



EVALUASI DAYA DUKUNG DAN PENURUNAN FONDASI *BORED PILE* BERDASARKAN UJI SLT DAN SIMULASI SOFTWARE PLAXIS 3D

(Studi Kasus: Pembangunan Gedung Monumen dan Museum Reog Ponorogo)

Moch. Husaini ¹, Arik Triarso ²

^{1,2} Program Studi D4 Teknik Sipil, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya

E-mail: mochhusaini.22046@mhs.unesa.ac.id¹, ariktriarso@unesa.ac.id²

ABSTRACT

*The Monument and Museum of Reog Ponorogo (MMRP) Building Phase 1 is a 126 meter-tall monumental structure supported by bored pile foundations (D=100 cm). A discrepancy between designed pile depth (27 m) and installed depth (19 m) necessitated a technical evaluation against SNI 8460:2017. This study evaluates bearing capacity and settlement using three approaches: Static Load Test (SLT), Plaxis 3D numerical simulation, and Luciano Decourt (1982). Back-analysis calibrated the model against SLT data; deviation at peak load (800 ton) was only 1.96% (Plaxis 3D: 1.50 mm vs. SLT: 1.53 mm). Qult values converged at 1,050 ton (SLT-Davisson), 1,000 ton (Plaxis 3D), and 1,013 ton (Luciano Decourt). SF ranged 3.75-3.93 (≥ 2.5 required). Single-pile settlement was 0.48 mm; group PC-3 settlement was 3.06 mm (Plaxis 3D) and 36.47 mm (Vesic, 1977), both within allowable limits. UR ranged 25.3%-26.6% ($\leq 40\%$). Thus, the existing bored pile foundation for MMRP Phase 1 is deemed safe and meets all safety and service requirements in accordance with SNI 8460:2017. **Keywords:** Bored Pile, Static Load Test, Plaxis 3D, Bearing Capacity, Settlement*

ABSTRAK

Gedung Monumen dan Museum Reog Ponorogo (MMRP) Tahap 1 merupakan bangunan monumental setinggi 126 meter yang menggunakan fondasi *bored pile* berdiameter 100 cm. Dalam proses pelaksanaan, terdapat ketidaksesuaian antara kedalaman fondasi rencana (27 m) dengan kondisi yang terpasang di lapangan (19 m), sehingga diperlukan evaluasi teknis guna memastikan fondasi eksisting tetap memenuhi standar keamanan yang berlaku. Penelitian ini bertujuan mengevaluasi daya dukung dan penurunan fondasi *bored pile* eksisting melalui tiga pendekatan, yakni pengujian *Static Load Test* (SLT), simulasi numerik Plaxis 3D, dan metode analitik Luciano Decourt (1982), serta Vesic (1977) sebagai kontrol komparatif, dengan acuan SNI 8460:2017. Model Plaxis 3D dikembangkan melalui pendekatan back-analysis berbasis data SLT dan divalidasi pada beban puncak 200% beban kerja (800 ton).

Article History

Received: Juli 2026

Reviewed: Juli 2026

Published: Juli 2026

Plagiarism Checker No
237.u873247.fh8374

Copyright : Author

Publish by : Kohesi



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Deviasi penurunan antara simulasi dan pengujian aktual hanya 1,96% (Plaxis 3D: 1,50 mm; SLT: 1,53 mm), sehingga model dinyatakan valid. Kapasitas daya dukung ultimit (Qult) dari ketiga metode konvergen, yakni 1.050 ton (SLT-Davisson), 1.000 ton (Plaxis 3D), dan 1.013 ton (Luciano Decourt), dengan selisih 3,5-5,0%. Faktor keamanan (SF) tiang tunggal berkisar 3,75-3,93, seluruhnya melampaui batas minimum $SF \geq 2,5$. Penurunan tiang tunggal pada beban kerja aktual sebesar 0,48 mm, sementara penurunan kelompok PC-3 sebesar 3,06 mm (Plaxis 3D) dan 36,47 mm (Vesic, 1977), keduanya di bawah batas izin SNI 8460:2017. Rasio utilisasi (UR) berkisar $25,3\%-26,6\% \leq 40\%$. Dengan demikian, fondasi *bored pile* eksisting MMRP Tahap 1 dinyatakan aman dan memenuhi seluruh persyaratan keamanan dan layanan sesuai SNI 8460:2017.

Kata Kunci: *Bored Pile, Static Load Test, Plaxis 3D, Daya Dukung, Penurunan*

1. PENDAHULUAN

Struktur truktur bangunan gedung secara umum terbagi menjadi dua bagian, yaitu struktur atas (*upper structure*) berupa kolom, balok, dan pelat, serta struktur bawah (*sub structure*) berupa fondasi yang tertanam di dalam tanah. Fondasi adalah elemen struktur bawah tanah yang berfungsi menahan dan menyalurkan beban dari struktur atas ke lapisan tanah keras [1]. Kapasitas dukung fondasi didefinisikan sebagai kemampuan sistem fondasi dalam memikul dan mentransfer beban struktural tanpa memicu kegagalan geser (*shear failure*) maupun deformasi ekstrem, sementara penurunan (*settlement*) merepresentasikan perpindahan vertikal akibat proses kompresi pada massa tanah di bawah dasar fondasi.

Proyek Pembangunan Gedung Monumen dan Museum Reog Ponorogo (MMRP) Tahap 1 terletak di Kawasan Pegunungan Kapur Putih, Desa Sampung, Kabupaten Ponorogo. Bangunan setinggi 126 meter ini memikul beban terpusat besar dari patung monumen Reog seberat ± 1.800 ton di atasnya. Hasil penyelidikan tanah menggunakan metode *Standard Penetration Test* (SPT) pada titik bor BH-1 dan BH-2 menunjukkan stratigrafi yang didominasi batuan kapur putih (*white limestone*) dengan konsistensi sangat padat (*very dense*), di mana nilai N-SPT yang tinggi ($N > 60$) sudah dijumpai pada kedalaman 2,5 meter dan konsisten hingga kedalaman 30 m tanpa ditemukannya lapisan lunak.

Karakteristik tanah keras di lokasi proyek menjadi alasan kuat pemilihan fondasi *bored pile* untuk Gedung MMRP, karena kemampuannya menyalurkan beban ke lapisan tanah keras secara efektif, sekaligus meminimalkan gangguan getaran selama konstruksi [2]. Perencanaan awal menetapkan *bored pile* berdiameter 100 cm dengan kedalaman 27 meter dari dasar *pile cap*, namun realisasi di lapangan (*as-built*) fondasi terpasang pada kedalaman efektif 19 meter. Perubahan semacam ini tidak jarang terjadi dalam praktik konstruksi, meski demikian fondasi yang terpasang tetap memerlukan evaluasi teknis komprehensif untuk memastikan pemenuhan



kriteria keamanan struktural dan batas layanan yang disyaratkan, selaras dengan prinsip *Quality Assurance* (QA) dalam geoteknik [3].

Sebagai bagian dari pengendalian mutu, telah dilakukan pengujian *Static Load Test* (SLT) pada tiang uji P-58 sesuai standar ASTM D1143. SLT memberikan representasi langsung perilaku aktual fondasi terhadap beban aksial dan menjadi dasar penting dalam penilaian kinerja fondasi [4]. Seiring perkembangan teknologi geoteknik, penggunaan Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method/FEM*) melalui perangkat lunak Plaxis 3D semakin banyak diterapkan untuk mensimulasikan daya dukung dan penurunan fondasi secara numerik. Keunggulan Plaxis 3D terletak pada kemampuan memodelkan geometri tiga dimensi serta mensimulasikan perilaku *non-linear* interaksi tanah-struktur, distribusi tegangan pada kelompok tiang, dan pola deformasi tanah yang mendekati kondisi aktual [5].

Beberapa penelitian sebelumnya telah mengkaji evaluasi fondasi *bored pile* dengan menggunakan *software* Plaxis 3D terhadap data uji lapangan. Mungkur dkk., (2025) memperoleh deviasi penurunan model Plaxis 3D terhadap SLT hanya 0,33% pada fondasi *bored pile* berdiameter 80 cm, sedangkan Sundari dkk., (2024) mendapatkan deviasi Qult antara Plaxis 3D dan SLT sebesar 4%. menunjukkan bahwa deviasi Qult antara Plaxis 3D dan PDA Test sebesar 11,2% masih dalam batas toleransi. Kebaruan penelitian ini terletak pada penerapan pendekatan *settlement-based capacity* pada Plaxis 3D terhadap data penurunan SLT pada kondisi tanah sangat keras.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan mengevaluasi daya dukung aksial dan penurunan fondasi *bored pile* eksisting MMRP Tahap 1 secara komprehensif melalui tiga pendekatan, yakni pengujian lapangan (SLT), simulasi numerik Plaxis 3D yang dikalibrasi melalui analisis balik (*back-analysis*) terhadap data SLT, dan perhitungan empiris (Luciano Decourt, 1982 dan Vesic, 1977) sebagai kontrol komparatif. Ketiga pendekatan ini kemudian dibandingkan untuk menilai kesesuaian kapasitas fondasi eksisting Gedung MMRP berdiameter 100 cm dan kedalaman 19 m terhadap beban rencana struktur, faktor keamanan, batas penurunan, serta rasio utilisasi sesuai SNI 8460:2017 tentang Persyaratan Perancangan Geoteknik. Hasil evaluasi diharapkan dapat menjadi referensi teknis dalam menilai kinerja fondasi *bored pile* pada lapisan tanah keras berbatuan kapur, sekaligus menjadi kajian mengenai validasi model numerik geoteknik berbasis data uji lapangan aktual (SLT).

TINJAUAN PUSTAKA

Parameter Tanah dan Korelasi N-SPT

Penentuan parameter tanah sebagai *input* pemodelan numerik dilakukan melalui korelasi terhadap nilai N-SPT hasil uji lapangan dan pengujian tanah laboratorium. Parameter tanah yang umumnya digunakan mencakup, sudut geser dalam (ϕ), kohesi *undrained* (C_u), berat volume tanah kering (γ_{dry}), berat volume tanah jenuh (γ_{sat}), modulus elastisitas tanah (E_s), rasio angka pori (e), rasio angka *paisson* (ν'), dan sudut dilatasi (ψ) [8]. Setiap parameter geoteknik diperoleh melalui sumber korelasi yang berbeda sesuai jenis tanah dan sifat parameter yang bersangkutan, dengan rincian sebagai berikut:

- Berat volume tanah (γ_{dry} , γ_{sat}) dan angka pori (e) diperoleh dari pengujian laboratorium pada sampel BH-1.



- Kohesi *undrained* koreksi (Cu') dikoreksi menggunakan faktor $2/3Cu_{lab}$ untuk merepresentasikan perilaku batuan kapur yang terpengaruh proses pelarutan jangka panjang (menyerupai *hard clay*).
- Modulus elastisitas efektif (E'_{50} , E'_{oed} , E'_{ur}) diturunkan dari nilai Cu' hasil koreksi.
- Sudut geser dalam (ϕ) pada kondisi aktual yang terkoreksi ($\phi' = 2/3\phi$ dan sudut dilatansi ($\Psi = \phi - 30^\circ$).
- *Poisson ratio* (ν') ditentukan terhadap Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Korelasi *Poisson Ratio* (ν')

Jenis Tanah	<i>Poisson Ratio</i> (ν')
Lempung Jenuh	0,4 - 0,5
Lempung tak jenuh	0,1 - 0,3
Lempung berpasir	0,2 - 0,3
Lanau	0,3 - 0,35
Pasir padat	0,2 - 0,4
Pasir kasar ($e = 0,4 - 0,7$)	0,15
Pasir halus ($e = 0,4 - 0,7$)	0,25
Batu	0,1 - 0,4
<i>Loess</i>	0,1 - 0,3

(Sumber: Hardiyatmo (1994) dalam Tugas Akhir Romadhoni, 2022)

Pengujian *Static Load Test* (SLT)

Static Load Test (SLT) adalah pengujian pembebanan langsung di lapangan yang bertujuan memverifikasi kapasitas daya dukung aktual sebuah tiang terpasang, sekaligus mengamati besar penurunan yang timbul akibat pembebanan tersebut. Pengujian dilakukan dengan menerapkan beban secara bertahap pada kepala tiang melalui sistem hidrolik, kemudian mencatat penurunan yang terjadi pada setiap tahap hingga mencapai beban uji maksimum.

Menurut SNI 8460:2017, besar beban uji untuk tiang ditetapkan sebesar 200% dari beban rencana dengan batas toleransi penurunan total tidak melebihi 4% dari diameter tiang untuk tiang berdiameter di atas 800 mm. *Output* utama pengujian ini berupa kurva hubungan beban-penurunan, yang selanjutnya menjadi dasar interpretasi kapasitas daya dukung tiang sekaligus acuan validasi model numerik.

Tiga metode interpretasi yang lazim digunakan dalam penentuan daya dukung yaitu metode Davisson (1972), Chin Fung Kee (1970), dan Mazurkiewicz (1972). Ketiga metode ini banyak dipakai secara bersamaan pada berbagai studi evaluasi *bored pile* karena masing-masing memiliki kriteria ekstrapolasi kurva yang berbeda [9].

Pemodelan Simulasi Numerik Plaxis 3D

Analisis numerik dilakukan menggunakan perangkat lunak Plaxis 3D berbasis Metode Elemen Hingga (*Finite Element Method*). *Software* ini dirancang untuk memodelkan deformasi, stabilitas, dan aliran air tanah pada berbagai jenis konstruksi geoteknik seperti fondasi, dinding penahan tanah, terowongan, dan timbunan.



Dua model konstitutif tanah yang umum digunakan dalam analisis fondasi tiang adalah *Mohr-Coulomb* (MC) dan *Hardening Soil* (HS). Model HS mempertimbangkan tiga nilai kekakuan berbeda, yaitu E_{50ref} , E_{oedref} , dan E_{urref} , sehingga lebih representatif dalam menggambarkan perilaku tanah pada kondisi pembebanan bertahap maupun siklik seperti pada simulasi SLT [10]. Kapasitas ultimit (Q_{ult}) hasil simulasi *software* Plaxis 3D ditentukan melalui pendekatan berbasis penurunan (*settlement-based capacity*), yaitu beban pada simulasi yang menghasilkan penurunan mendekati penurunan aktual hasil SLT.

Pemodelan fondasi *bored pile* tiang tunggal pada *software* Plaxis 3D meliputi empat tahapan utama:

- Pendefinisian profil tanah (*soil*),
- Pemodelan struktur tiang (*structures*),
- Pembagian elemen jaring (*mesh*), dan
- Simulasi konstruksi bertahap (*staged construction*).

Staged construction terdiri dari:

- *Phase 0* (tegangan awal tanah dengan prosedur K_0),
- *Phase 1* (aktivasi elemen tiang dan *interface*), serta
- *Phase 2* hingga seterusnya (pembebanan bertahap sesuai siklus SLT hingga 200% beban kerja, dilanjutkan fase estimasi kapasitas dengan penambahan beban bertahap hingga kondisi *failure*).

Kriteria validasi model numerik dipastikan melalui prosedur analisis balik (*back-analysis*), yaitu proses kalibrasi parameter tanah secara iteratif hingga kurva *load-settlement* hasil simulasi mendekati kurva hasil SLT aktual dengan deviasi penurunan kurang dari 10% ($S < 10\%$) [10].

Kapasitas Daya Dukung Fondasi *Bored Pile*

a) Analisis Kapasitas Tiang Tunggal

Secara prinsip, kapasitas daya dukung ultimit tiang tunggal (Q_u) merupakan penjumlahan tahanan ujung (Q_p) dan tahanan selimut (Q_s). Pada penelitian ini, perhitungan analitik menggunakan metode Luciano Decourt (1982) berdasarkan korelasi N-SPT terkoreksi, dengan persamaan berikut [2].

$$N' = 15 + 0,5 \times (N - 15) \quad (1)$$

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (2)$$

$$Q_u = \left(\alpha \times A_p \times N_p \times K \right) + \left(\beta \times A_s \times \left(\frac{N_s}{3} + 1 \right) \right)$$

Dimana:

N = Jumlah pukulan asli di lapangan atau N-SPT lapangan.

N' = Nilai N-SPT terkoreksi.

Q_u = Daya dukung (ton)

Q_p = Daya dukung ujung tiang (ton)

Q_s = Daya dukung selimut tiang (ton)

α = Koefisien dasar tiang

β = Koefisien selimut tiang

A_p = Luas penampang tiang (m^2)

A_s = Luas selimut tiang (m^2)



N_p = Nilai Rata-rata N-SPT = $\frac{N_{p1} + N_{p2}}{2}$

N_{p1} = Nilai rerata N-SPT kedalaman 4D di bawah ujung tiang

N_{p2} = Nilai rerata N-SPT kedalaman 4D di atas ujung tiang

D = Diameter tiang

N_s = Nilai rata-rata N-SPT sepanjang tiang

Tabel 2. Nilai Koefisien K (Luciano Decourt, 1987)

Jenis Tanah	K (t/m ²)
Lempung	12
Lanau berlempur	20
Lanau berpasir	25
Pasir	40

Tabel 3. Koefisien Dasar (α)

Soil/Pile	Driven Pile	Bored Pile	Bored Pile (Bentonite)	Continuous Hollow Anger	Root Pile	Injected Pile (High Pressure)
Clay	1,00	0,85	0,85	0,30	0,85	1,00
Intermediate Soils	1,00	0,60	0,60	0,30	0,60	1,00
Sands	1,00	0,50	0,50	0,30	0,50	1,00

Tabel 4. Koefisien Selimut Tiang (β)

Soil/Pile	Driven Pile	Bored Pile	Bored Pile (Bentonite)	Continuous Hollow Anger	Root Pile	Injected Pile (High Pressure)
Clay	1,00	0,80	0,90	1,00	1,50	3,00
Intermediate Soils	1,00	0,65	0,75	1,00	1,50	3,00
Sands	1,00	0,50	0,60	1,00	1,50	3,00

b) Analisis Kapasitas Tiang Kelompok

• Efisiensi Kelompok Tiang (E_g)

Adapun persamaan untuk menghitung efisiensi kelompok tiang menggunakan metode *Convere-Labarre formula* dapat dilihat pada persamaan berikut.

$$E_g = 1 - \theta \frac{(n' - 1)m + (m - 1)n'}{90.m.n'} \quad (3)$$

Dimana:

E_g = Efisiensi kelompok tiang

m = Jumlah baris tiang

n' = Jumlah tiang dalam satu baris

θ = Jarak pusat ke pusat tiang

D = Diameter tiang

• Kapasitas Dukung *Ultimate* Tiang Kelompok

Kapasitas dukung tiang kelompok dengan memperhatikan faktor efisiensi tiang dinyatakan dengan persamaan berikut.

$$Q_g = E_g \times n \times Q_a \quad (4)$$

Dimana:

Q_g = Beban maksimum kelompok tiang



Eg = Efisiensi kelompok tiang
n = Jumlah tiang dalam kelompok
Qa = Kapasitas dukung izin tiang

• Distribusi Beban Tiang Kelompok

Kontrol fondasi tiang kelompok terhadap gaya dan momen yang akan terjadi pada setiap fondasi dengan persamaan sebagai berikut.

$$P_i = \frac{V}{n} \pm \frac{M_y \cdot x_i}{\sum x^2} \pm \frac{M_x \cdot y_i}{\sum y^2} \quad (5)$$

Dimana:

P = Beban aksial pada tiang ke-i
V = Jumlah beban vertikal yang bekerja pada pusat kelompok tiang
Mx = Momen yang bekerja pada bidang yang tegak lurus sumbu x
My = Momen yang bekerja pada bidang yang tegak lurus sumbu y
n = Jumlah tiang *bore pile* dalam satu *pile cap*
xi, yi = Jarak ke pusat berat kelompok tiang ke tiang nomor-i
 $\sum x^2, \sum y^2$ = Jumlah kuadrat jarak tiap-tiap tiang ke pusat kelompok

c) Daya Dukung Izin Tiang (Qa)

Hardiyatmo (2010) menyatakan bahwa untuk tiang dengan pembesaran pada ujung dasar dan diameter $d < 2m$, digunakan faktor keamanan sebesar 2,5. Nilai daya dukung izin tiang (Qa) dapat dirumuskan dalam persamaan berikut.

$$Qa = \frac{Q_{ult}}{SF} \quad (6)$$

Dimana:

Qa = Daya dukung izin tiang (ton)
Qult = Daya dukung ultimit tiang (ton)
SF = Safety Factor atau Faktor keamanan

Penurunan Fondasi *Bored Pile*

Penurunan fondasi dihitung menggunakan metode Vesic (1977), yang mempertimbangkan kompresi elastis batang tiang serta deformasi tanah di sekitar ujung dan selimut tiang.

a) Penurunan Tiang Tunggal

Penurunan tiang tunggal (S) diestimasi menggunakan persamaan pendekatan berikut [11].

$$S = \frac{D}{100} + \frac{q \times L}{A_p \times E_p} \quad (7)$$

Dimana:

S = Penurunan total di kepala tiang (mm)
D = Diameter tiang (m)
q = Beban kerja tiang (kN)
Ap = Luas penampang tiang (m²)
L = Panjang tiang (m)
Ep = Modulus elastisitas tiang (kN/m²)

Adapun Adapun batas izin penurunan untuk tiang tunggal, yakni $S_{izin} = 25$ mm dengan $S < S_{izin}$ [10]



b) Penurunan Tiang Kelompok

Penurunan tiang kelompok (S_g) diturunkan dari penurunan tiang tunggal melalui faktor perbesaran lebar kelompok (B_g) menurut persamaan berikut [11].

$$S_g = S \times \sqrt{\frac{B_g}{D}} \quad (8)$$

Dimana:

S_g = Penurunan fondasi kelompok tiang (mm)

S = Penurunan fondasi tiang tunggal (mm)

B_g = Lebar efektif kelompok tiang (mm)

$$= B_g = (m-1)d + \left(2 \left(\frac{D}{2}\right)\right)$$

d = Jarak antar tiang $\times D$ (mm)

D = Diameter tiang tunggal (mm)

Adapun batas izin penurunan untuk tiang kelompok, yakni $S_{izin} = 15 \text{ cm} + b/600$ (b dalam satuan cm) (SNI 8460:2017 Pasal 9.2.4.3).

Evaluasi Fondasi *Bored Pile*

Evaluasi kinerja fondasi *bored pile* difokuskan pada tiga parameter utama, yaitu faktor keamanan (SF), besaran penurunan, dan rasio utilitas (UR), yang seluruhnya dibandingkan terhadap batas minimum yang disyaratkan SNI 8460:2017 untuk kategori bangunan monumental.

a) Faktor Keamanan (SF)

Faktor keamanan atau *safety factor* (SF) terhadap kapasitas dukung tiang, dengan syarat minimum $SF \geq 2,5$ untuk fondasi *bored pile* tanpa pembesaran ujung [13], evaluasi dilakukan dengan persamaan berikut.

1. Tiang Tunggal

$$\frac{Q_{ult}}{P_u} \geq SF = 2,5 \quad (9)$$

Dimana:

SF = Faktor keamanan

Q_{ult} = Daya dukung *ultimate* tiang tunggal (ton)

P_u = Beban aksial per tiang (ton)

2. Tiang Kelompok

$$\frac{Q_{q,ult}}{P_u} \geq SF = 2,5 \quad (10)$$

Dimana:

SF = Faktor keamanan

$Q_{q,ult}$ = Daya dukung *ultimate* tiang kelompok (ton)

P_u = Beban aksial terfaktor dalam satu *pile cape* (ton)

b) Penurunan Izin

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan sesuai dengan persamaan berikut.

$$S \leq S_{izin} \quad (11)$$

Dimana:

S = Penurunan total hasil simulasi pada beban kerja (mm)

Sizin = Batas penurunan izin yang disyaratkan (mm)

c) Rasio Utilitas (UR)

Rasio utilisasi (UR) yang menggambarkan tingkat pemanfaatan kapasitas fondasi terhadap beban kerja. Hal ini penting untuk memastikan bahwa fondasi masih memiliki cadangan kapasitas yang memadai terhadap kemungkinan penambahan beban maupun ketidakpastian jangka panjang, sehingga tidak hanya aman secara struktural namun juga efisien dari segi pemanfaatan kapasitas material. rasio utilitas dihitung dengan persamaan berikut [14].

$$UR = \frac{P_u}{n \times Q_{ult}} \times 100\% \leq 40\% \quad (12)$$

Dimana:

UR = Rasio Utilitas (*Utilization Ratio*) (%)

P_u = Beban aksial total terfaktor dari struktur atas (ton)

n = Jumlah tiang (bh)

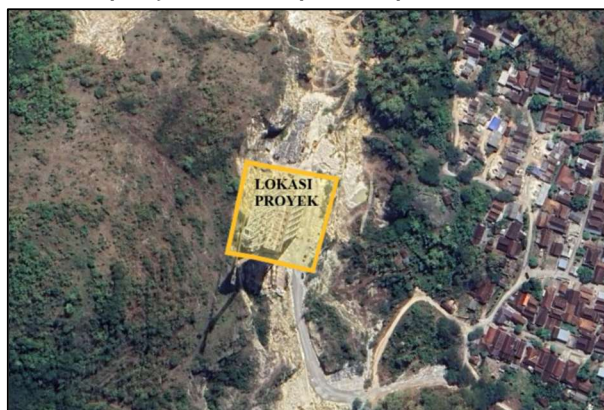
Q_{ult} = Daya dukung *ultimate* kelompok tiang (ton)

Dengan persyaratan $SF \geq 2,5$, maka target nilai UR harus $\leq 40\%$. Jika $UR > 40\%$, maka fondasi tidak memiliki cadangan kekuatan yang cukup dan dinyatakan tidak aman menurut standar yang berlaku.

2. METODE PENELITIAN

2.1 Lokasi dan Objek Penelitian

Objek penelitian adalah fondasi *bored pile* eksisting pada Proyek Pembangunan Gedung MMRP Tahap 1 yang berlokasi di kawasan Pegunungan Kapur Putih (Gunung Gamping), Desa Sampung, Kecamatan Sampung, Kabupaten Ponorogo, Jawa Timur. Gedung ini memiliki 26 lantai dengan ketinggian total 126 m, berdiri di atas lahan seluas $\pm 5.384,97 \text{ m}^2$ dengan luas bangunan $11.254,7 \text{ m}^2$. Evaluasi difokuskan pada kelompok tiang eksisting tipe PC-3 yang terdiri dari 16 tiang *bored pile* berdiameter 100 cm dengan kedalaman terpasang 19 m. Salah satu titik tiangnya yakni P-58 berfungsi sebagai tiang uji SLT yang menjadi dasar validasi model numerik Plaxis 3D. Peta lokasi proyek ditampilkan pada Gambar 1.

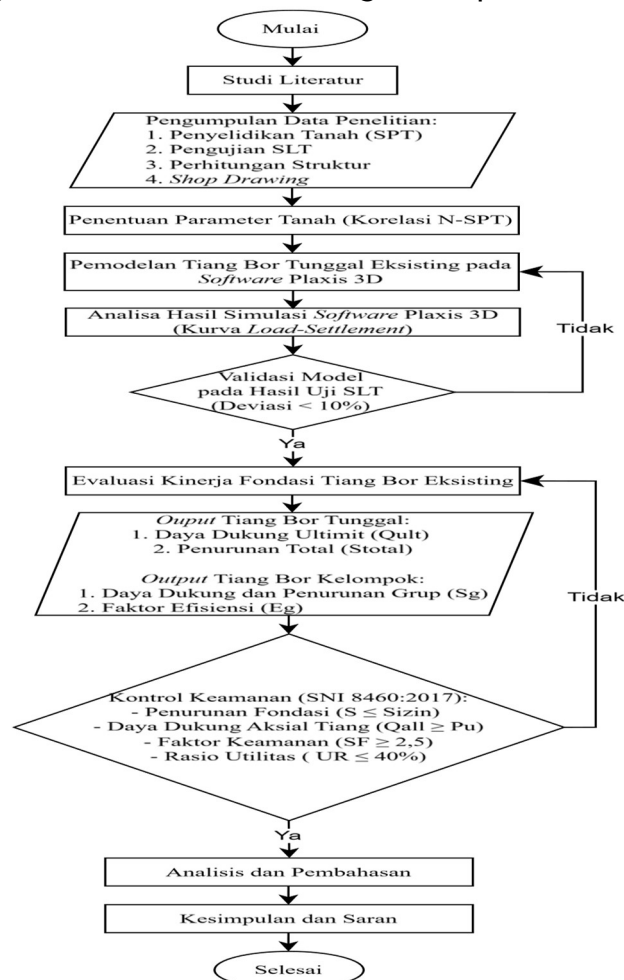


Gambar 1. Peta Lokasi Proyek Pembangunan Gedung MMRP Tahap 1

Sumber: Google Earth, 2024

2.2 Diagram Penelitian

Diagram alir penelitian disajikan ke dalam bentuk bagan alir pada Gambar 2 berikut.



Gambar 2. Diagram Alir Penelitian

Sumber: Dokumen Pribadi, 2026

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Data Teknis dan Pembebanan

Spesifikasi teknis fondasi eksisting MMRP dirangkum pada Tabel 5 berikut.

Tabel 5. Spesifikasi Teknis Fondasi *Bored Pile* PC-3

Parameter	Nilai
Jenis fondasi	<i>Bored pile (in-situ)</i>
Diameter (D)	Ø 100 cm / 1,00 m
Mutu beton (f' _c)	30 MPa
Mutu baja (f _y)	420 MPa
Kedalaman efektif terpasang	19 m
Jumlah titik dalam kelompok PC-3	16 buah
Dimensi <i>pile cap</i>	9,5 m × 9,5 m × 2,0 m

Sumber: Dokumen Proyek, 2026

Hasil rekapitulasi parameter tanah yang digunakan sebagai *input* pemodelan pada *software* Plaxis 3D disajikan pada Tabel 6, sementara parameter material *bored pile* ditampilkan pada Tabel 7.

Tabel 6. Rekapitulasi Parameter Tanah *Input Plaxis 3D - Model Hardening Soil*

Parameter	Lap. 1 (0-3 m)	Lap. 2 (3-8 m)	Lap. 3 (8-21 m)	Lap. 4 (21-29 m)	Lap. 5 (29-30 m)
<i>Drainase</i>	<i>Undrained B</i>	<i>Undrained A</i>	<i>Undrained A</i>	<i>Undrained B</i>	<i>Undrained B</i>
γ_{dry} (kN/m ³)	9,23	18,45	20,60	23,65	24,54
γ_{sat} (kN/m ³)	10,90	21,79	23,00	24,72	25,23
<i>e</i>	0,251	0,502	0,337	0,123	0,074
Cu' (kN/m ²)	4.755	9.509	11.751	14.273	14.553
E_{50} (kN/m ²)	950.940	1.901.880	2.350.113	2.854.507	2.910.667
E_{ur} (kN/m ²)	2.852.820	5.705.640	7.050.340	8.563.520	8.732.000
E_{oed} (kN/m ²)	760.752	1.880.091	2.283.605	2.328.533	2.328.533
$\nu' / \varphi' / \psi$	0,25/0°/0°	0,25/25°/0°	0,25/25°/8°	0,25/0°/0°	0,25/0°/0°
<i>Rinter</i>	0,65	0,65	0,75	1	1

Sumber: Dokumen Pribadi, 2026

Tabel 7. Material *Bored Pile input Plaxis 3D*

Parameter	Satuan	Nilai
Tipe material	-	<i>Linear Elastic, Non-Porous</i>
Diameter (D)	m	1,0
Panjang (L) eksisting	m	19
Modulus elastisitas beton (E_c)	kN/m ²	25.742.960
Angka <i>Poisson</i> (ν')	-	0,20
Berat jenis (γ)	kN/m ³	24

Sumber: Dokumen Pribadi, 2026

Rekapitulasi beban aksial hasil *output* reaksi perletakan (*joint reaction*) SAP2000 disajikan pada Tabel 8 berikut.

Tabel 8. Rekapitulasi Beban Aksial Fondasi Tiang PC-3

Komponen Beban	Nilai
Beban aksial vertikal terfaktor (P_u)	3.820,01 ton
Momen arah-X (M_x)	16,47 ton.m
Momen arah-Y (M_y)	5,90 ton.m

Sumber: Dokumen Proyek, 2026

Beban total pada *pile cap* merupakan akumulasi beban aksial struktur atas (P_u), berat sendiri *pile cap* (W_c), dan beban tanah urug di atas *pile cap* (W_s). Dengan dimensi *pile cap* 9,5 m × 9,5 m × 2 m (luas 90,25 m², tebal tanah urug 0,12 m, berat jenis beton 2,4 ton/m³, dan berat jenis tanah 1,85 ton/m³), diperoleh $W_s = 90,25 \times 0,12 \times 1,85 = 19,99$ ton dan $W_c = 90,25 \times 2 \times 2,4 = 433,2$ ton, sehingga beban total pada *pile cap* adalah $3.820,01 + 19,99 + 433,2 = 4.273,2$ ton. Dengan asumsi distribusi merata terhadap 16 tiang, beban kerja aktual per tiang (P_v) adalah:

$$P_v = 4.273,2 \text{ ton} / 16 = 267,08 \text{ ton}$$

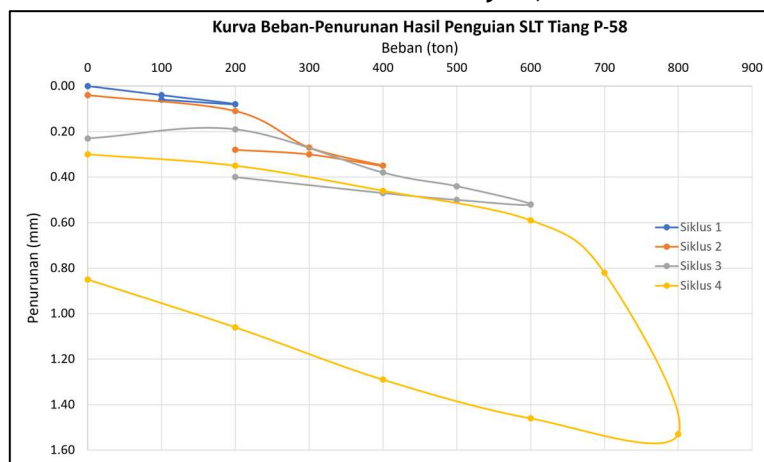
3.2 Hasil Pengujian *Static Load Test* (SLT) Tiang P-58

Pengujian SLT dilaksanakan pada tiang P-58 sesuai standar ASTM D1143 menggunakan skema pembebanan siklik (*cyclic loading test*) dalam empat siklus, dengan beban puncak mencapai 200% beban kerja rencana, yaitu 800 ton (beban rencana 400 ton). Ringkasan data pengujian pada setiap siklus disajikan pada Tabel 9, sedangkan kurva *load-settlement* ditampilkan pada Gambar 3.

Tabel 9. Rekapitulasi Hasil Pengujian SLT Tiang P-58 (Titik Kunci per Siklus)

Siklus	% Beban Kerja	Beban (ton)	Penurunan (mm)
I	0% → 50% →	0 → 200 → 0	0,00 - 0,08
II	0% → 100% →	0 → 400 → 0	0,04 - 0,35
III	0% → 150% →	0 → 600 → 0	0,23 - 0,52
IV (puncak)	0% → 200% →	0 → 800 → 0	0,30 - 1,53

Sumber: Dokumen Proyek, 2026



Gambar 3. Kurva Beban vs Penurunan Hasil Pengujian SLT Tiang P-58

Sumber: Dokumen Pribadi, 2026

Pada beban puncak 800 ton, penurunan yang tercatat hanya sebesar 1,53 mm jauh di bawah batas izin penurunan $4\% \times D = 40$ mm menurut SNI 8460:2017 Pasal 9.8.1 untuk tiang berdiameter lebih dari 800 mm. Kondisi ini mengindikasikan bahwa fondasi *bored pile* di lokasi proyek memiliki kekakuan yang sangat tinggi, karena dipengaruhi oleh lapisan tanah batuan kapur putih yang sangat padat.

Interpretasi kapasitas daya dukung (Q_{ult}) tiang P-58 dilakukan menggunakan tiga metode grafis, yaitu Metode Davisson (1972), Chin Fung Kee (1970), dan Mazurkiewicz (1972). Hasil interpretasi kapasitas daya dukung disajikan pada Tabel 10 berikut.

Tabel 10. Rekapitulasi Kapasitas Daya Dukung Tiang P-58 Berdasarkan SLT

No.	Metode Interpretasi	Q_{ult} (ton)	Q_{all} (ton), SF = 2,5
1	Davisson (1972)	1.050	420
2	Chin Fung Kee (1970)	804	322
3	Mazurkiewicz (1972)	910	364

Sumber: Dokumen Pribadi, 2026

Seluruh nilai kapasitas daya dukung izin (Q_{all}) yang diperoleh dari ketiga metode interpretasi lebih dari beban kerja rencana per tiang (P_v) sebesar 267 ton. Hal ini konsisten dengan penurunan aktual yang hanya sebesar 1,53 mm pada beban 800 ton, yang mengindikasikan fondasi masih berada jauh dari batas kapasitasnya.

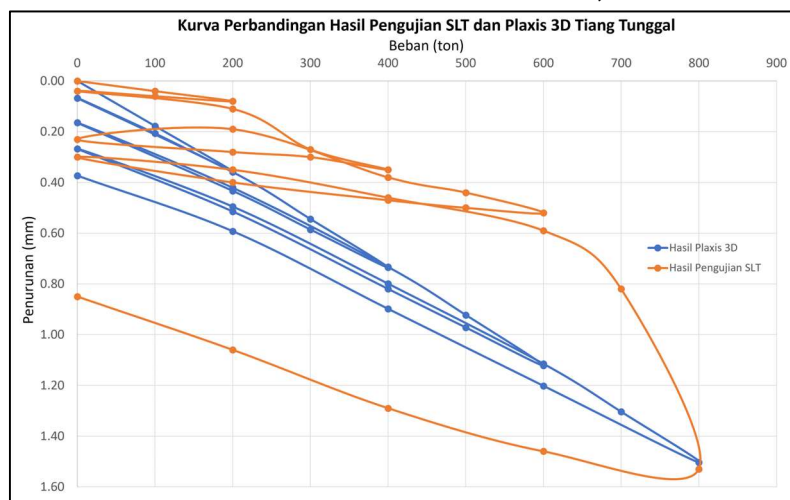
3.3 Validasi Model Numerik Plaxis 3D

Pemodelan fondasi *bored pile* eksisting tiang tunggal P-58 dilaksanakan pada Plaxis 3D. Simulasi pembebanan pada fase validasi mengikuti seluruh 28 tahap siklus *loading-unloading* sesuai protokol pengujian SLT aktual (ASTM D1143). Ringkasan hasil *output* penurunan (Uz) pada pembebanan disajikan pada Tabel 11, sedangkan perbandingan kurva *load-settlement* hasil simulasi terhadap data aktual SLT ditampilkan pada Gambar 4.

Tabel 11. Validasi Model – Perbandingan Penurunan Plaxis 3D dengan SLT P-58

Beban (ton)	Penurunan SLT P-58 (mm)	Penurunan Plaxis 3D (mm)	Selisih (mm)	Deviasi (%)	Keterangan
800	1,53	1,50	0,03	1,96%	VALID

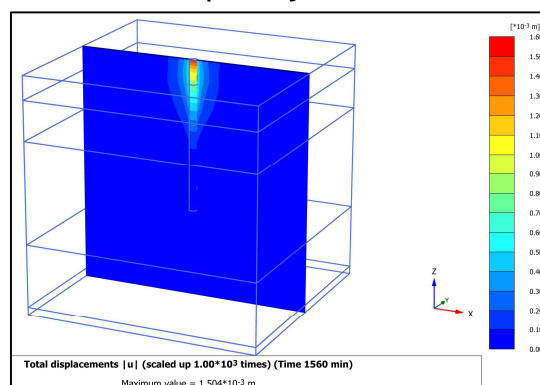
Sumber: Dokumen Pribadi, 2026



Gambar 4. Kurva *Load-Settlement* - Simulasi Plaxis 3D vs Data Aktual SLT P-58

Sumber: Dokumen Pribadi, 2026

Nilai deviasi sebesar 1,96% berada jauh di bawah batas toleransi 10%, sehingga model numerik Plaxis 3D dinyatakan valid dan dapat dijadikan dasar analisis selanjutnya.



Gambar 5. Hasil *Output* Penurunan Plaxis 3D pada Beban 200% Beban Kerja

Sumber: Dokumen Pribadi, 2026

3.4 Kapasitas Daya Dukung Tiang Tunggal Fondasi *Bored Pile*

a) Pentuan Daya Dukung Ultimit - Simulasi Plaxis 3D

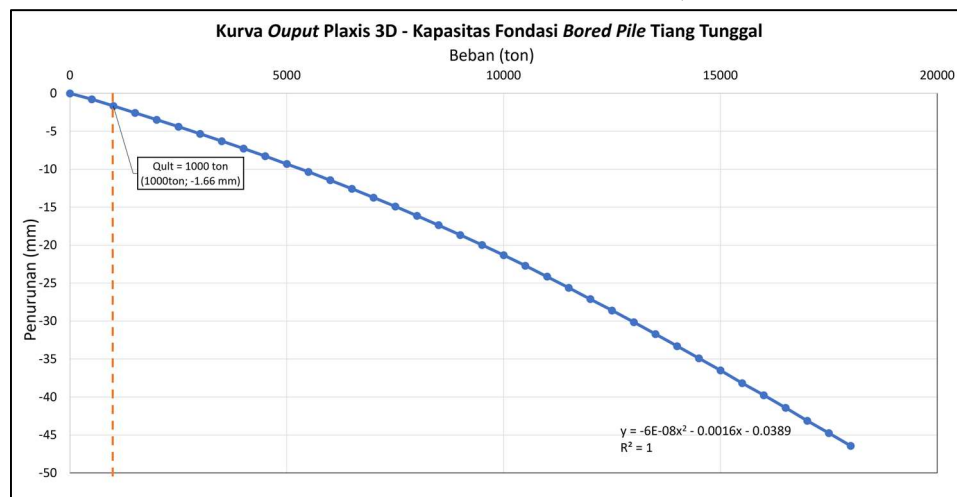
Pada fase ini telah diterapkan pembebanan 0-10.000 ton Pada simulasi Plaxis 3D, seluruh tahap pembebanan menghasilkan nilai $\Sigma Mstage = 1$ secara konsisten tanpa teridentifikasinya

kondisi keruntuhan (*failure*) yang jelas pada kurva *load-settlement*. Kondisi ini dipengaruhi oleh tingginya kekakuan dan kekuatan material batuan kapur putih ($N\text{-SPT} > 60$) di lokasi proyek, sehingga kapasitas fondasi melampaui seluruh beban yang diterapkan dalam simulasi. Hasil ringkasan rekapitulasi pembebanan bertahap (*staged loading*) dari *surface load* pada kepala tiang disajikan pada Tabel 12.

Tabel 12. Ringkasan Rekapitulasi Daya Dukung Bertahap – Simulasi Plaxis 3D

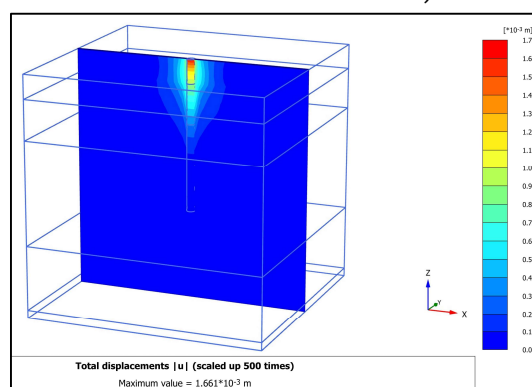
No.	Beban (ton)	Penurunan Uz (mm)	Keterangan
1	0	0,00	-
2	500	0,78	-
3	1.000	1,66	Mendekati SLT (1,53 mm)
4	2.000	3,47	-
5	4.500	8,26	-
6	10.000	21,30	< batas izin 25 mm

Sumber: Dokumen Pribadi, 2026



Gambar 6. Kurva Beban-Penurunan Tiang Tunggal Hasil Simulasi Plaxis 3D

Sumber: Dokumen Pribadi, 2026



Gambar 7. Hasil Output Penurunan Plaxis 3D pada Beban 1000 ton

Sumber: Dokumen Pribadi, 2026

Berdasarkan Tabel 12, pada beban 1000 ton diperoleh penurunan 1,66 mm yang paling mendekati nilai SLT sebesar 1,53 mm, dengan deviasi 8,50% ($Se < 10\%$) dan masih di bawah batas izin 25 mm. Dengan demikian, kapasitas daya dukung ultimit (Qult) tiang tunggal dari Plaxis 3D ditetapkan sebesar 1.000 ton.

b) Metode Luciano Decourt (1982)



Sebagai kontrol komparatif, daya dukung tiang tunggal dihitung menggunakan metode empiris Luciano Decourt (1982) berdasarkan nilai N-SPT terkoreksi ($N' = 37,5$).

Diketahui:

- Luas *bored pile* (A_p) $= \frac{1}{4} \pi D^2 = \frac{1}{4} \times 3,14 \times (1,0 \text{ m})^2 = 0,785 \text{ m}^2$
- Keliling *bored pile* (A_s) $= \pi \times D = 3,14 \times 1,0 \text{ m} = 3,14 \text{ m}$
- Koefisien ujung (K) $= 40$ (Tabel 2)
- Koefisien dasar (α) $= 0,5$ (Tabel 3)
- Koefisien selimut (β) $= 0,5 \text{ ton/m}^2$ (Tabel 4)

Maka,

1. Perhitungan Q_p

$$Q_p = \alpha \times K \times N_p(\text{rata-rata}) \times A_p$$

$$N_p(\text{rata-rata } L = 19\text{m}) = \frac{37,5+37,5+37,5}{3} = 37,5$$

$$Q_p = 0,5 \times 40 \text{ ton/m}^2 \times 37,5 \times 0,785 \text{ m}^2$$

$$Q_p = 589,05 \text{ ton}$$

2. Perhitungan Q_s

$$Q_s = (\beta \times (\frac{N_{s'}}{3} + 1) \times A_s \times \Delta L) + \Sigma Q_s(L = 0-18 \text{ m})$$

$$Q_s = (0,5 \times (\frac{37,5}{3} + 1) \times 3,14 \text{ m} \times 2 \text{ m}) + 381,70 \text{ ton}$$

$$Q_s = 42,41 \text{ ton} + 381,70 \text{ ton}$$

$$Q_s = 424,12 \text{ ton}$$

Sehingga,

$$Q_{ult} = Q_p + Q_s = 589,05 \text{ ton} + 424,12 \text{ ton} = 1.013,16 \text{ ton}$$

c) Perbandingan Q_{ult} Antar Metode

Tabel 13. Perbandingan Kapasitas Daya Dukung dari Tiga Metode

Metode	Q_{ult} (ton)	Q_{all} SF=2,5 (ton)	Selisih (ton)	Deviasi (%)
Interpretasi SLT-Davison (1972)	1.050	420	-	-
Simulasi Plaxis 3D	1.000	400	50	4,8
Leciano Decourt (1982)	1.013	405	37	3,5

Selisih antarmetode hanya berkisar 3,5%-4,8%, sehingga tidak terdapat perbedaan yang signifikan dalam kapasitas daya dukung fondasi eksisting.

3.5 Analisis Tiang Kelompok PC-3

a) Perhitungan jumlah tiang (n)

$$n = \frac{\Sigma P}{Q_a} = \frac{P+W_c}{Q_a(SLT)} = \frac{3.820 \text{ ton} + 433 \text{ ton}}{420 \text{ ton}} = \frac{4.253 \text{ ton}}{420 \text{ ton}} = 10,13 \approx 11 \text{ buah}$$

Konfigurasi aktual di lapangan menggunakan susunan 4×4 (16 tiang) dengan jarak antar tiang $2,5D = 2,5 \text{ m}$, sehingga secara kuantitas telah melampaui kebutuhan minimum.

b) Perhitungan efisiensi tiang kelompok (E_g)

$$E_g = 1 - \theta \frac{(n'-1)m + (m-1)n'}{90.m.n'} = 1 - \tan' \left(\frac{D}{S} \right) \frac{(4-1)4 + (4-1)4}{90 \times 4 \times 4}$$

$$E_g = 1 - \tan' \left(\frac{1 \text{ m}}{2,5 \text{ m}} \right) \times \left(\frac{12}{1.440} \right) = 1 - (21,8 \times 0,0167)$$

$$E_g = 1 - 0,363$$

$$E_g = 0,637 = 63,7\%$$

c) Perhitungan kapasitas daya dukung tiang kelompok (Qg)

Kapasitas *ultimate* tiang kelompok didapatkan sebagai berikut.

$$Q_{g,ult} = E_g \times n \times Q_{ult}$$

$$Q_{g,ult} = 0,637 \times 16 \times 1.050 \text{ ton}$$

$$Q_{g,ult} = 10.702 \text{ ton}$$

Kapasitas izing tiang kelompok didapatkan sebagai berikut.

$$Q_{g,all} = E_g \times n \times Q_a$$

$$Q_{g,all} = 0,637 \times 16 \times 420 \text{ ton}$$

$$Q_{g,all} = 4.281 \text{ ton}$$

d) Distribusi Beban pada Kelompok Tiang

Adapun susunan konfigurasi PC 3 pada Tabel 14 berikut.

Tabel 14. Konfigurasi Susunan PC-3

DATA SUSUNAN PC-3							
Susunan <i>bored pile</i> arah x				Susunan <i>bored pile</i> arah y			
No.	Jumlah	x	nx^2	No.	Jumlah	y	ny^2
	n	(m)	(m^2)		n	(m)	(m^2)
1	4	3,75	56,25	1	4	3,75	56,25
2	4	1,25	6,25	2	4	1,25	6,25
3	4	-1,25	6,25	3	4	-1,25	6,25
4	4	-3,75	56,25	4	4	-3,75	56,25
n =	16	$\sum x^2 =$	125	n =	16	$\sum y^2 =$	125

Sumber: Dokumen Proyek, 2026

Sehingga diperoleh hasil perhitungan distribusi beban maksimum dan minimum tiap tiang sebagai berikut.

• Kuat Tekan Maksimum (Pmax)

$$P_{max} = \frac{V}{n} + \frac{My.x_i}{\sum x^2} + \frac{Mx.y_i}{\sum y^2} = \frac{4.253 \text{ ton}}{16} + \frac{5,90 \text{ tm} \times 3,75 \text{ m}}{125 \text{ m}^2} + \frac{16,47 \text{ tm} \times 3,75 \text{ m}}{125 \text{ m}^2}$$

$$P_{max} = 265,83 \text{ ton} + 0,494 \text{ ton} + 0,177 \text{ ton}$$

$$P_{max} = 266,497 \text{ ton} = 2.665 \text{ kN}$$

• Kuat Tekan Minimum (Pmin)

$$P_{min} = \frac{V}{n} - \frac{My.x_i}{\sum x^2} - \frac{Mx.y_i}{\sum y^2} = \frac{4.253 \text{ ton}}{16} - \frac{5,90 \text{ tm} \times 3,75 \text{ m}}{125 \text{ m}^2} - \frac{16,47 \text{ tm} \times 3,75 \text{ m}}{125 \text{ m}^2}$$

$$P_{min} = 265,83 \text{ ton} - 0,494 \text{ ton} - 0,177 \text{ ton}$$

$$P_{min} = 265,155 \text{ ton}$$

e) Kontrol tiang kelompok

Kontrol tiang tunggal:

$$P_{max} < Q_a$$

$$266,497 \text{ ton} < 420 \text{ ton (Memenuhi)},$$

Kontrol tiang kelompok:

$$P_{max \text{ group}} = P_{max} (\text{satu tiang}) \times n < P_{ijin \text{ group}}$$

$$266,497 \text{ ton} \times 16 < Q_{g,all}$$

$$4.264 \text{ ton} < 4.281 \text{ ton (Memenuhi)}$$

f) Kontrol kekuatan material *bored pile*:

$$\sigma = \frac{P_{\max} (\text{satu tiang})}{A_p} < \sigma_{\text{izin}}$$

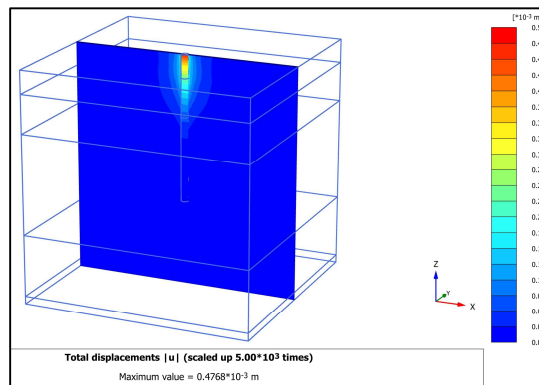
$$\sigma = \frac{2.665 \text{ kN}}{0,785 \text{ m}^2} < 30.000 \text{ kN/m}^2$$

$$3.393 \text{ kN/m}^2 < 30.000 \text{ kN/m}^2 \text{ (Memenuhi)}$$

3.6 Penurunan Fondasi *Bored Pile*

a) Penurunan Tiang Tunggal

Berdasarkan hasil simulasi Plaxis 3D pada beban kerja aktual per tiang ($P_v = 267,08$ ton), didapatkan deformasi vertikal total (U_z) sebesar 0,48 mm yang jauh di bawah batas penurunan izin tiang tunggal sebesar 25 mm menurut SNI 8460:2017.



Gambar 8. Hasil Output Plaxis 3D Tiang Tunggal - Penurunan Pada Beban Aktual

Sumber: Dokumen Pribadi, 2026

Sebagai pembandingan, penurunan tiang tunggal juga diestimasi menggunakan metode Vesic (1977) sebagai berikut.

$$S = \frac{D}{100} + \frac{q \times L}{A_p \times E_c}$$

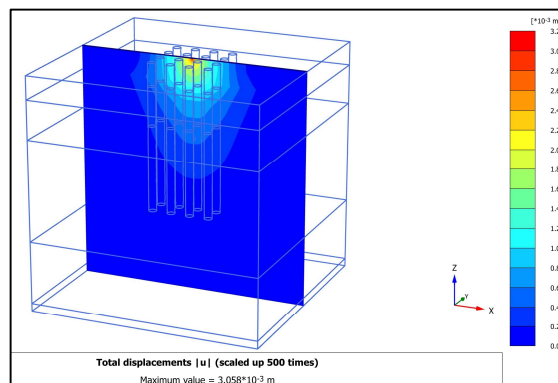
$$S = \frac{1,0 \text{ m}}{100} + \frac{2.670,8 \text{ kN} \times 19 \text{ m}}{0,785 \text{ m}^2 \times 2.574.960 \text{ kN/m}^2}$$

$$S = 0,01 \text{ m} + 0,00251 \text{ m}$$

$$S = 0,01251 \text{ m} = 12,51 \text{ mm} \text{ (nilai ini masih berada di bawah batas izin 25 mm)}$$

b) Penurunan Tiang Kelompok

Berdasarkan hasil simulasi Plaxis 3D pada beban kerja $P_u = 3.820$ ton (ouput SAP2000), didapatkan deformasi vertikal total (U_z) sebesar 3,06 mm.



Gambar 8. Hasil Output Plaxis 3D Tiang Kelompok - Penurunan Pada Beban Aktual

Sumber: Dokumen Pribadi, 2026

Estimasi konvensional menggunakan metode Vesic (1977) didapatkan sebagai berikut.

$$B_g = (m-1)d + \left(2 \left(\frac{D}{2}\right)\right) = ((4-1) \times (2,5 \times 1.000 \text{ mm})) + \left(2 \left(\frac{1.000 \text{ mm}}{2}\right)\right) = 8.500 \text{ mm} = 850 \text{ cm}$$

Maka,

$$S_g = S \times \sqrt{\frac{B_g}{D}}$$

$$S_g = 12,51 \text{ mm} \times \sqrt{\frac{8.500 \text{ mm}}{1.000 \text{ mm}}}$$

$$S_g = 36,47 \text{ mm}$$

Batas penurunan izin kelompok sesuai SNI 8460:2017 Pasal 9.2.4.3: $S_{izin} = 15 + b/600 = 15 + 950/600 = 16,417 \text{ cm} = 164,17 \text{ mm}$. Kedua nilai penurunan kelompok (3,06 mm dan 36,47 mm) masih jauh di bawah batas izin 164,17 mm.

3.7 Evaluasi Kinerja Fondasi *Bored Pile*

Evaluasi kinerja fondasi *bored pile* eksisting dilakukan terhadap tiga parameter utama, yakni faktor keamanan (SF), penurunan, dan rasio utilisasi (UR). Hasil evaluasi disajikan secara komprehensif pada tabel berikut.

Tabel 15. Rekapitulasi Faktor Keamanan *Bored Pile* Eksisting

Metode	Qult (ton)	Pmaks (ton)	SF = Qult/P	Syarat SF	Ket.
SLT - Davisson (1972)	1.050	267	3,93	$\geq 2,5$	OK
Simulasi Plaxis 3D	1.000	267	3,75	$\geq 2,5$	OK
Luciano Decourt (1982)	1.013	267	3,79	$\geq 2,5$	OK
Tiang Kelompok-SLT Davisson (1972)	10.702	4.253	2,52	$\geq 2,5$	OK

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa seluruh parameter kinerja fondasi *bored pile* eksisting MMRP Tahap 1 memenuhi persyaratan SNI 8460:2017. Faktor keamanan dari ketiga metode konsisten berada pada rentang 3,75-3,93, melampaui batas minimum SF = 2,5 dengan cadangan sebesar 50-57%.

Tabel 16. Rekapitulasi Evaluasi Penurunan Fondasi *Bored Pile* Eksisting

Jenis Fondasi	Metode	Penurunan (mm)	Batas Izin (mm)	Keterangan
Tiang Tunggal	SLT (beban 200%)	1,53	≤ 25	OK
Tiang Tunggal	Plaxis 3D (beban 200%)	1,50	≤ 25	OK
Tiang Tunggal	Plaxis 3D (beban kerja aktual)	0,48	≤ 25	OK
Tiang Tunggal	Vesic (1977)	12,51	≤ 25	OK
Tiang Kelompok PC-3	Plaxis 3D	3,06	$\leq 164,17$	OK
Tiang Kelompok PC-3	Vesic (1977)	36,47	$\leq 164,17$	OK



Tabel 17. Rekapitulasi Rasio Utilisasi (UR) Fondasi Bored Pile Eksisting

Metode	Beban Aktual (ton)	Qult (ton)	UR (%)	Batas UR	Ket.
SLT - Davisson (1972)	4.253	1.050	25,3%	$\leq 40\%$	OK
Simulasi Plaxis 3D	4.253	1.000	26,6%	$\leq 40\%$	OK
Luciano Decourt (1982)	4.253	1.013	26,2%	$\leq 40\%$	OK

Sumber: Dokumen Pribadi, 2026

Rasio utilisasi yang berkisar 25,3%-26,6% mengindikasikan bahwa fondasi masih memiliki cadangan kapasitas yang sangat besar, jauh dari kondisi kritis.

KESIMPULAN

Kesimpulan Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, berikut adalah beberapa kesimpulan utama:

1. Model numerik Plaxis 3D berhasil dikalibrasi terhadap data SLT P-58 dengan deviasi penurunan pada beban puncak 200% beban kerja sebesar 1,96% (Plaxis 3D: 1,50 mm; SLT: 1,53 mm), jauh di bawah batas toleransi 10%, sehingga model dinyatakan valid untuk representasi perilaku deformasi fondasi.
2. Kapasitas daya dukung ultimit (Qult) tiang tunggal dari tiga metode menunjukkan konvergensi yang sangat baik: SLT-Davisson (1.050 ton), Plaxis 3D (1.000 ton), dan Luciano Decourt (1.013 ton), dengan deviasi antar metode hanya 3,5-5,0%. Ketiga nilai Qall yang dihasilkan (400-420 ton) melebihi beban kerja per tiang sebesar 267 ton.
3. Penurunan tiang tunggal pada beban kerja aktual berdasarkan simulasi Plaxis 3D sebesar 0,48 mm; pada beban 200% beban kerja sebesar 1,50 mm (Plaxis 3D) dan 1,53 mm (SLT). Penurunan tiang kelompok PC-3 sebesar 3,06 mm (Plaxis 3D) dan 36,47 mm (Vesic, 1977). Seluruh nilai penurunan berada jauh di bawah batas izin 25 mm untuk tiang tunggal (ASTM D1134) dan 164,17 mm untuk tiang kelompok sesuai SNI 8460:2017.
4. Faktor keamanan (SF) tiang tunggal dari seluruh metode berada pada rentang 3,75-3,93, melampaui persyaratan minimum $SF \geq 2,5$ sesuai SNI 8460:2017. Rasio utilisasi (UR) kelompok tiang dari seluruh metode berkisar 25,3%-26,6%, di bawah batas maksimum 40%. Fondasi *bored pile* eksisting MMRP Tahap 1 dengan diameter 100 cm dan kedalaman terpasang 19 meter dinilai aman dan memenuhi seluruh persyaratan keamanan serta kemampulayanan sesuai SNI 8460:2017.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. Anggiawan, "Analisis Daya Dukung Pondasi Bored Pile Berdasarkan Data Spt Dan Pda Test," *Kementeri. PUPR*, 2022, doi: <https://www.scribd.com/document/680301107/5-Analisis-Daya-Dukung-Pondasi-Bored-Pile-Berdasarkan-Data-Boring-Spt-Menggunakan-Metode-Mayerhof>.
- [2] I. Oktavia, "Analisis Kapasitas Dukung Pondasi Dengan Menggunakan Metode Meyerhoff , Luciano Decourt , and Reese & Wright," Universitas Islam Indonesia, 2024. <https://dspace.uui.ac.id/bitstream/handle/123456789/51862/17511070.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [3] N. P. Tahap, N. K. Lutfiyah, and K. H. Sutantiningrum, "Analisis Pengendalian Mutu Pekerjaan Pondasi Tiang Pancang (Studi Kasus Di Zona-a Proyek Ruko," *eSminar Nas. Tek. Sipil Politek. Negeri Jakarta*, 2024.



- [4] M. V. Kaisar, R. Roesyanto, and S. Erwin Harahap, "Analisis Daya Dukung Aksial Tiang Diameter 60 Cm Dengan Menggunakan Uji Beban Statik Aksial Dan Menggunakan Metode Elemen Hingga Pada Proyek Gedung Rawat Inap Tower-1 Rs Haji Medan," *J. Tek. Sipil Cendekia*, vol. 6, no. 2, pp. 1218-1229, 2025, doi: 10.51988/jtsc.v6i2.303.
- [5] D. S. Pratiwi and G. W. Winoto, "Jurnal Rivet (Riset dan Inovasi Teknologi) Studi Daya Dukung dan Penurunan Tiang Bor Menggunakan Plaxis 3D Berdasarkan Data N-SPT," vol. 05, no. 01, pp. 38-48, 2025, doi: <https://doi.org/10.47233/rivet.v5i01.2071>.
- [6] B. L. Mungkur, R. Roesyanto, S. E. Harahap, and I. J. Fischer, "Analisis Daya Dukung Aksial Dan Penurunan Pondasi Bored Pile Dengan Menggunakan Uji Beban Statik Dan Menggunakan Metode Elemen Hingga Pada Pembangunan Bri-Medan," *Syntax Lit. ; J. Ilm. Indones.*, vol. 10, no. 7, pp. 8979-8996, 2025, doi: 10.36418/syntax-literate.v10i7.60755.
- [7] F. R. Sundari, R. C. G. Roesyanto, Hasibuan, and R. Surbakti, "Analisis Daya Dukung Aksial Bored Pile Ø 80 Cm Dengan Menggunakan Uji Beban Statik Dan Menggunakan Metode Elemen Hingga Pada Proyek Menara Bri - Medan," *Dict. Geotech. Eng. Geotech.*, vol. 9, no. 1, pp. 148-148, 2024, doi: 10.1007/978-3-642-41714-6_22540.
- [8] A. Romadhoni, "Analisa Daya Dukung Pondasi Bore Pile Pada Proyek Pembangunan Pasar Baru Mandailing Natal," Universitas Muhammdiyah Sumatera Utara, 2022. [http://repository.umsu.ac.id/bitstream/123456789/17739/1/TUGAS AKHIR ANDI ROMADHONI 1507210215.pdf](http://repository.umsu.ac.id/bitstream/123456789/17739/1/TUGAS%20AKHIR%20ANDI%20ROMADHONI%201507210215.pdf)
- [9] G. Tampubolon, R. Roesyanto, and G. C. R. Hasibuan, "Analisis Daya Dukung & Penurunan Bored Pile 80cm di Proyek Kompleks Kantor-Apartemen dengan Metode Analitis & Elemen Hingga," *J. Syntax Admiration*, vol. 5, no. 4, pp. 1249-1266, 2024, doi: 10.46799/jsa.v5i4.1102.
- [10] A. Gerry Habrianto, I. Aschuri, and D. Santi Pratiwi, "Evaluasi Perbandingan Daya Dukung Pondasi Berdasarkan Analisis Numerik 3 Dimensi Dengan Hasil Uji PDA Test Pada Pembangunan Kantor PT. Daya Adicipta Mustika Bandung," 2021. <http://eprints.itenas.ac.id/id/eprint/1530>
- [11] E. S. Fani, "Analisa Dan Desain Pondasi Yang Efisien Untuk Pembangunan Gedung Bertingkat Menggunakan Borepile, Spun Pile Dan Squarepile," Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, 2022. <http://repository.umsu.ac.id/handle/123456789/19378>
- [12] SNI 8460:2017, "Persyaratan Perancangan Geoteknik," *Standar Nas. Indones.*, vol. 8460, pp. 1-323, 2017, <https://sitaba.pu.go.id/publikasi/f0bd856e-e3a9-4c02-bd28-a28f90222340>
- [13] H. C. Hardiyanto, *ANALISIS & PERANCANGAN FONDASI Bagian II*, 2nd ed. Yogyakarta: GADJAH MADA UNIVERSITY PRESS, 2010. <https://www.scribd.com/document/563107287/Analisis-Perancangan-Fondasi-Dr-Ir-Hary-Christady-Hardiyatmo-m-eng-Dea>
- [14] F. F. A. Rachman and A. Triarso, "Simulasi Daya Dukung Tiang Pancang pada Tanah Lunak Menggunakan Software Plaxis 3D," vol. 9, no. 5, 2025.