

PENGARUH KONFIGURASI KELOMPOK TIANG TERHADAP PENURUNAN DAN GAYA DALAM PADA TIANG

Jasson Buntara^{1*}, Andryan Suhendra¹, dan Sunarjo Leman¹

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil Universitas Tarumanagara Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
jasson.325210066@stu.untar.ac.id

Masuk: 02-07-2025, revisi: 07-10-2025, diterima untuk diterbitkan: 05-12-2025

ABSTRACT

Foundations are a crucial element in construction, as they function to transfer structural loads to soil layers with sufficient bearing capacity. In cases where the stable soil layer lies at a considerable depth, pile foundations are employed. These piles are generally arranged in groups and connected by a pile cap. This study analyzes the behavior of pile groups based on end bearing capacity, skin friction, and settlement, using soil investigation data and predetermined structural loads. The pile group configurations were evaluated using the Meyerhof, Vesic, and Janbu methods and modeled with finite element-based software. The analysis results indicate that the position and number of piles within a configuration significantly affect the magnitude of settlement and internal force reactions. Among the tested configurations, the fourth configuration, based on cross-sectional area, demonstrated the highest efficiency. This conclusion is supported by output results obtained from the software modeling. The findings of this study contribute to optimizing pile group foundation design in accordance with the soil characteristics at the specified site.

Keywords: Pile foundations; pile configurations; deformation, internal forces in piles

ABSTRAK

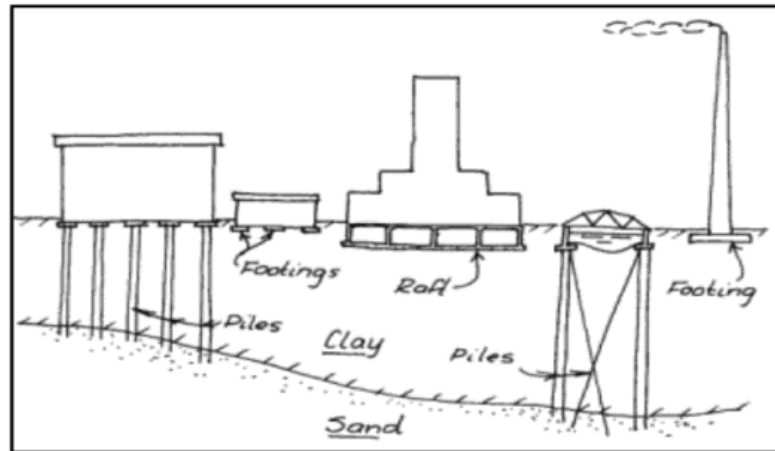
Fondasi merupakan elemen penting dalam konstruksi karena berfungsi menyalurkan beban struktur ke lapisan tanah yang memiliki daya dukung memadai. Pada kondisi tanah dengan lapisan stabil yang berada cukup dalam, digunakan fondasi tiang pancang yang umumnya disusun dalam kelompok dan diikat dengan pile cap. Penelitian ini menganalisis perilaku kelompok tiang pancang berdasarkan daya dukung ujung (*end bearing*), daya dukung selimut (*skin friction*), serta penurunan (*settlement*), menggunakan data penyelidikan tanah dan beban struktur yang telah ditentukan. Konfigurasi kelompok tiang dianalisis dengan pendekatan metode Meyerhof, Vesic, dan Janbu, serta dimodelkan menggunakan perangkat lunak berbasis elemen hingga. Hasil analisis menunjukkan bahwa posisi dan jumlah tiang dalam suatu konfigurasi berpengaruh terhadap besar penurunan dan reaksi gaya dalam yang terjadi. Dari beberapa konfigurasi yang diuji, konfigurasi ke-4 berdasarkan luas penampang dapat dinyatakan sebagai konfigurasi yang paling efisien. Hal ini dapat dinyatakan berdasarkan hasil *output* yang dihasilkan dari hasil pemodelan pada *software*. Penelitian ini memberikan kontribusi terhadap perencanaan fondasi kelompok tiang yang lebih optimal dan sesuai dengan karakteristik tanah di Lokasi yang telah ditentukan.

Kata kunci: Fondasi tiang; konfigurasi tiang; deformasi, gaya dalam pada tiang

1. PENDAHULUAN

Fondasi merupakan elemen penting dalam sistem struktur yang berfungsi untuk menyalurkan beban dari bagian atas bangunan ke lapisan tanah dibawahnya, dengan tujuan mencegah terjadinya keruntuhan geser tanah maupun penurunan tanah (*settlement*) yang berlebihan. Dalam proses perancangan, fondasi diklasifikasikan menjadi 2 jenis, yaitu fondasi dangkal dan fondasi dalam (Gambar 1). Pemilihan jenis fondasi ini disesuaikan dengan kondisi tanah dan besar beban yang harus di topang oleh struktur. Fondasi dangkal umumnya digunakan pada bangunan ringan atau berukuran kecil, serta ketika lapisan tanah di permukaan memiliki daya dukung yang cukup. Beberapa contoh fondasi dangkal meliputi fondasi telapak, fondasi pelat, dan fondasi batu kali. Sedangkan fondasi dalam seperti tiang pancang atau *bored pile* digunakan pada kondisi tanah yang kurang stabil atau ketika lapisan tanah yang mampu menahan beban berada pada kedalaman yang lebih dalam. Fondasi dalam menggunakan elemen vertikal seperti tiang untuk menyalurkan beban ke tanah yang lebih kuat di kedalaman. Pemilihan jenis fondasi yang tepat memerlukan pemahaman mendalam mengenai karakteristik tanah, termasuk daya dukung serta respon tanah terhadap beban, guna memastikan fondasi yang dirancang aman dan efisien (Peck et al., 1977). Selain itu, keputusan terkait penggunaan jenis fondasi juga sangat dipengaruhi oleh hasil investigasi awal tanah di lokasi proyek, kelayakan pelaksanaan dilapangan, kondisi geologi setempat, serta parameter tanah yang diperoleh dari hasil penyelidikan dan uji laboratorium. Pada umumnya, fondasi tiang yang menahan beban kombinasi dianalisis secara terpisah, dimulai dengan

beban aksial untuk mengevaluasi kapasitas dukung aksial dan penurunan vertikal, kemudian dilanjutkan dengan beban lateral guna menentukan kapasitas dukung lateral serta besar defleksi yang terjadi (Gunawan et al., 2021)



Gambar 1. Tipe fondasi berdasarkan hasil investigasi (Hanafiah et al., 2019)

Fondasi tiang pancang merupakan salah satu jenis fondasi dalam yang digunakan untuk mentransfer beban struktur ke lapisan tanah yang lebih dalam dan memiliki daya dukung lebih tinggi, terutama ketika tanah permukaan tidak cukup kuat. Perencanaan tiang pancang merupakan isu yang kompleks dan menarik bagi para insinyur karena dipengaruhi oleh berbagai faktor. Meski demikian, penelitian terkait dampak variasi bentuk penampang tiang terhadap daya tahan tiang kelompok relatif sangat sedikit (Memar et al., 2019). Penggunaan fondasi tiang pancang banyak digunakan pada proyek-proyek di darat maupun di lepas pantai, khususnya ketika berada pada lapisan tanah yang lunak atau tidak padat di kedalaman awal atau permukaan (Yi et al., 2021). Tiang pancang dapat dibuat dari berbagai material seperti beton, baja, atau kayu, dan biasanya dipasang dengan cara dipukul menggunakan alat seperti *diesel hammer* atau ditekan secara hidrolik ke dalam tanah menggunakan *hydraulic static driver* (HSPD). Jenis tiang yang umum digunakan meliputi tiang pancang beton pracetak, tiang pancang baja, dan bor *pile*. Fondasi ini sangat cocok diterapkan pada kondisi tanah lunak, jenis air, atau lokasi dengan lapisan tanah lemah di permukaan (Peck et al., 1977). Dalam perencanaan tiang pancang, beban lateral merupakan salah satu faktor penting yang dapat mempengaruhi stabilitas struktur. Tingkat stabilitas tersebut dapat dievaluasi melalui besarnya defleksi atau perpindahan lateral yang terjadi. Oleh karena itu, defleksi pada tiang harus dikontrol agar tidak melebihi batas toleransi yang telah ditetapkan dalam standar perancangan (Lamansari et al., 2019). Daya dukung fondasi mengacu pada kapasitas maksimum fondasi untuk menahan beban vertikal yang diberikan, sesuai dengan kondisi tanah tempat fondasi tersebut berada. Parameter – parameter tanah yang diperlukan untuk menentukan daya dukung ini diperoleh dari penyelidikan geoteknik, seperti pengujian *cone penetration test* (CPT), *standard penetration test* (SPT), serta pengujian laboratorium (Santoso & Hartono, 2020).

RUMUSAN MASALAH

Pada analisis ini akan membahas mengenai besarnya deformasi yang terjadi akibat beban aksial yang telah ditentukan dan membandingkan penurunan yang terjadi akibat beban yang dihasilkan dari program komputer berbasis metode elemen hingga.

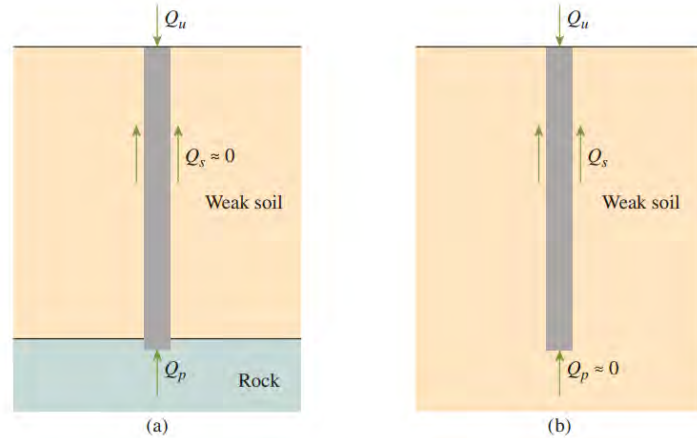
TUJUAN PENELITIAN

Analisis ini memiliki tujuan untuk mempelajari pengaruh beban yang diberikan terhadap besarnya deformasi yang terjadi, Membandingkan besarnya nilai deformasi terhadap beberapa formasi tiang.

Daya Dukung

Daya dukung (*bearing capacity*) merupakan suatu kemampuan tanah dan fondasi untuk menahan beban yang berasal dari struktur di atasnya. Secara umum, daya dukung tiang dibagi menjadi 2 yaitu: daya dukung ujung tiang (*end bearing capacity*) dan daya dukung selimut (*skin friction capacity*) (Gambar 2). Daya dukung ujung tiang berfungsi untuk mentransfer beban langsung ke lapisan tanah keras di dasar tiang, sedangkan daya dukung selimut mengandalkan gesekan antara permukaan tiang dan tanah sepanjang tiang untuk menopang beban. Perhitungan daya dukung fondasi tiang memerlukan data karakteristik tanah yang diperoleh melalui pengujian di laboratorium dan di lapangan. Pengujian laboratorium dilakukan untuk mengetahui sifat fisik (sifat indeks) serta sifat mekanis dari tanah

sedangkan pengujian lapangan biasanya terdapat pengujian SPT (*Standard Penetration Test*) yang digunakan untuk menentukan daya dukung tanah. Dalam pengujian dilapangan dapat mencakup data N-SPT yang kemudian akan dikorelasikan dengan sifat fisik dan mekanis tanah. Semua faktor perhitungan dapat mempengaruhi faktor gesekan antara dinding tiang dan tanah, yang pada akhirnya turut memengaruhi daya dukung tiang (Hanafiah et al., 2019).



Gambar 2. (a) *End bearing piles*; (b) *friction piles*. (Das, 2017)

Daya Dukung Ujung

Metode Meyerhof

Daya dukung ujung tiang pada lapisan tanah, dengan penggunaan beberapa parameter tanah yaitu:

$$Q_p = \sigma'_v \cdot A_p \cdot N_q \quad (1)$$

Dimana:

σ'_v = tekanan efektif vertikal (kN/m²)

A_p = luas penampang (m²)

N_q = faktor daya dukung tanah

Metode Vesic

Berdasarkan teori *expansion of cavities* tentang parameter tegangan efektif dapat dibuat persamaan:

$$Q_p = A_p \cdot K \cdot \gamma \cdot L \quad (2)$$

Dimana:

K = koefisien

L = panjang tiang

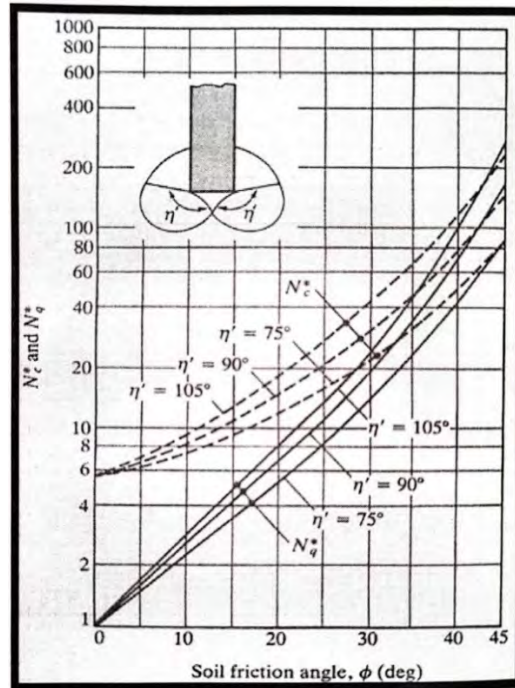
Metode Janbu

Persamaan menurut Janbu dalam perhitungan daya dukung ujung tiang (Q_p):

$$Q_p = q_p \cdot A_p = A_p \cdot (c \cdot N_c^* + q' \cdot N_q^*) \quad (3)$$

$$N_q^* = \left[\tan \phi + \sqrt{(1 + \tan^2 \phi)} \right]^2 \cdot n^2 \cdot \eta' \cdot \tan \phi \quad (4)$$

$$N_c^* = (N_q^* - 1) \cdot \cot \phi \quad (5)$$



Gambar 3. Faktor daya dukung metode Janbu (Das, 2017)

Variasi nilai N_c^* dan N_q^* dengan ϕ dan η' seperti Gambar 3. Nilai $\eta' = 75^\circ$ digunakan untuk lempung lunak (*soft clays*) dan $\eta' = 105^\circ$ untuk pasir padat (*dense sandy soils*).

Daya Dukung Selimut

Daya dukung friksi akibat gesekan selimut tiang dinyatakan dengan metode Meyerhof:

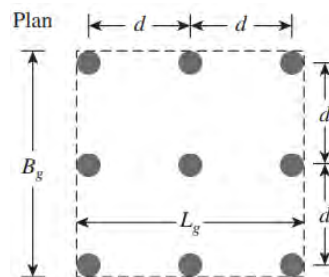
$$Q_s = \sum A_s \cdot f_s \tag{6}$$

Dimana:

- A_s = $H \cdot P_p$ = luas permukaan selimut tiang (m²)
- H = ketebalan lapisan (m)
- P_p = keliling tiang (m)
- f_s = $\alpha \cdot c$ atau $\sigma'v \cdot \tan \phi$ = tegangan geser pada selimut tiang (kPa atau kN/m²)

Efisiensi Tiang Kelompok

Efisiensi kelompok tiang (*pile group efficiency*) merupakan perbandingan antara daya dukung kelompok tiang terhadap jumlah total daya dukung individual tiang jika bekerja secara tersendiri (Gambar 4). Hal ini penting karena saat beberapa tiang dipasang berdekatan sebagai satu kelompok, interaksi antar tiang dan tanah yang terjadi dapat menyebabkan pengurangan jumlah daya dukung tiap tiang secara individual pada daya dukung total. Perilaku beban dan perpindahan pada kelompok tiang dipengaruhi oleh tingkat kekekangan kepala tiang yang diberikan oleh pile cap, serta oleh aksi rangka yang muncul akibat interaksi antar tiang (Wu et al., 2023).



Gambar 4. Efisiensi tiang kelompok (Das, 2017)

Metode Poulos & Davis

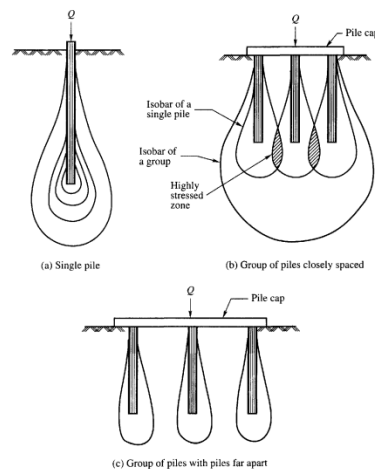
$$\eta = \frac{S_g}{n \cdot S_s} \quad (7)$$

Metode Terzaghi & Peck

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{n}} \quad (8)$$

Metode Prakash & Saran

$$\eta = 1 - \alpha \left(\frac{n-1}{n} \right) \quad (9)$$



Gambar 5. *Pressure Bulb* pada fondasi tiang pancang (a) *pressure bulb* pada tiang Tunggal (b) *pressure bulb* pada tiang kelompok yang berdekatan (c) *pressure bulb* pada tiang yang berjauhan. (Murthy, 2002) (Benjiro & Susilo, 2023)

Dalam perancangan tiang, dimensi dan jumlah tiang seperti panjang, diameter, dan total tiang perlu dihitung dengan cermat berdasarkan kondisi tanah dan beban struktur (Gambar 5). Tiang kelompok merupakan susunan dari beberapa tiang tunggal yang disatukan oleh *pile cap* menjadi satu sistem kerja. Dalam dunia konstruksi, penggunaan tiang tunggal sangat jarang digunakan, biasanya setidaknya terdapat tiga tiang di setiap pile cap atau di bawah setiap kolom atau fondasi untuk menjaga atau menjamin ketahanan struktur. Jarak antar tiang juga di tentukan oleh berbagai pertimbangan, seperti tumpah tumpah *pressure bulb* anatar tiang yang berdekatan, aspek biaya, serta efisiensi sistem fondasi kelompok (Murthy, 2002).

Deformasi Tiang

Deformasi pada fondasi tiang merupakan perubahan bentuk atau pergeseran yang terjadi akibat beban yang bekerja, baik secara vertikal maupun horizontal. Penurunan vertikal umumnya disebabkan oleh beban dari struktur bangunan, sementara pergeseran horizontal timbul akibat beban lateral seperti angin, gelombang laut, atau gempa bumi. Beberapa faktor yang dapat mempengaruhi besar deformasi antara lain jenis dan sifat tanah, metode pemancangan, serta karakteristik beban yang diterima tiang. Batas deformasi penurunan dalam uji pembebanan adalah 25 mm (2,5 cm) untuk tiang dengan diameter maksimal 80 cm, dan sebesar 4% dari diameter tiang untuk tiang berdiameter lebih dari 80 cm (SNI 8460:2017, 2017). Dalam teknik sipil, menentukan kapasitas maksimum dan respon perpindahan tiang terhadap beban, baik dalam kondisi pembebanan statis maupun siklik, termasuk beban aksial, lateral, dan momen merupakan aspek penting (Yang et al., 2020). Terdapat beberapa rumus yang dapat digunakan dalam menghitung deformasi tiang:

Metode Vesic memberikan rumus penurunan tiang sebagai berikut:

$$S_{e,g} = S_e \sqrt{\frac{B_g}{D}} \quad (10)$$

Diketahui:

$S_{e,g}$ = penurunan elastis kelompok tiang

B_g = lebar kelompok tiang

D = diameter/lebar tiang tunggal

Selain itu terdapat rumus atau formula lain dari Mayerhof (1976) memberikan formula penurunan tiang sebagai berikut:

$$S_{g(e)} = \frac{0,92 \cdot q \cdot \sqrt{B_g \cdot I}}{\tilde{N}} \quad (11)$$

$$I = 1 - \frac{L_g}{8 \cdot B_g} \geq 0,50 \quad (12)$$

Dengan demikian, penurunan total elastis pada tiang dapat dihitung dengan menjumlahkan seluruh komponen penurunan. Penurunan ini terjadi sepanjang tiang, ditambah dengan penurunan akibat beban yang bekerja di ujung tiang, serta penurunan yang disebabkan oleh gaya friksi sepanjang permukaan tiang.

2. METODE PENELITIAN

Metode Pengumpulan Data

Metode yang digunakan dalam pengumpulan data-data yang akan dipakai adalah dengan pengumpulan data dari pengujian di lapangan dan di lab. Pada metode ini, dilakukan dengan menentukan parameter tanah yang akan digunakan (*Boring Log*). Data yang dikumpulkan berupa data tanah dengan nilai N-SPT dan data laboratorium.

Metode Pengolahan Data

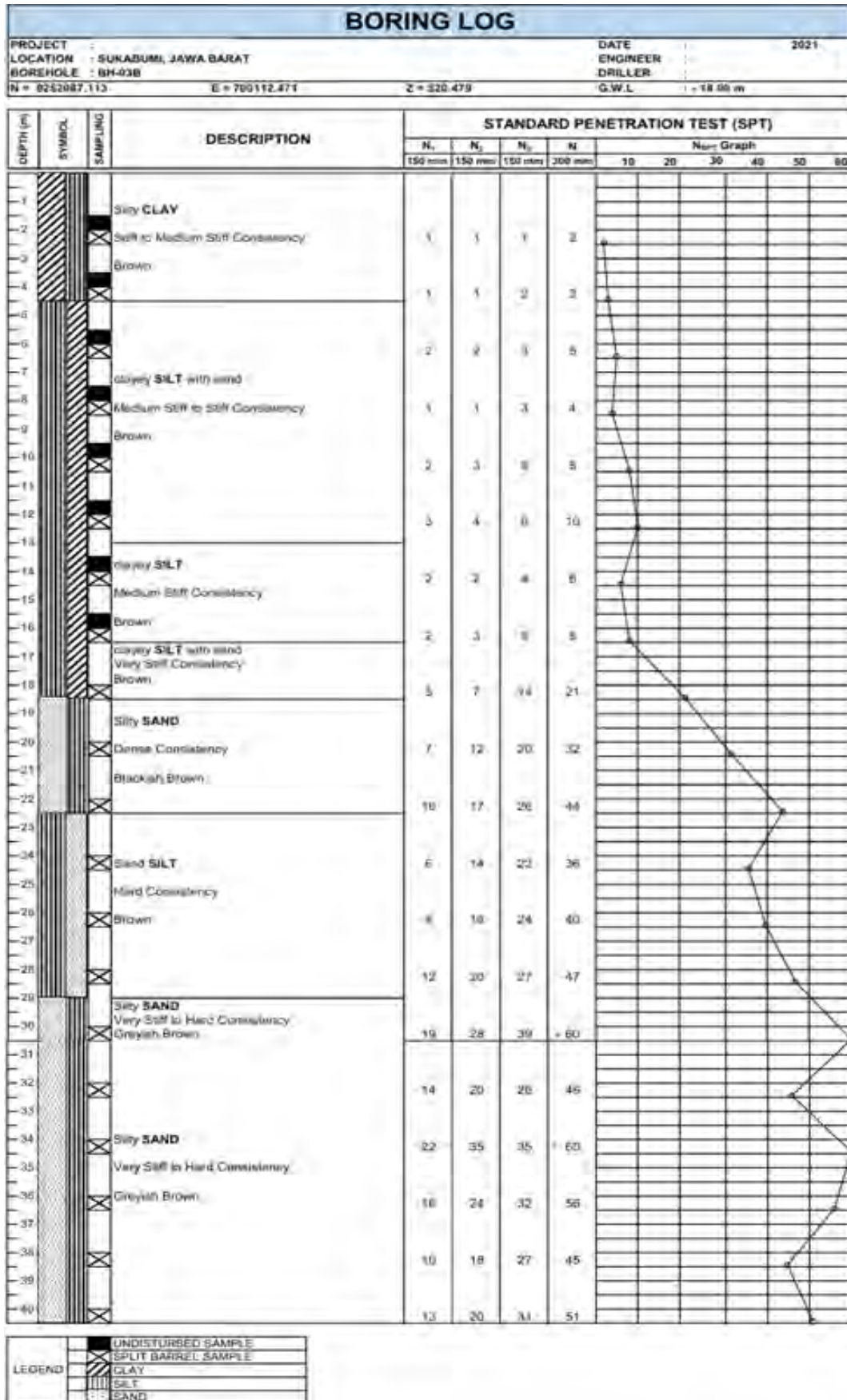
Pada proses ini dilakukan pembatasan penelitian dengan menentukan bentuk konfigurasi tiang yang akan di analisis. Hal yang ditentukan meliputi jumlah tiang dan bentuk *pile cap* yang akan digunakan. Selain itu pada pengolahan data dilakukan dengan menggunakan perhitungan manual dan menggunakan program komputer berbasis metode elemen hingga.

Aplikasi Midas GTS NX

Dalam penelitian ini, menggunakan software Midas GTS NX sebagai teknologi dalam membantu membuat pemodelan konfigurasi tiang yang telah ditentukan. Keunggulan utama MIDAS GTS NX yaitu kemampuannya untuk melakukan analisis model 2D dan 3D secara mendalam, mendukung berbagai jenis material tanah, termasuk elastis, plastis, dan viskoplastis. Program ini juga dilengkapi dengan fitur tahapan konstruksi bertahap yang memungkinkan pengguna untuk mensimulasikan proses pembangunan dan dampaknya terhadap tanah serta struktur di sekelilingnya.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam analisis ini, dimulai dengan menentukan data tanah yang ingin digunakan dalam analisis ini. Data tanah yang digunakan berasal dari daerah Sukabumi yang dapat dilihat pada Gambar 6 dan Tabel 1. Berdasarkan data tanah didapatkan beberapa nilai yang di korelasi untuk di jadikan parameter dalam pembuatan pemodelan dalam program komputer berbasis metode elemen hingga. Data borlog dan parameter tanah dapat di lihat pada Gambar 6 dan Tabel 1.

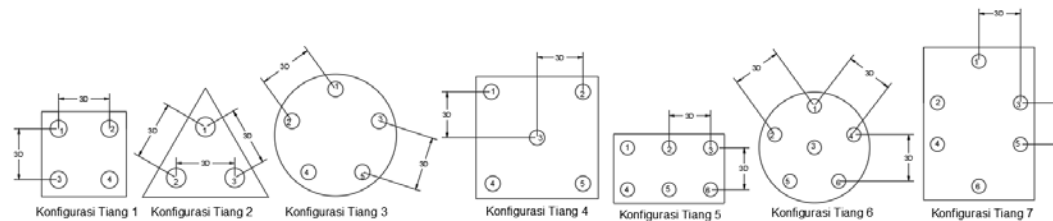


Gambar 6. Data borlog

Tabel 1. Resume Parameter Tanah

Kedalaman (m)	Jenis Tanah	Nilai N-SPT	Berat volume total (kN/m ³)	Kohesi efektif (kN/m ²)	Sudut geser dalam efektif (°)	Modulus Elastisitas (kN/m ²)
0,0 – 4,5	Lempung berlanau	2 – 3	16	5	25	500
4,5 – 13,0	Lanau berlempung	4 – 10	17	17	30	2800
13,0 – 16,5	Lanau berlempung	6 – 8	17	15	30	2450
16,5 – 18,5	Lanau berlempung	21	18	35	30	9000
18,5 – 22,5	Pasir berlanau	32 – 44	21	10	35	40000
22,5 – 29,0	Lanau berpasir	36 – 47	21	15	30	44000
29,0 – 40,0	Pasir berlanau	>45	22	12	35	50000

Setelah didapatkan parameter maka diperlukan penentuan bentuk dan jumlah konfigurasi tiang. Selain itu diperlukan penentuan ukuran atau diameter tiang yang akan digunakan di setiap konfigurasi tiang. Ukuran diameter diambil sebagai acuan pada konfigurasi 1 dengan diameter 0,6 meter yang kemudian akan dihitung berdasarkan luas penampang dan luas selimut. Bentuk konfigurasi dan ukuran dapat dilihat pada Gambar 7, Tabel 2 dan Tabel 3.



Gambar 7. Konfigurasi tiang

Tabel 2. Resume ukuran tiang berdasarkan luas penampang

Jenis konfigurasi	Jumlah tiang	Ukuran tiang (cm)	Jarak antar tiang (cm)
Konfigurasi 1	4	60	180
Konfigurasi 2	3	69	207
Konfigurasi 3	5	54	162
Konfigurasi 4	5	54	162
Konfigurasi 5	6	49	147
Konfigurasi 6	6	49	147
Konfigurasi 7	6	49	147

Tabel 3. Resume ukuran tiang berdasarkan luas selimut

Jenis konfigurasi	Jumlah tiang	Ukuran tiang (cm)	Jarak antar tiang (cm)
Konfigurasi 1	4	60	180
Konfigurasi 2	3	80	240
Konfigurasi 3	5	48	144
Konfigurasi 4	5	48	144
Konfigurasi 5	6	40	120
Konfigurasi 6	6	40	120
Konfigurasi 7	6	40	120

Berdasarkan dari bentuk konfigurasi tiang dan ukuran atau diameter tiang maka dapat menghitung beberapa hitungan manual seperti daya dukung ujung, daya dukung selimut, efisiensi penurunan elastisitas (Tabel 4 - Tabel 5),

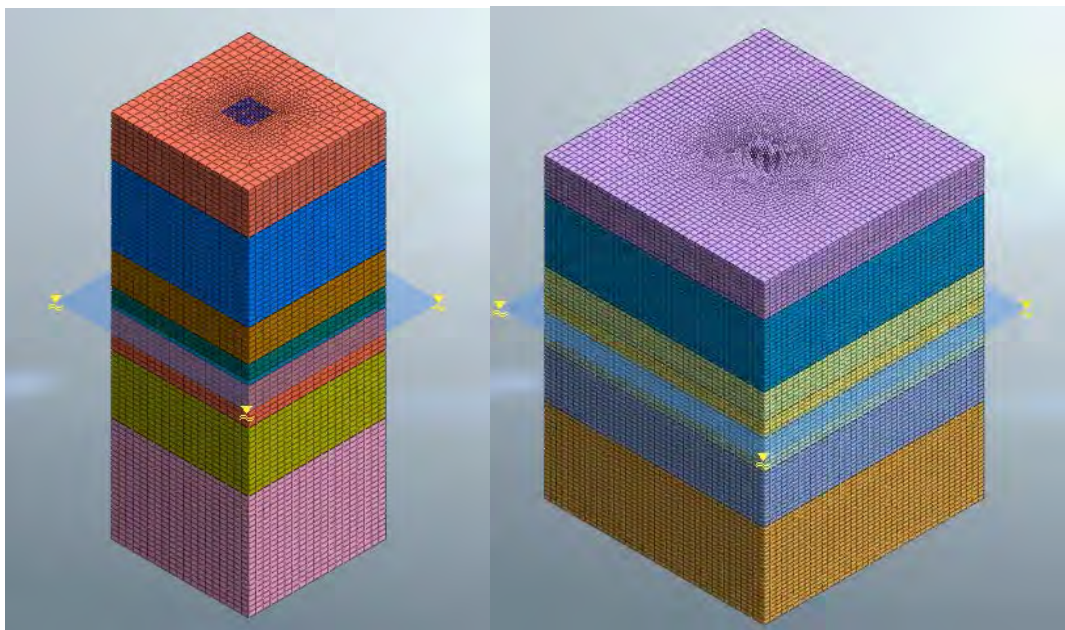
Tabel 4. Resume efisiensi kelompok tiang berdasarkan luas penampang

		Metode Poulos dan Davis	Metode Terzaghi dan Peck	Metode Prakash & Saran
Luas Penampang	KT 1	0,56	0,50	0,89
	KT 2	0,56	0,58	0,90
	KT 3	0,46	0,45	0,88
	KT 4	0,57	0,45	0,88
	KT 5	0,47	0,41	0,88
	KT 6	0,42	0,41	0,88
	KT 7	0,55	0,41	0,88

Tabel 5. Resume efisiensi kelompok tiang berdasarkan luas selimut

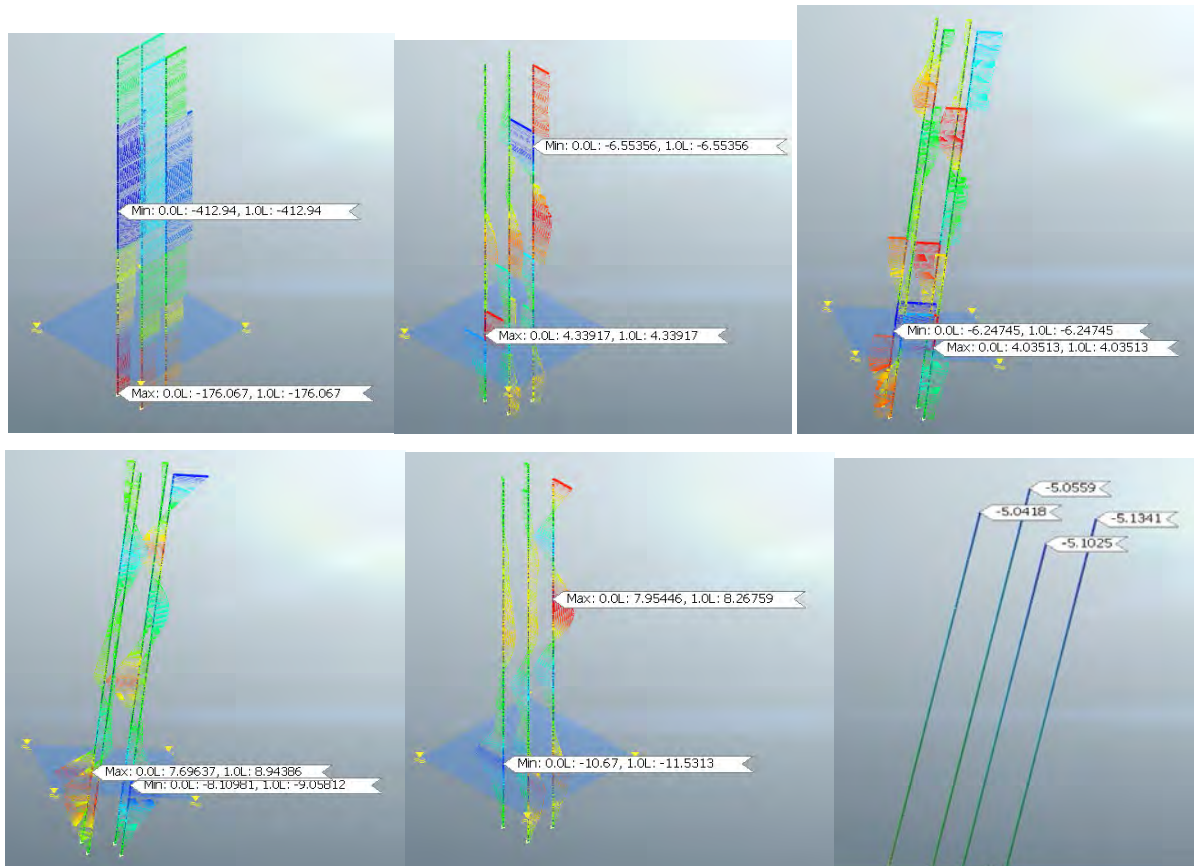
		Metode Poulos dan Davis	Metode Terzaghi dan Peck	Metode Prakash & Saran
Luas Selimut	KT 1	0,75	0,58	0,90
	KT 2	0,56	0,58	0,90
	KT 3	0,46	0,45	0,88
	KT 4	0,57	0,45	0,88
	KT 5	0,37	0,41	0,88
	KT 6	0,40	0,41	0,88
	KT 7	0,55	0,41	0,88

Setelah menghitung manual maka dapat membuat pemodelan pada program komputer berbasis metode elemen hingga. Beban yang bekerja telah di tentukan sebesar 2375 kN yang didapatkan dari beban bangunan. Beberapa bentuk pemodelan konfigurasi tiang dapat di lihat pada Gambar 8, Gambar 9, dan Gambar 10.

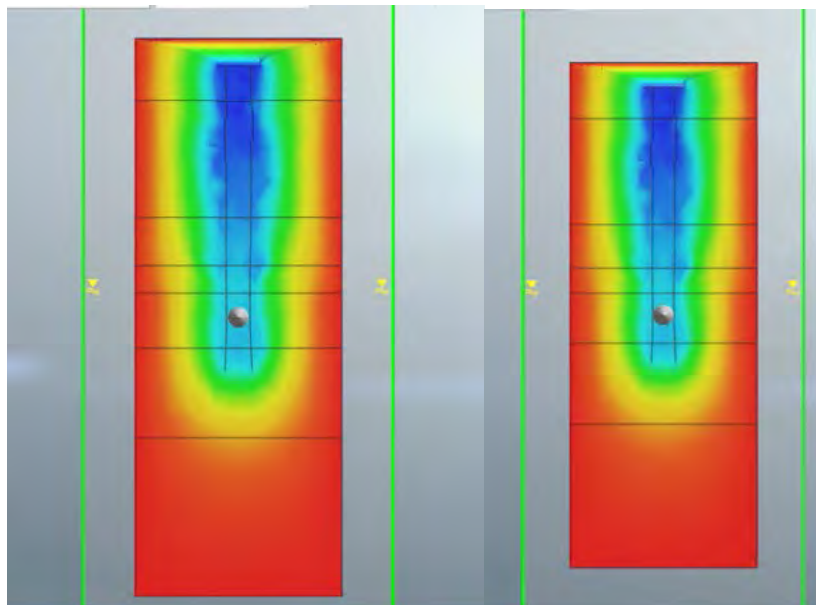


Gambar 8. Bentuk pemodelan program komputer

Berdasarkan pemodelan maka didapatkan hasil dari program komputer yang dapat dilihat pada Gambar 9, Gambar 10 dan Tabel 6 - Tabel 9.



Gambar 9. Output program komputer



Gambar 10. Penurunan tiang dari program komputer

Tabel 6. Resume *displacement* berdasarkan luas penampang

Konfigurasi	Jumlah tiang	Ukuran Tiang (cm)	<i>Displacement</i> (mm)							Rata-rata
			Tiang 1	Tiang 2	Tiang 3	Tiang 4	Tiang 5	Tiang 6		
Konfigurasi 1	4	60	-5,06	-5,13	-5,04	-5,10	-	-	-5,08	
Konfigurasi 2	3	69	-6,16	-6,13	-6,12	-	-	-	-6,14	
Konfigurasi 3	5	54	-8,15	-8,36	-8,18	-8,02	-7,87	-	-8,12	
Konfigurasi 4	5	54	-4,65	-4,68	-4,70	-4,66	-4,68	-	-4,68	
Konfigurasi 5	6	49	-5,29	-5,50	-5,38	-5,34	-5,53	-5,64	-5,45	
Konfigurasi 6	6	49	-8,14	-8,43	-8,32	-8,10	-8,31	-8,09	-8,23	
Konfigurasi 7	6	49	-5,12	-5,15	-5,33	-5,25	-5,41	-5,41	-5,28	

Tabel 7. Resume *displacement* berdasarkan luas selimut

Konfigurasi	Jumlah tiang	Ukuran Tiang (cm)	<i>Displacement</i> (mm)							Rata-rata
			Tiang 1	Tiang 2	Tiang 3	Tiang 4	Tiang 5	Tiang 6		
Konfigurasi 1	4	60	-5,06	-5,13	-5,04	-5,10	-	-	-5,08	
Konfigurasi 2	3	80	-5,12	-5,17	-5,12	-	-	-	-5,14	
Konfigurasi 3	5	48	-9,07	-9,27	-9,06	-9,33	-9,17	-	-9,18	
Konfigurasi 4	5	48	-7,35	-6,66	-7,00	-6,57	-5,39	-	-6,59	
Konfigurasi 5	6	40	-6,44	-6,56	-6,47	-6,38	-6,40	-6,43	-6,45	
Konfigurasi 6	6	40	-10,68	-10,11	-10,70	-10,99	-10,47	-10,47	-10,57	
Konfigurasi 7	6	40	-7,03	-7,40	-7,54	-7,54	-7,50	-5,95	-7,16	

Tabel 8. Resume nilai maksimal gaya dan momen berdasarkan luas penampang

Konfigurasi	Jumlah tiang	Ukuran Tiang (cm)	Gaya dan momen maksimum				
			<i>Axial Force</i> (kN)	<i>Shear Force Y</i> (kN)	<i>Shear force Z</i> (kN)	<i>Bending Moment Y</i> (kN.m)	<i>Bending Moment Z</i> (kN.m)
Konfigurasi 1	4	60	-176,07	-6,57	4,03	8,94	8,27
Konfigurasi 2	3	69	-206,68	7,47	10,33	10,91	20,80
Konfigurasi 3	5	54	-0,43	9,26	12,69	19,99	8,65
Konfigurasi 4	5	54	-53,54	2,83	3,31	6,19	4,81
Konfigurasi 5	6	49	-0,06	5,71	14,40	21,55	9,01
Konfigurasi 6	6	49	-0,47	5,79	9,95	9,09	5,06
Konfigurasi 7	6	49	-97,35	6,38	6,97	10,49	7,43

Tabel 9. Resume nilai maksimal gaya dan momen berdasarkan luas selimut

Konfigurasi	Jumlah tiang	Ukuran Tiang (cm)	Gaya dan momen maksimum				
			<i>Axial Force</i> (kN)	<i>Shear Force Y</i> (kN)	<i>Shear force Z</i> (kN)	<i>Bending Moment Y</i> (kN.m)	<i>Bending Moment Z</i> (kN.m)
Konfigurasi 1	4	60	-176,07	-6,57	4,03	8,94	8,27
Konfigurasi 2	3	80	-0,75	10,04	5,41	7,19	19,06
Konfigurasi 3	5	48	-0,52	9,55	9,01	13,78	5,84
Konfigurasi 4	5	48	-1,15	13,92	18,38	13,36	22,23
Konfigurasi 5	6	40	-0,73	4,62	7,03	6,10	5,69
Konfigurasi 6	6	40	-1,09	17,28	10,37	13,30	32,03
Konfigurasi 7	6	40	-1,94	23,44	32,00	22,15	22,15

4. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diambil dari analisis ini yaitu:

1. Dapat disimpulkan bahwa penurunan per tiang maksimal terkecil berada pada konfigurasi tiang 4 pada luas penampang jika dibandingkan dengan konfigurasi tiang lainnya hal ini dapat dilihat dari besarnya nilai penurunan konfigurasi tiang 4 yaitu sebesar -4,6998 mm. Sedangkan penurunan per tiang terbesar berada pada konfigurasi tiang 6 hal ini dapat dilihat dari besarnya nilai penurunan konfigurasi tiang 6 yaitu -10,9854 mm.
2. Dapat disimpulkan bahwa nilai *axial force* konfigurasi tiang 2 berdasarkan luas penampang memiliki nilai *axial force* yang paling besar yaitu -206,6780 kN yang kemudian dilanjutkan oleh konfigurasi tiang 1 yaitu sebesar -176,0740 kN. Hal ini menunjukkan bahwa kedua konfigurasi tiang ini lebih efisien dalam hal menyalurkan beban vertikal dibandingkan dengan konfigurasi tiang lainnya.
3. Dapat disimpulkan bahwa nilai *shear force* arah y dan z pada konfigurasi tiang 7 pada luas selimut memiliki nilai terbesar yaitu *shear force y* sebesar 23,4448 kN sedangkan *shear force z* sebesar 31,9960 kN. Hal ini dapat diartikan bahwa konfigurasi tiang 7 pada luas selimut menerima beban yang besar dan dapat mengindikasikan ketidakefisienan atau risiko kegagalan jika kapasitas tiang tidak mencukupi.
4. Dapat ditarik kesimpulan bahwa konfigurasi tiang 4 pada luas penampang memiliki nilai terkecil di bandingkan dengan konfigurasi tiang lainnya. Hal ini dapat dilihat berdasarkan nilai *shear force y* sebesar 2,8277 kN dan *shear force z* sebesar 3,3127 kN, *bending momen y* sebesar 6,1905 kNm dan *bending momen z* sebesar 4,8131 kNm, dan penurunan per tiang sebesar -4,6998 mm. Dengan nilai *axial force* sebesar -53,5404 kN maka disimpulkan bahwa konfigurasi 4 pada luas penampang dapat diindikasikan bahwa tiang dan penempatan tiang yang telah di tentukan bekerja secara efisien dan distribusi beban yang baik antar tiang.
5. Dapat disimpulkan bahwa konfigurasi tiang 6 dan 7 pada luas selimut memiliki nilai *bending momen y* dan z terbesar di bandingkan konfigurasi tiang lainnya. Hal ini dapat di lihat dari nilai *bending momen y* konfigurasi tiang 6 dan 7 sebesar 13,2951 kNm dan 22,1489 kNm sedangkan *bending momen z* konfigurasi 6 dan 7 sebesar 32,0300 kNm dan 23,0514 kNm. Sehingga hal ini dapat diakibatkan karena diameter tiang yang kecil yaitu sebesar 0,4 m.

Saran untuk keberlanjutan analisis ini yaitu:

- Perbandingan daya dukung antar konfigurasi tiang
- Variasi konfigurasi tiang dibuat dengan bentuk yang bermacam-macam

DAFTAR PUSTAKA

- Benjiro, C., & Susilo, A. J. (2023). Analisis Daya Dukung Dan Efisiensi Tiang Pada Tanah Pasir Padat Dan Pasir Lepas Dengan Konfigurasi Tiang 4, 9, 16. *JMTS: Jurnal Mitra Teknik Sipil* 6(2). <https://doi.org/10.24912/jmts.v6i2.22003>
- Das, B. M. (2017). *Principles of Foundation Engineering, 9th Edition, SI Edition by Braja M. Das Nagaratnam Sivakugan (z-lib.org)*.
- Gunawan, S., Surjandari, N., Setiawan, B., & Purwana, Y. (2021). *Vertical Displacement of a Single Pile Due to Axial & Lateral Loads. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 841, 012006*.

- Hanafiah, Zairipan, J., & Muhammad, R. (2019). Rekayasa Fondasi Untuk Program Vokasi.
- Lamansari, F. S., Balamba, S., & Manaroinson, L. D. K. (2019). Analisis Pengaruh Jarak Dan Konfigurasi Tiang Pada Tanah Lempung Terhadap Defleksi Tiang Pancang Kelompok Akibat Beban Lateral. *Jurnal Sipil Statik*, 7(11), 1557–1568.
- Memar, M., Zomorodian, S., & Vakili, A. (2019). *Effect of pile cross section shape on pile group behavior under lateral loading in sand. International Journal of Physical Modelling in Geotechnics*, 20, 1–43.
- Murthy, V. N. S. (2002). *Geotechnical Engineering: Principles and Practices of soil mechanics and Foundation Engineering*.
- Peck, R. B., Hanson, W. E., & Thornburn, T. H. (1977). *Foundation Engineering*.
- Santoso, H. T., & Hartono, J. (2020). Analisis Perbandingan Daya Dukung Pondasi Tiang Pancang Berdasar Hasil Uji Spt Dan Pengujian Dinamis. *Jurnal Riset Rekayasa Sipil*, 4(1), 30.
- SNI 8460:2017. (2017). "Badan Standardisasi Nasional Standar Nasional Indonesia Persyaratan perancangan geoteknik.
- Wu, W., Lu, C., Chen, L., Mei, G., Naggar, M. H. El, & Liu, H. (2023). *Horizontal vibration characteristics of pile groups in unsaturated soil considering coupled pile–pile interaction. Ocean Engineering Volume 281*.
- Yang, Z. X., Gao, Y. Y., Jardine, R. J., Guo, W. B., & Wang, D. (2020). *Large Deformation Finite-Element Simulation of Displacement-Pile Installation Experiments in Sand. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 146(6).
- Yi, J. T., Liu, F., Zhang, T. Bin, Yao, K., & Zhen, G. (2021). *A large deformation finite element investigation of pile group installations with consideration of intervening consolidation. Applied Ocean Research Volume 112*.

