

STUDI NUMERIK PENGARUH JARAK DAN KONFIGURASI KELOMPOK TIANG TERHADAP DAYA DUKUNG AKSIAL TEKAN FONDASI DALAM

Rahmat KURNIAWAN^{1*}, Arif Rahman Hakim SITEPU¹, Syahidus SYUHADA¹

¹Program Studi Teknik Sipil, Institut Teknologi Sumatera, Lampung, Indonesia

*Email korespondensi: rahmat.kurniawan@si.itera.ac.id

[diterima: 24 April 2020, disetujui: 23 Juni 2020]

ABSTRACT

Group pile foundation can bear a heavier load than a single pile. Besides material, group pile bearing capacity is affected by the other three components, namely pile spacing (s), number of piles (n), and arrangement of piles. Those three components influence the ability of group pile bearing upper structure load; it is often called a group pile efficiency factor. The amount of efficiency factor of the group pile is necessary for calculating the addition or reduction of pile number based on the required allowable bearing capacity. Through manual calculation and numerical modeling with ABAQUS with three dimensional (3D) conditions, this research compares the value and the difference among the obtained result. The manual calculation is utilizing empirical equations commonly used in practical work, namely Converse-Labarre, Los Angeles Group Action, and Seiler-Keeney. In this study, soil data obtained from laboratorium Teknik 1 Institut Teknologi Sumatera. The pile foundation used has a diameter of 0.9 m and an embedded length of 10 m. Pile configuration varied with three piles, four piles, and five piles. Soil spacing modified by 2.5; 3; 3.5 time with its diameter. Based on the analysis, the axial bearing capacity of a single pile calculated by numerical modeling has similar value with manual calculation using the Meyerhof method. The configuration of a group pile with four piles has a maximum efficiency factor. The greater the distance to the diameter, the greater the group efficiency factor. Generally, numerical modeling gives the lower value of efficiency factor than empirical equation.

Key words: Group pile foundation, pile spacing, efficiency factor, bearing capacity.

INTISARI

Kelompok tiang fondasi digunakan saat beban yang bekerja tidak mampu dipikul oleh tiang fondasi tunggal, sehingga dibutuhkan lebih dari satu tiang dalam satu *pile cap*. Selain material, nilai daya dukung tiang juga sangat dipengaruhi oleh tiga komponen, yaitu jarak antar tiang (s), jumlah tiang (n) dan konfigurasi atau susunan tiang. Ketiga komponen tersebut sangat memengaruhi kemampuan kelompok tiang dalam memikul beban struktur atas yang biasa disebut dengan faktor efisiensi kelompok tiang. Nilai efisiensi kelompok tiang fondasi sangat dibutuhkan untuk mengetahui penambahan atau pengurangan jumlah tiang terhadap daya dukung yang dibutuhkan. Dalam penelitian ini, evaluasi faktor efisiensi dilakukan dengan membandingkan pemodelan numerik menggunakan program ABAQUS dalam kondisi tiga dimensi (3D) terhadap persamaan empiris yang sering digunakan seperti metode Converse-Labarre, Los Angeles Group Action, dan Seiler-Keeney. Dalam penelitian ini, data tanah bersumber dari hasil pengujian tanah pada pembangunan gedung laboratorium Teknik 1 Institut Teknologi Sumatera. Tiang pondasi yang digunakan memiliki diameter 0.9 m dan panjang tiang tertanam 10 m. Konfigurasi kelompok tiang menggunakan variasi tiga tiang, empat tiang dan lima tiang, dan jarak antar tiang divariasikan menjadi 2.5; 3; 3.5 kali diameter. Berdasarkan hasil analisis, nilai daya dukung tiang tunggal dari program ABAQUS mendekati hasil perhitungan manual menggunakan metode Meyerhof. Bentuk konfigurasi kelompok tiang dengan empat tiang tersusun dalam dua baris dan dua kolom menghasilkan nilai faktor efisiensi maksimum. Semakin besar nilai jarak antar tiang terhadap diameter tiang, maka faktor efisiensi akan meningkat. Secara umum pemodelan numerik menghasilkan nilai faktor efisiensi yang lebih rendah dibandingkan persamaan empiris.

Kata kunci: Kelompok tiang fondasi, jarak antar tiang, faktor efisiensi, daya dukung.

PENDAHULUAN

Perencanaan fondasi dalam pada struktur bawah bangunan harus mempertimbangkan kemampuan tanah dalam memikul beban yang biasa disebut dengan daya dukung tanah. Kemampuan tanah tersebut bergantung kepada kuat geser dan deformasi tanah. Ketika beban struktur atas tidak mampu dipikul oleh tiang tunggal, kelompok tiang menjadi solusi alternatif.

Kemampuan kelompok tiang dalam memikul beban tidak sepenuhnya sama dengan kemampuan keseluruhan tiang tunggal dikalikan dengan jumlah tiang yang ada (Darjanto, 2011). Hal ini dikarenakan terdapat bidang keruntuhan tanah disekitar tiang yang saling mempengaruhi, sehingga kemampuan tanah yang berada diantara tiang yang berdekatan akan dipengaruhi bidang keruntuhan tersebut. Oleh karena itu, perencanaan fondasi tiang harus mempertimbangkan konfigurasi dan jarak antar tiang.

Tingkat kemampuan kelompok tiang memikul beban terhadap penjumlahan daya dukung tiang tunggal seluruh tiang dalam kelompok tiang dinamakan dengan faktor efisiensi (Tuan, 2016). Beberapa metode perhitungan empiris yang dapat digunakan untuk menghitung faktor efisiensi yaitu Converse-Labarre, Los Angeles *Group Action*, dan Seiler- Keeney (Das, 2014). Metode tersebut menggunakan parameter diameter tiang, jumlah baris tiang, jumlah tiang dalam satu baris dan jarak antar tiang.

Metode perhitungan faktor efisiensi yang ada dikembangkan dari persamaan empiris melalui pengujian laboratorium dan lapangan. Metode tersebut memiliki kekurangan dalam hal bentuk konfigurasi kelompok tiang yang dapat dihitung hanya berbentuk simetris atau berbentuk persegi dan jumlah tiang genap. Bentuk kelompok tiang segitiga dan jumlah tiang ganjil tidak dapat diakomodir oleh metode empiris. Oleh karena itu, penelitian ini menerapkan pemodelan dan analisis numerik

menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan program ABAQUS tiga dimensi untuk melihat pengaruh bentuk konfigurasi segitiga dan jumlah tiang ganjil.

DAYA DUKUNG AKSIAL TEKAN TIANG TUNGGAL

Daya dukung tiang adalah kemampuan atau kapasitas suatu tiang dalam mendukung atau memikul beban yang biasanya dinyatakan dengan satuan gaya (kN). Pada penelitian ini daya dukung aksial tekan tiang tunggal akan dianalisis secara pendekatan statis. Kapasitas daya dukung ultimit (Q_u) adalah nilai dari penjumlahan tahanan ujung bawah (Q_p) dan tahanan gesek atau friksi (Q_s). Berikut adalah persamaan umum dari perhitungan kapasitas daya dukung tiang:

$$Q_u = Q_p + Q_s \quad (1)$$

$$Q_{all} = \frac{Q_u}{SF} \quad (2)$$

Keterangan:

Q_u = Kapasitas daya dukung (kN)

Q_p = Tahanan ujung (kN)

Q_s = Tahanan gesek friksi (kN)

Q_{all} = Daya dukung ijin (kN)

SF = Faktor keamanan

Kapasitas *ultimate* dapat di hitung berdasarkan nilai N dari uji penetrasi standar (SPT). Nilai SPT yang digunakan merupakan nilai rerata dari dasar ke atas/permukaan sebesar $10d$ (N_1), sedangkan nilai SPT lainnya digunakan nilai rerata dasar/ujung tiang ke bawah sebesar $4d$ (N_2). Terdapat dua metode yang umum digunakan dalam dunia praktis, metode tersebut diusulkan oleh Meyerhof pada tahun 1995 dan Briaud pada tahun 1985 (Hardiyatmo, 2018). Berikut ini merupakan persamaan daya dukung tiang menurut Meyerhof:

$$Q_p = A_p 40 N \left(\frac{L}{d} \right) \leq 400 N A_p \quad (3)$$

$$N = \frac{N_1 + N_2}{2} \quad (4)$$

$$Q_s = A_s f_s \quad (5)$$

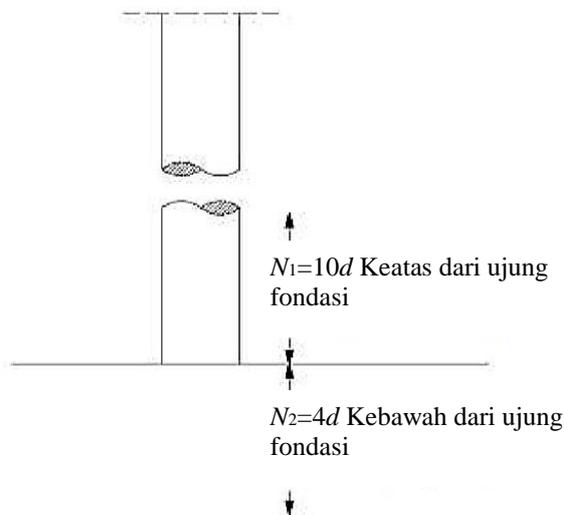
$$f_s = X_m N \quad (6)$$

Keterangan:

A_P = Luas penampang tiang

N = Nilai rata-rata dari N_1 dan N_2

X_m = Koefisien tiang



Gambar 1. Pengambilan nilai NSPT rata-rata

Metode Briaud untuk menghitung daya dukung tekan tiang fondasi dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$Q_p = q'_e A_b \quad (7)$$

$$q'_e = 19.7 \sigma_r (N_{60})^{0.36} \quad (8)$$

$$Q_s = A_s f_s \quad (9)$$

$$f_s = 0.224 \sigma_r (N_{60})^{0.29} \quad (10)$$

$$N_{60} = \frac{N E_M C_B C_S C_R}{60} \quad (11)$$

Keterangan:

E_M = Efisiensi Pemukul

C_B = Faktor Diameter Lubang Bor

C_S = Faktor Pengambilan Contoh

C_R = Faktor Panjang Batang

EFISIENSI KELOMPOK TIANG

Saat beberapa tiang yang berdekatan disatukan oleh suatu *pile cap* dan bekerja secara bersama-sama sebagai suatu kelompok tiang, perlu ditinjau besarnya daya dukung kelompok tiang tersebut terhadap besarnya beban yang bekerja. Stabilitas kelompok tiang tergantung dari dua hal, yaitu kapasitas dukungan tanah di sekitar dan di bawah kelompok tiang dalam mendukung beban total struktur dan pengaruh penurunan konsolidasi tanah yang terletak dibawah kelompok tiang. Untuk menghitung daya dukung kelompok tiang kita dapat mendefinisikan sebagai perkalian antara kapasitas daya dukung satu tiang dengan banyaknya tiang dikalikan dengan efisiensi kelompok tiang. Atau dapat dihitung menggunakan rumus umum berikut:

$$Q_g = E_{ff} n Q_u \quad (12)$$

Efisiensi tiang adalah nilai pengali terhadap kapasitas daya dukung tiang tunggal dengan memperhatikan pengaruh kelompok tiang. Beberapa persamaan efisiensi tiang telah diusulkan untuk menghitung kapasitas kelompok tiang, namun semuanya yang bersifat pendekatan secara empiris. Persamaan empiris kelompok tiang adalah perhitungan dengan cara metode pendekatan. Berikut rumus perhitungan efisiensi dengan metode empiris:

$$E_{ff} = \frac{Q_u}{Q_{seluruh\ tiang}} \times 100\% \quad (13)$$

Metode Converse-Labarre Formula adalah salah satu metode yang populer dan salah satu metode yang sering dipakai untuk perhitungan efisiensi kelompok tiang. Metode ini menggunakan komponen pendekatan berupa nilai jumlah baris tiang, jumlah tiang, diameter tiang dan spasi konfigurasi kelompok tiang. Selain metode empiris Converse-Labarre, analisis efisiensi juga menggunakan persamaan metode Los Angeles *Group Action Equation* dan metode Seiler-Keeney (Das, 2014). Ketiga metode empiris tersebut memiliki persamaan mempertimbangkan

jumlah tiang dan diameter. Berikut ini merupakan persamaan dari ketiga metode tersebut:

Converse-Labarre Formula

$$E_{ff} = 1 - \Theta \left[\frac{(n_1 - 1)n_2 + (n_2 - 1)n_1}{90 n_1 n_2} \right] \quad (14)$$

Los Angeles Group Action

$$E_{ff} = 1 - \frac{D}{\pi d n_1 n_2} \left[\frac{n_1(n_2 - 1) + n_2(n_1 - 1) + \sqrt{2}(n_1 - 1)(n_2 - 1)}{n_1 + n_2} \right] \quad (15)$$

Seiler Keeney Equations

$$E_{ff} = \left\{ 1 - \left[\frac{11d}{7(d^2 - 1)} \right] \left[\frac{n_1 + n_2 - 2}{n_1 + n_2 - 1} \right] \right\} + \frac{0.3}{n_1 + n_2} \quad (16)$$

Keterangan:

E_{ff} = Efisiensi kelompok tiang (%)

n_2 = Jumlah baris tiang

n_1 = Jumlah tiang dalam satu baris

Θ = $\tan^{-1} \left(\frac{d}{s} \right)$, dalam derajat

s = Jarak pusat ke pusat tiang (m)

d = Diameter tiang (m)

PEMODELAN NUMERIK MENGGUNAKAN PROGRAM ABAQUS

ABAQUS merupakan program analisis numerik menggunakan metode elemen hingga yang dapat mensimulasikan prinsip mekanika kontinum tegangan dan regangan dengan hasil mendekati dari verifikasi terhadap simulasi laboratorium (Susila dkk, 2019). Adapun tahapan dan prinsip-prinsip yang diperlukan dalam memodelkan kelompok tiang pondasi dalam program ABAQUS menurut Helwany (2007) adalah sebagai berikut:

a. Tahap pertama yaitu membuat bagian tiang pondasi, *pile cap*, dan tanah.

b. Tahap kedua yaitu menentukan parameter material dari masing-masing model seperti berat jenis, kekakuan dan parameter kekuatan material.

c. Tahap ketiga yaitu menggabungkan setiap bagian model menjadi satu model. Tahapan ini dinamakan tahap *assembly*.

d. Tahap keempat adalah pendefinisian interaksi tiang dan tanah pada fitur *interface*. Bagian ini merupakan bagian yang sangat penting dalam melakukan simulasi numerik dengan benar (Can dkk, 2010). Kontak antara tiang dan tanah dapat dibuat dengan parameter *hard* pada program ABAQUS untuk memodelkan tiang tertanam untuk dalam tanah (Helwany, 2007)

e. Tahap kelima adalah menerapkan beban yang diberikan perlahan hingga mencapai keruntuhan.

METODE PENELITIAN

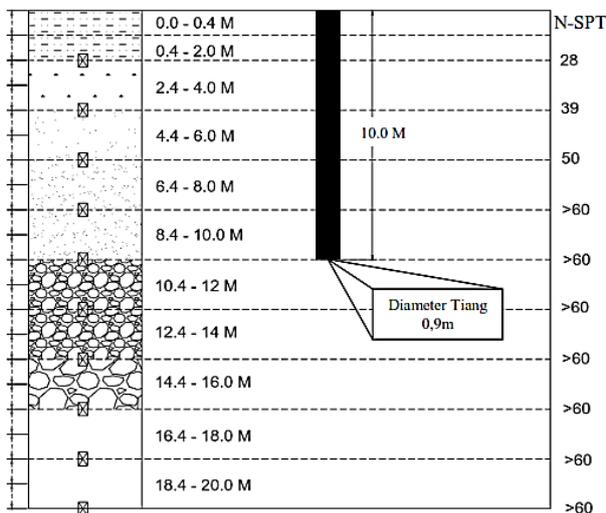
Untuk melihat pengaruh jarak antar tiang dan variasi konfigurasi kelompok tiang, penelitian ini memiliki tahapan sebagai berikut:

1. Menghitung kapasitas daya dukung aksial tekan tiang tunggal
2. Simulasi numerik daya dukung aksial tekan tiang tunggal
3. Simulasi numerik daya dukung aksial tekan kelompok tiang
4. Menghitung efisiensi kelompok tiang dari hasil simulasi numerik
5. Menghitung efisiensi kelompok tiang berdasarkan persamaan empiris

Dalam menganalisis daya dukung fondasi secara manual dan simulasi numerik menggunakan ABAQUS diperlukan parameter tanah, tiang fondasi yang digunakan dan konfigurasi kelompok tiang. Oleh karena itu, pada penelitian ini parameter tanah didapatkan dari hasil penyelidikan tanah pada pembangunan gedung laboratorium teknik 1

Institut Teknologi Sumatera. Gedung tersebut dirancang memiliki empat lantai dengan jarak antar kolom 8 meter dan struktur bawah berupa fondasi tiang bor berdiameter 0.9 meter dengan panjang tertanam 10 meter.

Berdasarkan hasil penyelidikan tanah lapangan, lapisan tanah berupa lanau kepasiran seragam dari permukaan hingga kedalaman 20 m dan kedalaman tanah keras dengan N-SPT lebih dari 60 berada di kedalaman 8 m. Selain data penyelidikan tanah lapangan, penyelidikan tanah laboratorium juga digunakan untuk mendapatkan parameter kekakuan dan kuat geser tanah.

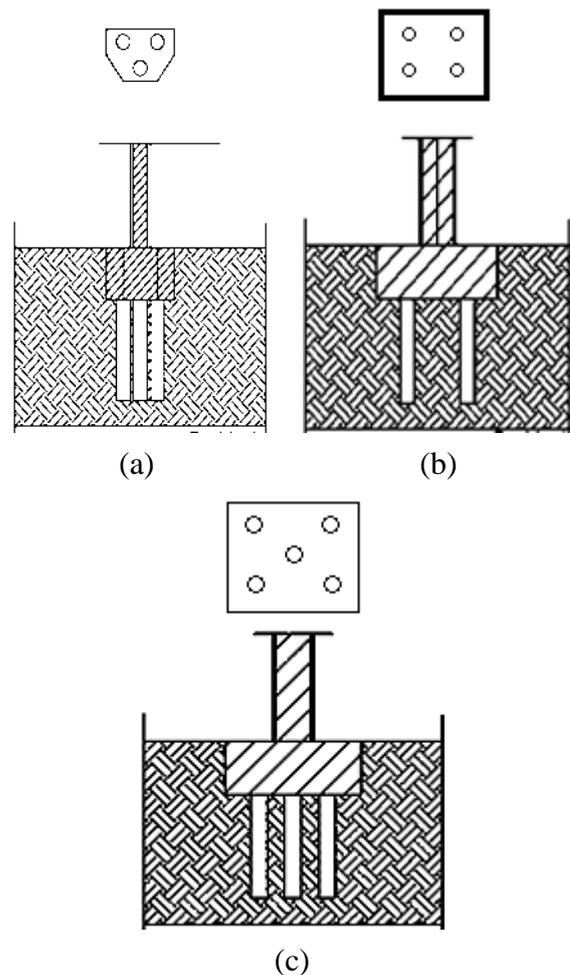


Gambar 2. Lapisan Tanah dan Kedalaman Tiang Fondasi

Variasi model yang dilakukan pada penelitian ini yaitu membandingkan konfigurasi kelompok tiang dan jarak antar tiang terhadap diameter. Diameter tiang pada seluruh variasi bernilai 0.9 meter dengan panjang tiang tertanam yaitu 10 meter. Variasi jarak antar tiang terhadap diameter tiang s/d yaitu 2.5 kali diameter, 3 kali diameter, dan 3.5 kali diameter. Tiga variasi s/d tersebut merupakan nilai optimum yang sering digunakan (Lamansari, 2019).

Tabel 1. Variasi model konfigurasi kelompok tiang

Konfigurasi	Jumlah Tiang	Variasi	Spasi (m)
Tiang Tunggal	1	-	-
Segitiga	3	$2.5d$	2.25
		$3d$	2.7
		$3.5d$	3.15
Segiempat	4	$2.5d$	2.25
		$3d$	2.7
		$3.5d$	3.15
Segiempat	5	$2.5d$	2.25
		$3d$	2.7
		$3.5d$	3.15



Gambar 3. Konfigurasi kelompok tiang yang digunakan, (a) segitiga 3 tiang, (b) segiempat 4 tiang, dan (c) segiempat 5 tiang

Untuk simulasi numerik, penelitian ini menggunakan program ABAQUS 3D dengan memodelkan tanah dan tiang fondasi sebagai elemen kontinum C3D8R dengan tipe *mesh* 8 nodal (Hibbitt dkk, 2014). Material yang

digunakan yaitu material tanah (*soil*) dan material beton (*concrete*) untuk fondasi. Material tanah menggunakan model Mohr-Coulomb dan material beton menggunakan material elastik. Tabel 2 berikut ini adalah data material yang digunakan.

Tabel 2. Parameter material tanah pada pemodelan numerik

Lapisan	Parameter	Nilai	Satuan
Lanau Kepasiran (0 – 2 m)	<i>Density</i>	1.51	ton/m ³
	<i>Young's Modulus</i>	8106	kPa
	<i>Poisson's Ratio</i>	0.20	
	<i>Friction Angle</i>	30.00	°
	<i>Dilation Angle</i>	6.71	°
Lanau Kepasiran (2 – 4 m)	<i>Density</i>	1.52	ton/m ³
	<i>Young's Modulus</i>	12665.63	kPa
	<i>Poisson's Ratio</i>	0.25	
	<i>Friction Angle</i>	30.00	°
	<i>Dilation Angle</i>	9.12	°
Lanau Kepasiran (4 – 8 m)	<i>Density</i>	1.51	ton/m ³
	<i>Young's Modulus</i>	18238.50	kPa
	<i>Poisson's Ratio</i>	0.24	
	<i>Friction Angle</i>	30.00	°
	<i>Dilation Angle</i>	11.38	°
Lanau Kepasiran (8 – 10 m)	<i>Density</i>	1.66	ton/m ³
	<i>Young's Modulus</i>	22798.13	kPa
	<i>Poisson's Ratio</i>	0.22	
	<i>Friction Angle</i>	30.00	°
	<i>Dilation Angle</i>	15.85	°
	<i>Cohesion</i>	21.09	kPa

Tabel 3. Parameter material beton pada pemodelan numerik

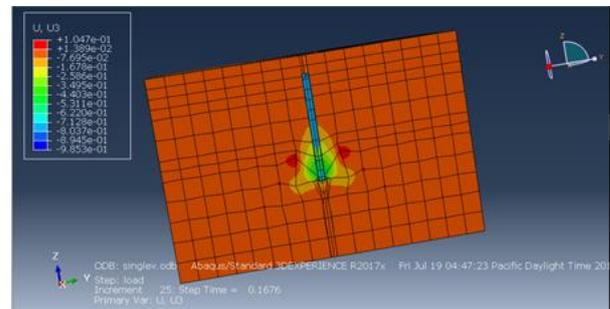
Material	Parameter	Nilai	Satuan
Beton	<i>Density</i>	2.40	ton/m ³
	<i>Young's Modulus</i>	23452.95	MPa
	<i>Poisson's Ratio</i>	0.15	

Parameter tanah yang terdapat di Tabel 2 didapatkan dari data penyelidikan tanah laboratorium untuk *density*, *friction angle*, *dilation angle* dan *cohesion*. Sedangkan *Young's modulus* didapatkan dari persamaan empiris yang diusulkan oleh Kulhawi dan Mayne (1990).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Daya Dukung Aksial Tekan Tiang Tunggal

Untuk mengetahui pemodelan numerik mendekati persamaan umum yang ada, perbandingan terhadap persamaan empiris terhadap hasil simulasi numerik perlu dilakukan. Pada penelitian ini, persamaan empiris yang digunakan menggunakan metode Meyerhof dan metode Briaud. Gambar 8 menunjukkan hasil pemodelan numerik ABAQUS 3D untuk tiang tunggal.



Gambar 4. Pengaruh pembebanan terhadap fondasi tiang tunggal

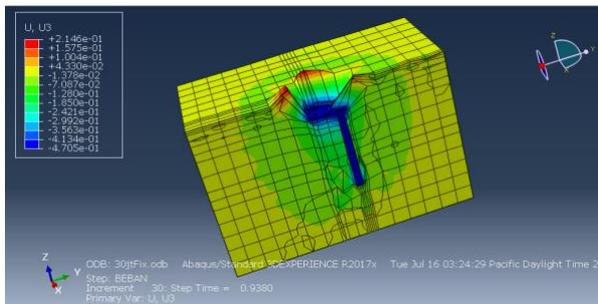
Tabel 4. Hasil Perhitungan Daya Dukung Tiang Tunggal

Metode	Daya Dukung Izin Tekan Tiang Tunggal (ton)
Meyerhof	395.26
Briaud	138.40
ABAQUS 3D	391.11

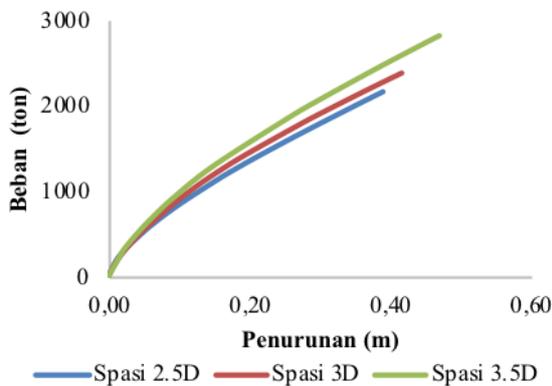
Berdasarkan Tabel 4 di atas, hasil simulasi ABAQUS 3D memiliki nilai daya dukung izin tekan tiang tunggal mendekati hasil perhitungan manual menggunakan metode Meyerhof dan cukup besar perbedaannya terhadap hasil perhitungan menggunakan metode Briaud. Meskipun metode Briaud memiliki parameter N-SPT seperti metode Meyerhof perbedaan keduanya terletak dari koefisien persamaan empirik yang diberikan. Hal ini juga telah diverifikasi oleh Latifah dkk (2019) dengan membandingkan hasil pengujian *pile driving analyzer* (PDA) terhadap hasil perhitungan Meyerhof memiliki nilai daya dukung yang hampir sama.

Daya Dukung Aksial Tekan Kelompok Tiang

Daya dukung kelompok tiang dihitung menggunakan metode elemen hingga yang dibedakan berdasarkan konfigurasi dan variasi spasi antar tiang (s/d). Beban vertikal akan diberikan secara bertahap hingga didapatkan kurva hubungan perpindahan dan beban yang menunjukkan posisi keruntuhan dari kelompok tiang. Berikut ini hasil pemodelan dan kurva beban terhadap perpindahan pada masing-masing konfigurasi.

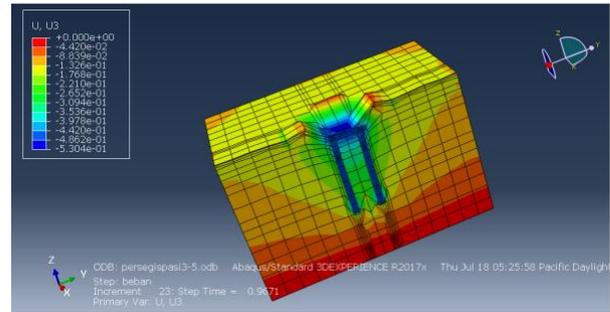


Gambar 5. Pengaruh pembebanan terhadap fondasi kelompok tiang konfigurasi segitiga 3 tiang

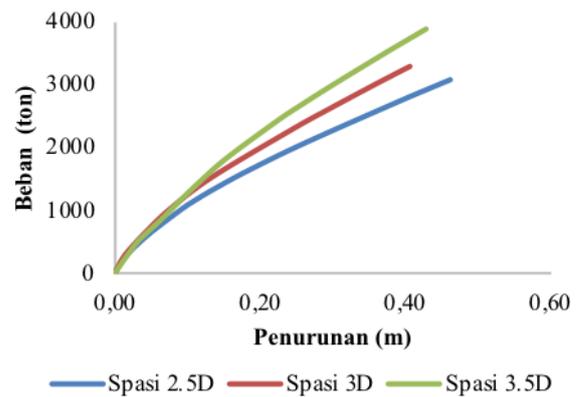


Gambar 6. Penurunan kelompok tiang terhadap beban untuk konfigurasi segitiga 3 tiang

Nilai maksimum daya dukung ultimit (Q_u) dengan konfigurasi segitiga 3 tiang yaitu dengan menggunakan variasi s/d 3.5d sebesar 2814.17 ton dengan daya dukung izin (Q_{all}) sebesar 938.06 ton. Sedangkan nilai minimum daya dukung ultimit (Q_u) dengan konfigurasi tiga tiang yaitu dengan menggunakan variasi s/d 2.5d sebesar 2177.24 ton dengan daya dukung izin (Q_{all}) sebesar 725.75 ton.

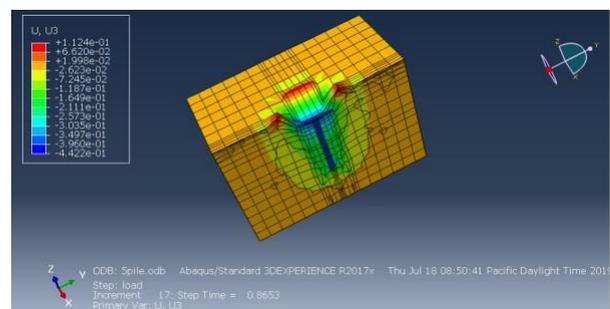


Gambar 7. Pengaruh pembebanan terhadap fondasi kelompok tiang konfigurasi segiempat 4 tiang.

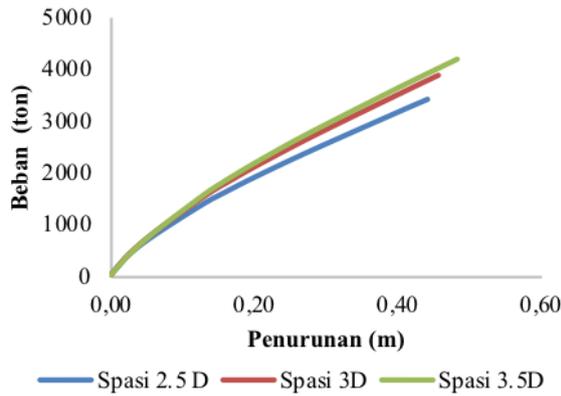


Gambar 8. Penurunan kelompok tiang terhadap beban untuk konfigurasi segiempat 4 tiang.

Nilai maksimum daya dukung ultimit (Q_u) dengan konfigurasi segiempat 4 tiang yaitu dengan menggunakan variasi s/d 3.5d sebesar 3868.44 ton dengan daya dukung izin (Q_{all}) sebesar 1289.48 ton. Sedangkan nilai minimum daya dukung ultimit (Q_u) dengan konfigurasi empat tiang yaitu dengan menggunakan variasi s/d sebesar 2.5d sebesar 3091.44 ton dengan daya dukung izin (Q_{all}) sebesar 1030.48 ton.



Gambar 9. Pengaruh pembebanan terhadap fondasi kelompok tiang konfigurasi tiga tiang.



Gambar 10. Penurunan kelompok tiang terhadap beban untuk konfigurasi lima tiang

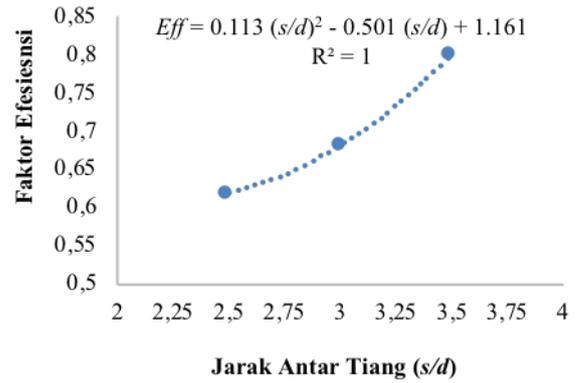
Nilai maksimum daya dukung ultimit (Q_u) dengan konfigurasi segiempat 5 tiang yaitu dengan menggunakan variasi s/d 3.5d sebesar 4221.72 ton dengan daya dukung izin (Q_{all}) sebesar 1407.24 ton. Sedangkan nilai minimum daya dukung ultimit (Q_u) dengan konfigurasi lima tiang yaitu dengan menggunakan variasi s/d 2.5d sebesar 3461.14 ton dengan daya dukung izin (Q_{all}) sebesar 1153.71 ton.

Efisiensi Kelompok Tiang Berdasarkan Simulasi Numerik

Setelah mendapatkan daya dukung aksial tekan fondasi tiang tunggal dan kelompok tiang yang dianalisis secara numerik menggunakan program ABAQUS, tahap selanjutnya adalah menghitung nilai efisiensi pada setiap konfigurasi kelompok tiang. Tabel berikut ini merupakan hasil nilai efisiensi berdasarkan metode elemen hingga yang akan dibandingkan dengan rumus empiris efisiensi kelompok tiang.

Tabel 5. Efisiensi konfigurasi segitiga 3 tiang

s/d	Q_{all} group (ton)	Q_{all} 1 tiang (ton)	Effisiensi (%)
2.5d	725.75		61.85
3d	798.55	391.11	68.06
3.5d	938.06		79.95

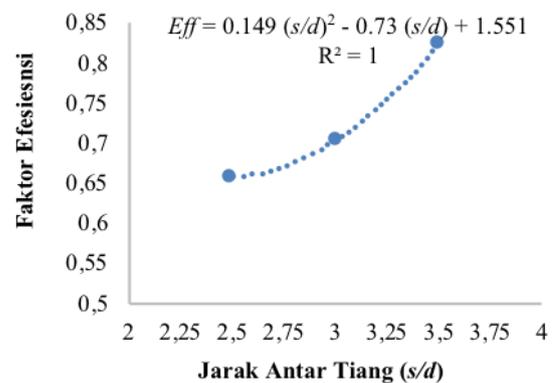


Gambar 11. Hubungan faktor efisiensi terhadap jarak antar tiang (s/d) untuk konfigurasi segitiga 3 tiang

Berdasarkan Tabel 5, nilai efisiensi terbesar terdapat pada variasi 3.5d yaitu sebesar 79.95%. Persamaan regresi yang dihasilkan untuk menghitung nilai efisiensi dari konfigurasi segitiga 3 tiang dapat dilihat pada Gambar 11.

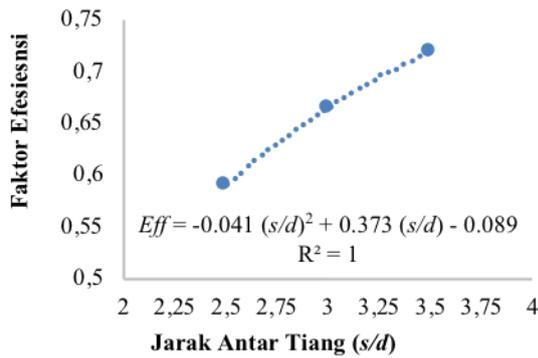
Tabel 6. Efisiensi konfigurasi segiempat 4 tiang

s/d	Q_{all} group (ton)	Q_{all} 1 tiang (ton)	Effisiensi (%)
2.5d	1030.48		65.87
3d	1101.60	391.11	70.41
3.5d	1289.48		82.42



Gambar 12. Faktor efisiensi terhadap jarak antar tiang (s/d) untuk konfigurasi segiempat 4 tiang

Berdasarkan Tabel 6, nilai efisiensi terbesar terdapat pada variasi 3.5d yaitu sebesar 82.42%. Persamaan regresi yang dihasilkan untuk menghitung nilai efisiensi dari konfigurasi segiempat 4 tiang dapat dilihat pada Gambar 12.

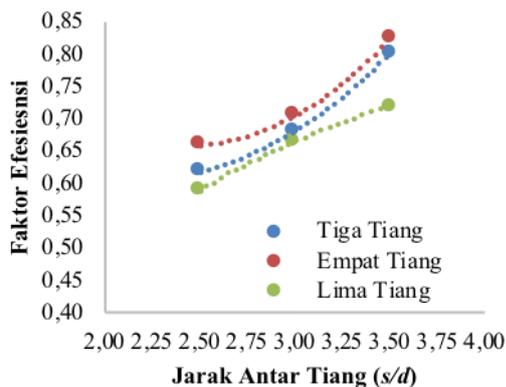


Gambar 13. Hubungan faktor efisiensi terhadap jarak antar tiang (s/d) untuk konfigurasi segiempat 5 tiang

Tabel 7. Efisiensi konfigurasi segiempat 5 tiang

s/d	Qall group (ton)	Qall 1 tiang (ton)	Effisiensi (%)
2.5d	1153.71		59.00
3d	1300.32	391,11	66.49
3.5d	1407.24		71.96

Berdasarkan Tabel 7, nilai efisiensi terbesar terdapat pada variasi 3.5d yaitu sebesar 71.96%. Persamaan regresi yang dihasilkan untuk menghitung nilai efisiensi dari konfigurasi segiempat 5 tiang dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 14. Hubungan faktor efisiensi terhadap jarak antar tiang (s/d) pada tiga jenis konfigurasi

Dari Gambar 14 di atas terlihat bahwa seluruh konfigurasi menghasilkan nilai efisiensi maksimum pada variasi s/d 3.5d dan secara keseluruhan konfigurasi segiempat 4 tiang menghasilkan efisiensi maksimum untuk semua variasi s/d dibandingkan konfigurasi kelompok tiang lainnya.

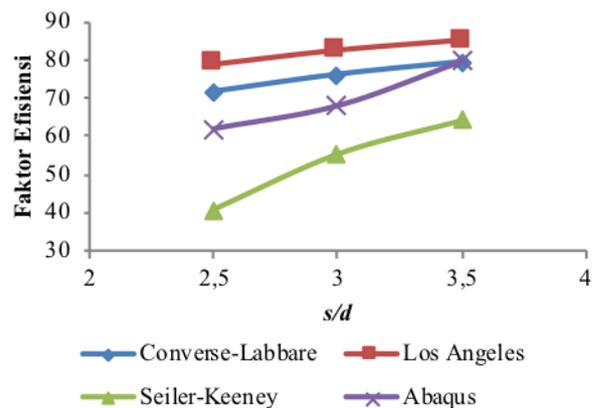
Perbandingan Hasil Simulasi Numerik terhadap Persamaan Empiris

Perhitungan efisiensi secara empiris dilakukan dengan menggunakan beberapa teori, diantaranya Converse-Labare, Los Angeles, dan Seiler- Keeney.

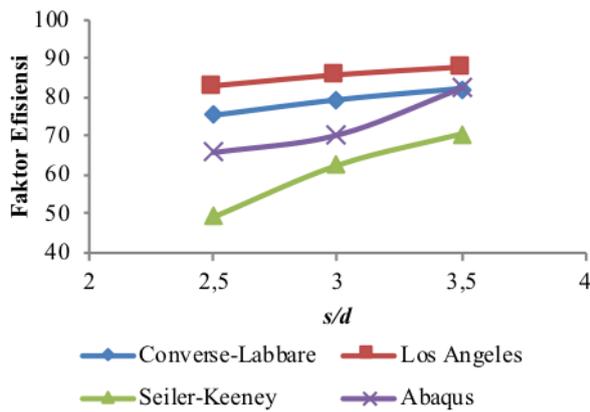
Tabel 8. Faktor efisiensi berdasarkan metode empiris dan program ABAQUS

Metode	Spasi	Faktor Efisiensi (%)		
		Segi empat 4 Tiang	Segi tiga 3 Tiang	Segi empat 5 Tiang
Converse -Labbare	2.5d	75.78	71.74	71.74
	3d	79.52	76.10	76.10
	3.5d	82.28	79.33	79.33
Los Angeles	2.5d	82.77	79.14	79.14
	3d	85.64	82.62	82.62
	3.5d	87.69	85.10	85.10
Seiler-Keeney	2.5d	49.48	40.73	40.73
	3d	62.53	55.41	55.41
	3.5d	70.51	64.39	64.39
Abaqus	2.5d	65.87	61.85	59.00
	3d	70.41	68.06	66.49
	3.5d	82.42	79.95	71.96

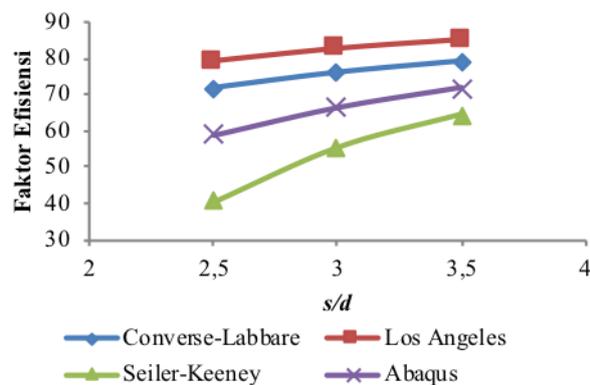
Jika faktor efisiensi berdasarkan metode empiris dibandingkan dengan hasil ABAQUS maka hasil faktor efisiensi dengan metode pemodelan numerik memiliki hasil yang lebih kecil dibandingkan metode Converse-Labare dan metode Los Angeles, namun lebih besar daripada metode Seiler-Keeney. Hal ini terjadi pada seluruh jenis konfigurasi kelompok tiang seperti yang terlihat pada Gambar 15 hingga Gambar 17.



Gambar 15. Hasil perhitungan faktor efisiensi untuk konfigurasi segitiga 3 tiang



Gambar 16. Hasil perhitungan faktor efisiensi untuk konfigurasi segiempat 4 tiang



Gambar 17. Hasil perhitungan faktor efisiensi untuk konfigurasi segiempat 5 tiang

Perbedaan tersebut terjadi karena nilai faktor efisiensi berdasarkan metode empiris hanya mempertimbangkan jenis konfigurasi dan jumlah tiang dalam konfigurasi. Sedangkan berdasarkan metode numerik hasil pemodelan ABAQUS, nilai efisiensi dipertimbangkan berdasarkan konfigurasi, jumlah tiang dan deformasi dari tanah.

KESIMPULAN

Berdasarkan hasil perhitungan dan simulasi numerik dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu nilai daya dukung fondasi tiang tunggal dengan pemodelan ABAQUS mendekati hasil perhitungan manual dengan menggunakan metode Meyerhof. Nilai daya dukung kelompok tiang fondasi maksimum berada di variasi $3.5d$ untuk ketiga konfigurasi. Efisiensi maksimum kelompok

tiang fondasi dihasilkan dengan menggunakan konfigurasi segiempat dengan jumlah empat tiang untuk semua variasi s/d . Nilai faktor efisiensi metode empiris mengalami perbedaan terhadap pemodelan numerik karena metode empiris yang digunakan hanya mempertimbangkan konfigurasi dan jumlah tiang, sedangkan pemodelan numerik mempertimbangkan perpindahan dan perubahan bentuk tanah.

REFERENSI

- Can, H.B., Hao, C., Jing-Song, Z., Cong-Jun, W., Xin, Z. and Guo-jian, W., 2010. *Nonlinear FEM Analysis of Bearing Capacity and Sedimentation of Single Pile in Multi-Layered Soils*. International Conference of Civil and Building Engineering, Nottingham University
- Darjanto, Helmy, 2011. *Floating Raft-Pile Foundations Analysis Using Numerical Simulations*. Jurnal Rekayasa Sipil Vol. 7 No. 2.
- Das, Braja M., 2014. *Principles of Foundation Engineering Eight Edition*, Cengage Learning, United States of America.
- Hariyatmo, Hary Christady, 2018. *Analisis dan Perancangan Fondasi II*, UGM Press, Yogyakarta.
- Helwany, Sam., 2007. *Applied Soil Mechanics with ABAQUS Applications*, John Wiley & Sons, United States of America.
- Hibbitt, Karlsson, Sorensen, Inc., 2000. *Abaqus/CAE User's Manual*, Dassault Systemes, USA.
- Kulhawy, F.H., Mayne, P.W, 1990. *Manual on estimating soil properties for foundation design*. Report EL-6800, Electric Power Research Institute, California.
- Lamansari, F.S., Balamba, S., Manaroinsong, L. D. K., 2019. Analisis Pengaruh Jarak dan Konfigurasi Tiang Pada Tanah

- Lempung Terhadap Defleksi Tiang Pancang Kelompok Akibat Beban Lateral. *Jurnal Sipil Statik* Vol.7 No.11 November 2019
- Latifah, N. K., Jirna, I. W., Setyawan, E., 2019. Perbandingan daya dukung aksial pondasi tiang bor tunggal menggunakan data *standard penetration test* (Spt) dan *pile driving analyzer* (Pda) test pada proyek pembangunan jalan tol Pandaan Malang. *Jurnal Bangunan*, Vol. 24, No. 1, Maret 2019: 25-32
- Susila, E., Syahputra, M. Y., Sahadewa, A., Putri, K. M. E., 2019. *An Evaluation of Pile-Raft Interaction in Cohesive Soils using 3D Finite Element Method*. *J. Eng. Technol. Sci.*, Vol. 51, No. 5, 662-682
- Tuan, Anh Pham, 2016. *A Simplified Formular For Analysis Group Efficiency of Piles in Granular Soils*. *International Journal of Scientific & Engineering Researc* Vol. 7 July 2016.