Analisis Modifikasi Fondasi dengan Pembesaran Ujung pada Bangunan Gedung *Onkology* 8 Lantai RSUD Haji Surabaya

Salsabila Aulia[1]
Fakultas Teknik Dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya
E-mail: salsabila2775@gmail.com
Arasi Arahman[2]
Fakultas Teknik Dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya
E-mail: arasi.arrahman@gmail.com
Dian Solin Purnamawati[3]
Fakultas Teknik Dan Sains, Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Jawa Timur, Surabaya
E-mail: diansolin.ts@upnjatim.ac.id

Abstrak

Peningkatan kasus kanker di Indonesia yang diproyeksikan melebihi 70% pada tahun 2050 menuntut percepatan pembangunan fasilitas pelayanan kesehatan, termasuk Gedung Onkologi RSUD Haji Surabaya. Kondisi tanah lempung lunak pada lokasi proyek memerlukan sistem fondasi yang mampu menjamin stabilitas struktur sekaligus meminimalkan penurunan. Penelitian ini mengevaluasi kinerja fondasi kelompok tiang dalam sistem raft melalui analisis numerik menggunakan metode Luciano Decourt dan Converse–Labarre, serta simulasi Allpile, pada dua skenario desain: fondasi eksisting tanpa pembesaran ujung dan fondasi modifikasi dengan pembesaran ujung tiang. Hasil analisis numerik menunjukkan bahwa kondisi eksisting memberikan kapasitas izin sebesar 20,97 ton untuk tiang tunggal dan 1768,99 ton untuk kelompok tiang, dengan penurunan masing-masing 1,374 cm dan 6,074 cm. Setelah diterapkan pembesaran ujung, kapasitas izin meningkat menjadi 32,424 ton untuk tiang tunggal dan 2734,288 ton untuk kelompok tiang, sementara penurunan meningkat menjadi 5,21 cm dan 11,48 cm. Analisis tiang kelompok dengan Allpile menunjukkan kapasitas izin sebesar 1876,88 ton dengan penurunan 5,48 cm untuk kondisi eksisting, meningkat menjadi 2425,35 ton dengan penurunan 6,91 cm setelah modifikasi. Hasil tersebut menegaskan bahwa pembesaran ujung tiang efektif meningkatkan daya dukung serta mengendalikan penurunan, sehingga sesuai diterapkan pada struktur yang dibangun di atas tanah lempung berkekuatan rendah.

Kata kunci: *Allpile, Belled pile, Daya Dukung Tanah, Penurunan Fondasi, Raftpile*

Abstract

The projected rise in cancer cases in Indonesia—expected to exceed 70% by 2050—necessitates the accelerated development of healthcare facilities, including the Oncology Building of RSUD Haji Surabaya. The presence of soft clay soil at the project site requires a foundation system capable of ensuring structural stability while minimizing settlement. This study evaluates the performance of a pile group foundation within a raft system through numerical analysis using the Luciano Decourt and Converse–Labarre methods, complemented by Allpile simulations, under two design scenarios: an existing foundation without pile-base enlargement and a modified foundation incorporating enlarged pile bases. The numerical analysis results indicate that the existing condition provides an allowable capacity of 20.97 tons for single piles and 1,768.99 tons for the pile group, with settlements of 1.374 cm and 6.074 cm, respectively. Following the application of

pile-base enlargement, the allowable capacity increases to 32.424 tons for single piles and 2,734.288 tons for the pile group, while the corresponding settlements become 5.21 cm and 11.48 cm. The Allpile analysis for the pile group shows an allowable capacity of 1,876.88 tons with a settlement of 5.48 cm upper the existing condition, increasing to 2,425.35 tons with a settlement of 6.91 cm after modification. These findings confirm that pile-base enlargement is effective in enhancing load-bearing capacity and controlling vertical deformation, making it suitable for structures constructed on low-strength clay soils.
Keywords: *Allpile, Belled pile, Foundation settlement, Raft–pile, Soil bearing capacity*

1. PENDAHULUAN

Angka kejadian kanker di Indonesia menunjukkan kecenderungan peningkatan yang cukup tajam, dan diproyeksikan dapat bertambah lebih dari 70 persen pada tahun 2050 apabila upaya pencegahan serta deteksi dini tidak diperkuat secara sistematis. Saat ini, setiap tahun tercatat sekitar 400 ribu kasus baru dengan jumlah kematian mencapai sekitar 240 ribu jiwa, yang menggambarkan tingginya beban kesehatan masyarakat sekaligus potensi dampak ekonomi yang besar. Kondisi ini menegaskan urgensi pembangunan fasilitas pelayanan dan penelitian onkologi, termasuk Gedung Onkologi RSUD Haji Surabaya, sebagai upaya meningkatkan kapasitas layanan kanker [1]. Dari perspektif rekayasa geoteknik, pembangunan fasilitas kesehatan bertingkat menuntut perencanaan sistem fondasi yang mampu memastikan stabilitas struktur, terutama pada wilayah seperti Surabaya yang didominasi tanah lempung berkekuatan rendah dan berpotensi mengalami penurunan besar.

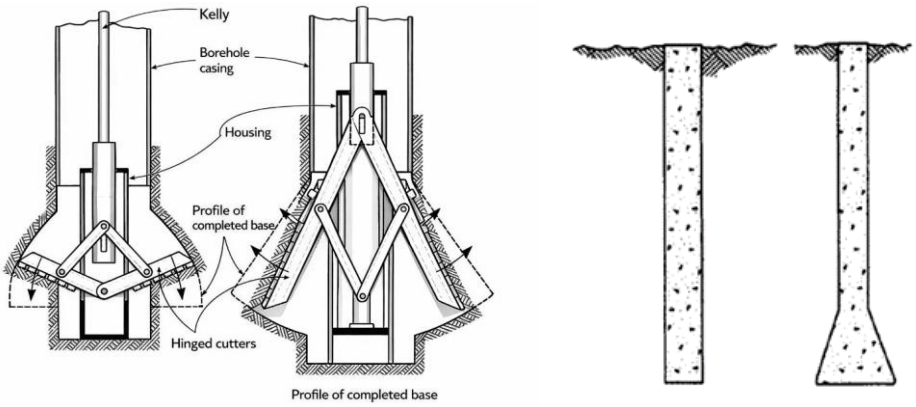
Salah satu bentuk fondasi dalam yang sering digunakan adalah bored pile, karena mampu mentransfer beban struktur menuju lapisan tanah yang lebih kuat. Mekanisme kerja tiang mencakup dua komponen utama, yakni kontribusi tahanan ujung (*end bearing*) serta gesekan selimut (*skin friction*), yang bersama-sama memikul beban *vertikal* [2] dan [3]. Modifikasi geometri tiang berupa pembesaran ujung atau *belled pile* dikembangkan untuk meningkatkan luas bidang tumpu pada dasar tiang sehingga kapasitas daya dukung ujung dapat bertambah secara signifikan. Pelebaran ini dibentuk menggunakan *belling bucket*, yaitu alat pemotong tanah yang dirancang untuk membentuk ruang melebar dengan profil kerucut terbalik atau menyerupai lonceng. Efektivitas pembesaran ujung sangat dipengaruhi oleh rasio antara diameter pelebaran dan diameter batang tiang [4]. Untuk memberikan gambaran visual mengenai konfigurasi belled pile beserta alat pembentuknya, ilustrasi tipikal dapat ditunjukkan pada Gambar 1. Berbagai studi melaporkan efektivitas modifikasi ini, seperti peningkatan kapasitas hingga 29,2 persen [5], serta peningkatan 40 hingga 73,75 persen dibandingkan tiang konvensional [6].

Daya dukung pondasi menggambarkan kemampuan tanah menopang beban struktur tanpa memicu kegagalan geser atau penurunan yang dapat membahayakan kinerja bangunan. Secara prinsip, kapasitas ultimit merupakan nilai maksimum yang dapat ditahan pondasi sebelum mengalami keruntuhan, sedangkan kapasitas izin diperoleh dengan membaginya terhadap faktor keamanan sesuai ketentuan SNI

8460:2017[7]. Di sisi lain, penurunan pondasi (*settlement*) merupakan respons deformasi vertikal tanah yang terdiri atas komponen penurunan elastis tiang dan penurunan konsolidasi tanah [8]. Pada tanah lempung jenuh, penurunan konsolidasi sering menjadi faktor dominan karena berlangsung secara bertahap seiring keluarnya air pori dari massa tanah hingga mencapai kondisi keseimbangan tegangan baru.

Pada kelompok tiang (*pile group*), penurunan umumnya lebih besar dibandingkan tiang tunggal karena adanya interaksi antar tiang yang menyebabkan tumpang tindih zona tegangan dalam tanah. Besar kecilnya penurunan dipengaruhi oleh jarak antar tiang, kompresibilitas tanah, kekakuan relatif tiang–tanah, serta karakteristik beban vertikal [9]. Estimasi penurunan kelompok biasanya mengacu pada distribusi beban hingga kedalaman dua pertiga panjang tiang (2/3 L) sebagaimana dikemukakan [10] dalam [11]. SNI 8460:2017 menetapkan bahwa penurunan total untuk bangunan bertingkat tinggi tidak boleh melebihi 25 mm dan penurunan diferensial dibatasi hingga 1/500 jarak antar kolom. Dengan demikian, evaluasi penurunan menjadi aspek integral dalam perencanaan fondasi kelompok tiang untuk memastikan stabilitas dan kinerja struktural bangunan tetap terjaga sepanjang umur layanannya.

Meskipun berbagai penelitian telah menunjukkan bahwa penggunaan *belled pile* mampu meningkatkan kapasitas daya dukung secara signifikan dibandingkan *bored pile* konvensional, sebagian besar studi terdahulu masih berfokus pada evaluasi kapasitas ultimit tiang tunggal dalam kondisi tanah ideal atau homogen. Kajian mengenai kinerja belled pile pada tanah lempung lunak jenuh, khususnya dalam konfigurasi kelompok tiang (*pile group*), masih terbatas. Dalam sistem fondasi kelompok, interaksi antar tiang berpotensi memengaruhi distribusi tegangan serta meningkatkan penurunan konsolidasi, sehingga peningkatan kapasitas tidak selalu sejalan dengan kinerja deformasi fondasi. Oleh karena itu, penelitian ini memberikan evaluasi komprehensif terhadap efektivitas belled pile pada fondasi kelompok di tanah lempung Surabaya dengan meninjau daya dukung serta penurunan total dan diferensial berdasarkan ketentuan SNI 8460:2017.



(a) (b)

Gambar 1 (a) Ilustrasi *belling bucket*; dan (b) perbandingan geometri *bored pile* konvensional dengan *bored pile* berpelebaran ujung (*belled pile*).
Sumber : [12] dan [13] dalam [5]

2. METODE PENELITIAN

Studi Literatur

Studi literatur dalam penelitian ini bertujuan untuk mengumpulkan dan mengkaji secara kritis teori-teori yang berhubungan dengan perhitungan daya dukung serta penurunan pondasi, serta konsep pembesaran ujung tiang (*belled pile*) sebagai metode peningkatan performa pondasi. Kegiatan ini mencakup penelaahan teori mekanika tanah, karakteristik tanah lempung dan pasir dalam menerima beban pondasi, serta mekanisme interaksi tanah–tiang. Selain itu, berbagai penelitian terdahulu dan standar desain teknis digunakan sebagai acuan untuk membangun kerangka analisis dan merumuskan pendekatan perhitungan yang diterapkan dalam penelitian ini. Hasil kajian yang diperoleh digunakan sebagai dasar penyusunan prosedur analisis dan interpretasi perhitungan daya dukung serta penurunan kelompok tiang.

Data Penelitian dan Parameter Input

Tabel 1 Spesifikasi *Borepile* Konvensional dan *Belled Pile*

Parameter	***Bored Pile Konvensional***	***Belled Pile***
Diameter batang tiang	90 cm	80 cm
Panjang Tiang	30 m	30 m
Diameter Perbesaran Ujung	-	160 cm
Spasi antar tiang	2250 mm	2250 mm
Jumlah tiang dalam kelompok	90 tiang	90 tiang
Konfigurasi kelompok	6 x 15	6 x 15

Sumber : Data Perencanaan Pembangunan Gedung *Onkology* RSUD Haji Surabaya (2025)

Tabel 2 Data Pembebanan Gedung Onkology RSUD Haji Surabaya

	1	2	3	4	5
A	10784,3 kN	7476,56 kN	7062,65 kN	5970,84 kN	10916,07 kN
B	11142,2 kN	9463,29 kN	14562,68 kN	9182,93 kN	11045,93 kN

Sumber : Data Perencanaan Pembangunan Gedung Onkology RSUD Haji Surabaya (2025)

Penerapan kombinasi pembebanan kelompok kedua mengacu pada kondisi *Service Limit State* sebagaimana diatur dalam SNI 03-1726-2019 Pasal 4.2.3. Kombinasi beban tersebut dimanfaatkan dalam perencanaan struktur bawah, khususnya pondasi, untuk memastikan bahwa deformasi dan penurunan tetap berada dalam batas layanan yang diizinkan. Pada tahap ini, beban yang digunakan merupakan hasil perhitungan sebelumnya, sehingga analisis dilakukan dengan kondisi pembebanan yang mendekati keadaan operasional bangunan sesungguhnya. Total beban vertikal yang harus dipikul oleh sistem *raft foundation* pada kondisi ini adalah sebesar 97.607,45 kN, sehingga evaluasi kinerja pondasi dapat dilakukan secara akurat dan sesuai standar perencanaan yang berlaku.

Tabel 3 Data Tanah Gedung Onkology RSUD Haji Surabaya

BOREHOLE DB-1		Soil
Pile Depth	N-SPT	Type
m	Bpf	Sand
5.25	9	CH
7.25	1	Sand
9.25	2	CH
11.25	1	CH
13.25	8	CH
15.25	12	CH
17.25	14	Sand
19.25	29	CH
21.25	17	CH
23.25	32	CH
25.25	35	CH
27.25	32	CH
29.25	30	CH
31.25	29	CH
33.25	18	CH
35.25	20	CH
37.25	21	CH
39.25	22	CH

Sumber : Data Perencanaan Pembangunan Gedung Onkology RSUD Haji Surabaya (2025)

Analisis Data dan Perhitungan

Perhitungan Daya Dukung Tiang Tunggal dan Kelompok

Metode Luciano Decourt digunakan untuk menghitung kapasitas daya dukung tiang tunggal dengan dasar nilai *Standard Penetration Test* (NSPT) yang diperoleh dari hasil penyelidikan tanah pada setiap kedalaman. Data NSPT tersebut terlebih dahulu disusun berdasarkan stratifikasi tanah untuk menggambarkan perubahan karakteristik tanah terhadap kedalaman. Estimasi kapasitas ultimit tiang dilakukan dengan menjumlahkan kontribusi tahanan ujung dan tahanan geser selimut menggunakan Persamaan (2.1). Nilai rata-rata NSPT pada zona kritis di sekitar ujung tiang digunakan sebagai dasar dalam menentukan tahanan ujung, sedangkan nilai rata-rata NSPT sepanjang selimut efektif digunakan untuk menghitung tahanan geser selimut. Perhitungan kapasitas ultimit tiang dilakukan dengan mempertimbangkan jenis tanah dan tipe tiang sesuai koefisien pada Tabel (4).

$$Qult = \alpha\, A_p\, N_p K + \beta \left(\frac{N_S}{3} + 1\right) A_S \quad \text{.....(2.1)}$$

Tabel 4 Koefisien Tanah K

Koefisien Tanah K (Decourt 1987)	
Jenis Tanah	K (t/m2)
Lempung	12
Lanau Berlempung	20
Lanau Berpasir	25
Pasir	40

Sumber : [14] ; dalam [15]

Pada tiang dengan pembesaran ujung (*belled pile*), kapasitas ultimit dihitung dengan prinsip yang sama menggunakan Persamaan (2.2) dan Persamaan (2.3), dengan penyesuaian pada luas penampang ujung dan luas selimut efektif. Luas selimut efektif pada *belled pile* dihitung menggunakan Persamaan (2.4) yang mempertimbangkan diameter batang tiang, diameter pembesaran ujung, panjang bagian silinder, dan tinggi pembesaran ujung. Penyesuaian geometri ini bertujuan untuk mengakomodasi peningkatan kontribusi tahanan ujung akibat pembesaran dimensi dasar tiang.

$$Qult = Qp + Qs \quad (2.2)$$

$$Qult = \alpha\, A_p\, N_p K + \beta \left(\frac{N_S}{3} + 1\right) A_S \quad (2.3)$$

$$As = \pi\, D_1\, L_1 + \pi \left(\frac{D_1 + D_2}{2}\right) L_2 \quad (2.4)$$

Kapasitas daya dukung kelompok tiang dihitung dengan memperhitungkan efisiensi kelompok menggunakan metode *Converse Labarre* sesuai Persamaan (2.6). Kapasitas ultimit kelompok diperoleh dari hasil perkalian kapasitas ultimit tiang tunggal dengan jumlah tiang dalam kelompok dan faktor efisiensi kelompok menggunakan Persamaan (2.5). Selanjutnya, kapasitas ultimit kelompok dikonversi menjadi kapasitas izin dengan membagi terhadap faktor keamanan sebesar 3 sesuai ketentuan SNI 8460:2017 menggunakan Persamaan (2.7), sehingga kapasitas yang digunakan dalam evaluasi desain memenuhi tingkat keamanan yang dipersyaratkan.

$$Qult_{qroup} = Eg \,.\, n \,.\, Qult_{single} \quad (2.5)$$

$$Eg = 1 - \theta \frac{(n\prime - 1).m + (m - 1).n\prime}{90.m.n\prime} \quad (2.6)$$

$$Qs_{group} = \frac{\text{Qultgroup}}{Fs} \quad (2.7)$$

Pemodelan Numerik Menggunakan *AllPile*

Pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak AllPile dilakukan untuk menganalisis hubungan antara beban aksial dan penurunan tiang berdasarkan parameter tanah yang diperoleh dari hasil penyelidikan lapangan. Data utama berupa nilai *Standard Penetration Test* (NSPT) dikonversi menjadi parameter tanah yang dibutuhkan dalam analisis, seperti berat volume tanah, kohesi, sudut geser dalam, dan modulus elastisitas.

Parameter tersebut dimasukkan sesuai dengan kondisi stratifikasi tanah di lokasi kajian sehingga model merepresentasikan variasi sifat tanah terhadap kedalaman secara sistematis.

Analisis pada *AllPile* dilakukan dengan pendekatan transfer beban, di mana distribusi tahanan ujung dan tahanan selimut dihitung secara bertahap seiring dengan peningkatan beban yang diberikan pada kepala tiang. Geometri tiang dimodelkan berdasarkan variasi desain yang dianalisis, meliputi diameter batang, panjang tiang, serta diameter pembesaran ujung untuk tipe *belled pile*. Pada pemodelan kelompok tiang, jumlah tiang dalam kelompok, jarak antar tiang, serta dimensi pilecap dimasukkan untuk memperhitungkan pengaruh interaksi antar tiang terhadap respons fondasi.

Pembebanan aksial rencana diterapkan secara bertahap sesuai skenario pembebanan yang ditinjau dalam analisis. Tahapan ini dilakukan untuk menghitung kapasitas daya dukung dan penurunan tiang. Nilai yang diperoleh kemudian dibandingkan dengan hasil perhitungan metode analitis guna melihat kesesuaian hasil serta menilai perbedaan yang terjadi antara kedua metode perhitungan.

Analisis Evaluasi Penurunan dan Rekomendasi Desain Fondasi

Evaluasi dilakukan dengan membandingkan kapasitas izin kelompok tiang terhadap beban aksial rencana berdasarkan ketentuan SNI 8460:2017. Fondasi dinyatakan memenuhi persyaratan daya dukung apabila kapasitas izin lebih besar dari beban yang bekerja dengan faktor keamanan yang telah ditetapkan.

Nilai penurunan total hasil perhitungan analitis dan pemodelan numerik selanjutnya dibandingkan dengan batas penurunan izin sesuai standar. Batas tersebut dihitung berdasarkan dimensi pilecap sehingga pengaruh ukuran fondasi terhadap deformasi tetap diperhitungkan dalam evaluasi kinerja layan.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil Perhitungan Daya Dukung

Metode *Luciano Decourt* digunakan dalam perhitungan kapasitas daya dukung tiang tunggal, dengan membedakan kontribusi tahanan gesek selimut (Qs) dan tahanan ujung (Qp) sebagai komponen utama kapasitas ultimit. Rekapitulasi hasil perhitungan untuk tiang tanpa pembesaran dan tiang dengan pembesaran ujung ditampilkan pada Tabel 8.

Tabel 8 Perhitungan Daya Dukung Tiang Tunggal

Jenis Pondasi	Qs (ton)	Qp (ton)	Kedalaman (m)	Qu (ton)	Qizin (ton)
Tiang Tanpa Pembesaran	44,363	18,568	30	62,931	20,977
Tiang Dengan Pembesaran	38,586	58,685	30	97,271	32,424

Sumber : Penulis, 2025

Hasil Perhitungan Daya Dukung Kelompok

Pendekatan *Converse–Labarre* digunakan dalam penentuan kapasitas kelompok tiang, di mana interaksi antar tiang dipertimbangkan untuk memperoleh nilai efisiensi kelompok dan kapasitas izinnya. Rekapitulasi hasil perhitungan kelompok tiang tanpa pembesaran disajikan pada Tabel 9.

Tabel 9 Perhitungan Daya Dukung Tiang Kelompok

Jenis Pondasi	Daya Dukung Izin Tunggal (ton)	Efisiensi Kelompok Tiang (ton)	Daya Dukung Kelompok (ton)
Tiang Tanpa Pembesaran	20,977	0,937	1768,99
Tiang Dengan Pembesaran	32,424	0,937	2734,28

Sumber : Penulis, 2025

Hasil Perhitungan Penurunan Tunggal dan Kelompok

Analisis penurunan kelompok tiang dihitung menggunakan formulasi [16] dan [17] dalam *Foundation Analysis and Design*, yang memisahkan besaran penurunan berdasarkan kontribusi deformasi batang tiang (S1), ujung tiang (S2), dan selimut tiang (S3), hingga diperoleh penurunan total dan penurunan kelompok. Hasil perhitungan untuk tiang tanpa pembesaran dan dengan pembesaran dirangkum pada Tabel 10.

Tabel 10 Perhitungan Penurunan Tiang Tunggal dan Tiang kelompok

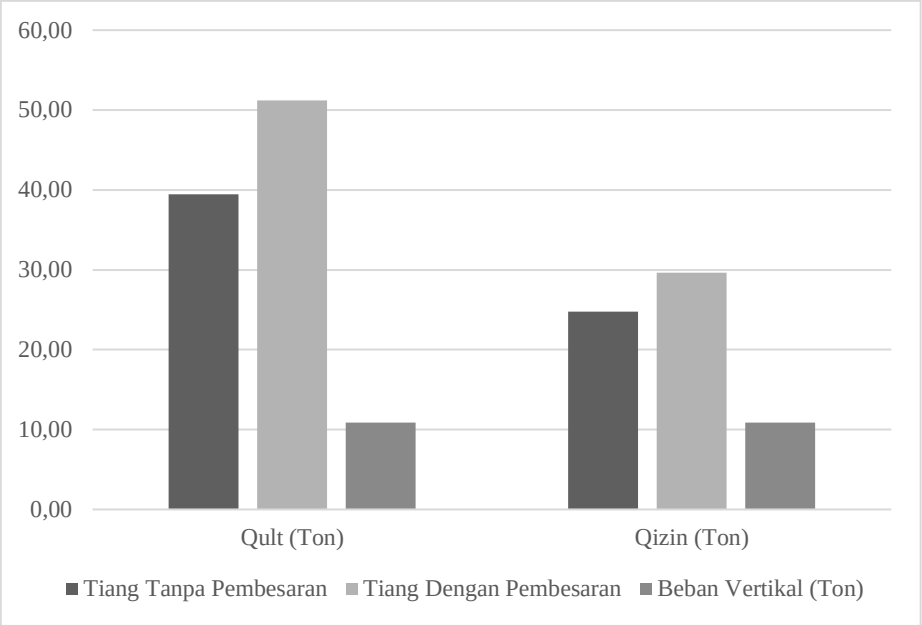
Jenis Pondasi	Dampak *Pile Shaft* (S1)	Dampak Ujung Tiang (S2)	Dampak Selimut Tiang (S3)	Penurunan Tiang Tunggal (cm)	Penurunan Tiang Kelompok (cm)	Penurunan Izin (cm)	Kontrol
Tiang Tanpa Pembesaran	0.054	0.37	0.95	1.374	6.074	22.67572	OKE
Tiang Dengan Pembesaran	0.11	2.09	3.01	5.21	11.48	22.67572	OKE

Sumber : Penulis, 2025

Analisis menggunakan *Allpile*

Perbandingan Pondasi Tiang Tunggal

Analisis kapasitas daya dukung dan penurunan dilakukan pada dua konfigurasi tiang tunggal, yaitu tiang tanpa pembesaran dan tiang dengan pembesaran pada ujung tiang, dengan menggunakan program Allpile sebagai alat bantu pemodelan. Melalui proses analisis tersebut diperoleh nilai kapasitas ultimit, kapasitas izin, serta besaran penurunan yang terjadi pada masing-masing kondisi tiang tunggal. Ringkasan hasil perhitungan disajikan pada Tabel 11, sedangkan hasil perbandingan kinerja kedua jenis tiang divisualisasikan dalam Grafik 1.



Grafik 1 Perbandingan Daya dukung pada Tiang Tunggal
Sumber : Penulis, 2025

Tabel 11 Hasil Daya dukung dan penurunan pada tiang tunggal dengan *Allpile*

Jenis Pondasi	Qult (Ton)	Qizin (Ton)	Beban Vertikal (Ton)	Penurunan (cm)
Tiang Tanpa Pembesaran	39,48	24,75	10,85	0,190
Tiang Dengan Pembesaran	51,21	29,67	10,85	0,241

Sumber : Penulis, 2025

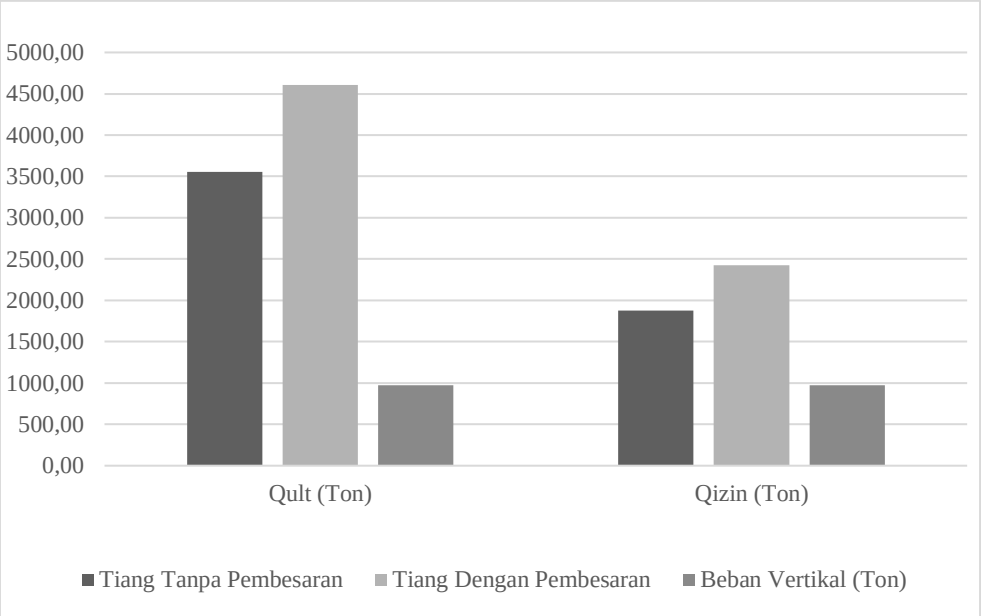
Perbandingan Pondasi Tiang Kelompok

Analisis kapasitas daya dukung dan penurunan juga dilakukan pada dua konfigurasi kelompok tiang, yaitu kelompok tiang tanpa pembesaran dan kelompok tiang dengan pembesaran pada ujung tiang, dengan memanfaatkan program Allpile sebagai media analisis. Dari pemodelan tersebut diperoleh nilai kapasitas ultimit kelompok, kapasitas izin kelompok, serta besarnya penurunan yang terjadi pada masing-masing konfigurasi. Hasil perhitungan dirangkum dalam Tabel 12, sementara perbandingan kinerja antar kelompok tiang ditampilkan dalam bentuk grafik pada Grafik 2.

Tabel 12 Perbandingan Pada Tiang Kelompok

Jenis Pondasi	Qult (Ton)	Qizin (Ton)	Beban Vertikal (Ton)	Penurunan (cm)
Tiang Tanpa Pembesaran	3553,21	1876,88	976,08	0,548
Tiang Dengan Pembesaran	4608,63	2425,35	976,08	0,691

Sumber : Penulis, 2025



Grafik 2 Perbandingan Tiang Kelompok
Sumber : Penulis, 2025

Pembahasan Hasil Daya Dukung dan Penurunan

Hasil analisis menunjukkan adanya perbedaan nilai kapasitas daya dukung izin yang diperoleh dari metode *Luciano Decourt* dan pemodelan numerik menggunakan perangkat lunak *Allpile*. Pada kondisi tiang tanpa pembesaran ujung, metode *Decourt* menghasilkan kapasitas izin sebesar 20,98 ton, sedangkan hasil *Allpile* menunjukkan nilai sebesar 24,75 ton. Perbedaan tersebut disebabkan oleh karakteristik metode yang digunakan, di mana metode *Decourt* merupakan pendekatan empiris berbasis korelasi nilai N-SPT dengan koefisien koreksi tertentu yang cenderung bersifat konservatif. Sebaliknya, *Allpile* memodelkan respons interaksi tanah–tiang secara numerik melalui distribusi tegangan dan deformasi sepanjang elemen tiang, sehingga kontribusi tahanan ujung dan gesekan selimut dapat direpresentasikan lebih rinci. Oleh karena itu, hasil *Allpile* umumnya memberikan estimasi kapasitas yang lebih besar dibandingkan pendekatan empiris.

Pada *belled pile*, peningkatan kapasitas ultimit terutama dipengaruhi oleh kenaikan komponen tahanan ujung (Qp). Pembesaran diameter pada bagian dasar tiang meningkatkan luas bidang tumpu (Ap), sehingga kapasitas end bearing mengalami peningkatan yang signifikan. Sementara itu, kontribusi tahanan gesek selimut (Qs) tidak menunjukkan peningkatan yang sebanding, bahkan pada hasil metode *Decourt* cenderung menurun. Hal ini mengindikasikan bahwa mekanisme utama *belled pile* dalam menahan beban vertikal lebih didominasi oleh transfer beban melalui tahanan ujung, sedangkan kontribusi gesekan selimut relatif kurang dominan akibat perubahan distribusi tegangan sepanjang batang tiang.

Dari aspek deformasi, hasil perhitungan penurunan menunjukkan bahwa *belled pile* menghasilkan settlement yang lebih besar dibandingkan tiang konvensional. Penurunan tiang tunggal meningkat dari 1,37 cm menjadi 5,21 cm, sedangkan

penurunan kelompok tiang meningkat dari 6,07 cm menjadi 11,48 cm. Peningkatan *settlement* ini berkaitan dengan besarnya transfer beban ke zona tanah di sekitar ujung tiang akibat kapasitas end bearing yang lebih tinggi, sehingga deformasi lokal serta konsolidasi tanah lempung jenuh menjadi lebih signifikan. Hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan kapasitas daya dukung tidak selalu berbanding lurus dengan penurunan deformasi, khususnya pada tanah lempung lunak yang memiliki kompresibilitas tinggi.

Meskipun begitu, besarnya penurunan total yang terjadi pada kedua konfigurasi fondasi masih berada di bawah batas penurunan izin, yaitu sebesar 22,67 cm sesuai ketentuan SNI 8460:2017. Dengan demikian, penerapan *belled pile* dapat dinyatakan meningkatkan kapasitas daya dukung secara signifikan tanpa melampaui kriteria batas layanan penurunan. Namun, hasil ini juga menegaskan bahwa kontrol deformasi tetap menjadi aspek penting dalam perencanaan fondasi *belled pile*, terutama pada konfigurasi kelompok tiang, mengingat potensi peningkatan settlement akibat interaksi tegangan antar tiang dan konsolidasi tanah lempung lunak.

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis numerik menggunakan metode *Luciano Decourt* dan *Converse Labarre* yang dipadukan dengan pemodelan perangkat lunak *Allpile*, pondasi eksisting tanpa pembesaran ujung memiliki daya dukung izin sebesar 20,98 ton pada tiang tunggal dan 1768,99 ton pada kelompok tiang. Penurunan yang terjadi masing-masing sebesar 1,374 cm dan 6,074 cm, yang masih berada di bawah batas penurunan izin sebesar 22,67 cm. Setelah dilakukan pembesaran ujung (*belled pile*), kapasitas dukung izin meningkat menjadi 32,43 ton untuk tiang tunggal dan 2734,29 ton untuk kelompok tiang, yang menunjukkan peningkatan sekitar 54–55% dibandingkan kondisi eksisting. Di sisi lain, penurunan mengalami peningkatan menjadi 5,21 cm pada tiang tunggal dan 11,48 cm pada kelompok tiang, namun nilai tersebut tetap memenuhi kriteria batas layanan berdasarkan ketentuan SNI 8460:2017. Dengan demikian, penerapan *belled pil*e dapat dinyatakan efektif dalam meningkatkan kapasitas daya dukung secara signifikan dengan *settlement* yang masih berada dalam ambang batas yang dapat diterima, sehingga layak direkomendasikan untuk perencanaan fondasi pada kondisi tanah lempung lunak serupa.

Untuk meningkatkan tingkat akurasi dan reliabilitas hasil analisis, penelitian lanjutan disarankan melakukan kalibrasi parameter tanah berdasarkan data investigasi lapangan yang lebih komprehensif, seperti uji SPT maupun CPT. Selain itu, kajian lebih lanjut perlu difokuskan pada pengaruh variasi diameter pembesaran ujung serta jarak antar tiang terhadap efisiensi kelompok, guna memperoleh konfigurasi fondasi yang optimal baik dari aspek teknis maupun ekonomis.

5. REFERENSI

[1] Muhawarman, A. S. M. (2025, February). *Kasus kanker diprediksi meningkat 70 persen pada 2050, Kemenkes perkuat deteksi dini*. Jakarta.

[2] Kim, S., Whang, S. W., & Kim, S. (2017). Pile foundation design through the increased bearing capacity of extended end pile. *Journal of Asian Architecture and Building Engineering*, *16*(2), 395–402. https://doi.org/10.3130/jaabe.16.395

[3] Karandikar, D. V. (2018). Challenges to quality control in bored cast-in-situ piling in growing urban environment. *Indian Geotechnical Journal*, *48*(2), 360–376. https://doi.org/10.1007/s40098-017-0277-z

[4] Nasr, A., Azzam, W., & Harran, I. (2022). The behavior of single under-reamed piles under compression load in clay: Numerical study. *Journal of Engineering Research*. https://doi.org/10.21608/erjeng.2022.146929.1076

[5] Septiadi, K., & Prihatiningsih, D. A. (2020). Studi manfaat daya dukung belled pile dan multi-belled pile.

[6] Ibrahim, A. A., & Karkush, M. O. (2023). The efficiency of belled piles in multi-layers soils subjected to axial compression and pullout loads: Review. *Journal of Engineering*, *29*(9), 166–183. https://doi.org/10.31026/j.eng.2023.09.12

[7] Badan Standardisasi Nasional. (2017). *SNI 8460:2017 Persyaratan perancangan geoteknik*.

[8] Zai, E. C., & Prihatiningsih, D. A. (2024). Analisis daya dukung dan penurunan tiang pada batuan lempung dengan berbagai diameter.

[9] Al-Omari, R. R., Fattah, M. Y., & Kallawi, A. M. (2017). Stress transfer from pile group in saturated and unsaturated soil using theoretical and experimental approaches.

[10] Terzaghi, K., & Peck, R. B. (1996). *Soil mechanics in engineering practice* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

[11] Fachridia, L., Ilham, N., & Dwi, A. I. (2017). Analisis penurunan bangunan pondasi tiang pancang dan rakit pada proyek pembangunan Apartemen Surabaya Central Business District. Retrieved from http://ejournal-s1.undip.ac.id/index.php/jkts

[12] F. F. Belgium. (n.d.). *Large diameter bored pile with enlarged base*.

[13] Prakash, S., & Sharma, H. D. (1990). *Pile foundation in engineering practice*. John Wiley & Sons.

[14] Decourt, L., & Quaresma, A. (1978). Capacidade de carga de estacas a partir de valores de SPT. In *Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações* (pp. 45–53).

[15] Mulyono, & Agustina, D. H. (2022). Perhitungan daya dukung tiang pancang tunggal dan kelompok (Studi kasus proyek Hangar Lion Air Batam). *Sigma Teknika*, *5*(2), 372–382.

[16] Bowles, J. E. (1993). *Foundation analysis and design* (5th ed.). McGraw-Hill.

[17] Vesic, A. S. (1977). Design of pile foundations. In H. F. Winterkorn & H. Y. Fang (Eds.), *Foundation engineering handbook* (pp. 492–529).