan dari kedua metode menunjukkan selisih yang relatif kecil, hal tersebut mengindikasikan bahwa baik metode analitis maupun metode elemen hingga (FEM) mampu memberikan perkiraan penurunan yang sebanding dalam konteks kasus pada penelitian ini.
3. Berdasarkan perhitungan rasio perbedaan antara kedua metode, didapatkan nilai deviasi hanya sebesar 0,11%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa hasil kedua metode konsisten dan saling mendukung. Dengan

demikian, dapat disimpulkan bahwa metode analitis dan FEM memiliki tingkat efisiensi dan keakuratan yang hampir sama dalam memperkirakan penurunan pondasi tiang tunggal yang akan terjadi, sehingga kedua metode layak digunakan sebagai pendekatan teknik dalam desain bangunan geoteknik.

DAFTAR PUSTAKA

- Brinkgreve, R. B. J., Bürg, M., Andreykiv, A., & Lim, L. J. (2015). *Beyond the Finite Element Method in Geotechnical Analysis*. <https://hdl.handle.net/20.500.11970/102525>
- Chaerania, A., Rouf, A. Y. H., & Utomo, N. (2024). Analisis Perbandingan Penurunan Pondasi Tiang Bor berdasarkan Data Tes Aksial dengan Data Perhitungan pada BP03 P064 Elevated STA 55+551 Proyek Pembangunan Jalan Tol Solo-Yogyakarta-NYIA Kulon Progo Seksi 2 Paket 2.2B. *Jurnal Teknik Sipil UNPAL*, 14(2).
- Dananjaya, R. H., Sutrisno, & Wellianto, F. A. (2022). AKURASI PENGGUNAAN METODE SUPPORT VECTOR MACHINE DALAM PREDIKSI PENURUNAN PONDASI TIANG. *Matriks Teknik Sipil*, 10(3), 298. <https://doi.org/10.20961/mateksi.v10i3.64519>
- Fakhrudin, L., Hidayat, A. K., & Sari, N. K. (2022). ANALISIS DAYA DUKUNG DAN PENURUNAN PONDASI TIANG BOR (BORED PILE) MENGGUNAKAN PROGRAM ALLPILE 7.3B (Studi Kasus: Pada Jalan Bebas Hambatan Cismudawu Phase III Access I pada P.10 dan P.13).
- Hardiyatmo, H. C. (2008). *TEKNIK FONDASI II*.
- Mahmudi, A. (2021). *PENGARUH PENURUNAN PONDASI TIANG PANCANG AKIBAT DRAWDOWN*. 3.
- Muhshi, M., Ika Putra, A., & Agus Nugroho, S. (2020). *PEMETAAN PENURUNAN ELASTIS FONDASI TIANG BERDASARKAN DATA SONDIR KOTA PEKANBARU*.
- Potts, D. M., & Zdravković, L. (1999). *Finite Element Analysis in Geotechnical Engineering: Theory*. Thomas Telford Publishing.
- Ridar, M., & Khatib, A. (2015). *TINJAUAN DAYA DUKUNG DAN PENURUNAN PONDASI SUMURAN DI PEMUDA CITY WALK DI JL. PEMUDA PEKANBARU PROPINSI RIAU* (Vol. 15, Issue 1).
- Rumbyarso, Y. P. A., & Pribadi, G. (2024). *Analisis Kapasitas Daya Dukung Bore Pile Pada Proyek Gedung Fakultas Hukum Unisulla Semarang Jawa Tengah*. 2(1), 1–5. <https://doi.org/10.32699>
- Sartika Hutapea, D., Roesyanto, & Iskandar, R. (2021). Analisis Daya Dukung dan Penurunan Pondasi Tiang Bor dengan Plaxis 3D terhadap Hasil Loading Test. *Jurnal Syntax Admiration*, 2(6), 1007–1026. <https://doi.org/10.46799/jsa.v2i6.255>
- Susila, E., & Apoji, D. (2012). Settlement of a Full Scale Trial Embankment on Peat in Kalimantan: Field Measurements and Finite Element Simulations. *Desember*, 19(3).
- Tahismasari, S., Darmiyanti, L., & Rodji, A. P. (2024). *Analisis Perbandingan Daya Dukung Dan Penurunan Pondasi Bored Pile Berdasarkan Data SPT*.
- Tampubolon, G., Roesyanto, & Hasibuan, G. C. R. (2024). *Analisis Daya Dukung & Penurunan Bored Pile 80cm di Proyek Kompleks Kantor-Apartemen dengan Metode Analitis & Elemen Hingga*.
- Tarigan, B., Gandi, S., & Yani, M. I. (2020). *ANALISIS DAYA DUKUNG PILE SLAB JEMBATAN LAYANG JALAN BUKIT RAWI KALIMANTAN TENGAH* (Vol. 3).
- Tjitradi, D., Eliatun, & Tjitradi, O. S. (2021). *Pemodelan Penurunan Pondasi Struktur Bangunan di Tanah Lunak Kota Banjarmasin Menggunakan ANSYS*.
- Wulandari, T. E. (2021). Prediksi Penurunan Konsolidasi Menggunakan Preloading dan Prefabricated Vertical Drain dengan Software Metode Elemen Hingga Prediction of Consolidation Settlement Using Preloading and Prefabricated Vertical Drain with Finite Element Method Software. *JCEBT*, 5(2). <http://ojs.uma.ac.id/index.php/jcebt>
- Zain, R., Azizi, A., & Salim, M. A. (2021). ANALISIS DAYA DUKUNG DAN PENURUNAN PONDASI TIANG BOR PADA PROYEK PEMBANGUNAN GEDUNG K UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH PURWOKERTO. In *Hal* (Vol. 2, Issue 2). <http://jurnalnasional.ump.ac.id?index.php/civeng>