

## Efisiensi Daya Dukung Tiang dalam Grup menggunakan Pendekatan Analisa Fem 3D

Rohmat A. Muhsin<sup>1</sup>, Indrasurya B. Mochtar<sup>1</sup>, Mohamad Khoiri<sup>1</sup>

Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya<sup>1</sup>

Koresponden\*, Email: [romatmuhsin@gmail.com](mailto:romatmuhsin@gmail.com)

	Info Artikel	Abstract
Diajukan	26 Desember 2022	<p><i>Ratio of the efficiency pile foundation in group occurs due to the influence of overlapping stress distribution. Some formulas for calculating efficiency use the behavior of the end bearing capacity only. Even though there is a friction bearing capacity foundation behavior. Therefore it is necessary to do further research. Research methods if carried out directly actual on site take the costs and time spent are large and the variations tested are few. So we need a more effective method, namely the Finite Element Method 3D (FEM 3D). With FEM 3D the number of variations tested can be more and the time used is also relatively short. FEM 3D was chosen because it has the closest characteristics to the actual one. The results for the efficiency of the FEM 3D show that the behavior of the foundation affects the size of the efficiency value. The efficiency value at full friction is smaller than at the end bearing with a difference of 15% to 25%. In addition, the longer the depth of the pile, the smaller the efficiency value. In the condition of end bearing capacity, the influence of depth is not too significant, only 1-5%. Meanwhile, in full friction conditions, the effect of depth on the efficiency value can reach 5-10%. In this study, the limit of efficiency values in end bearing conditions is in the range of 0,45-0,9. Meanwhile, for full friction conditions, it ranges from 0,23-0,65.</i></p>
Diperbaiki	09 Februari 2023	
Disetujui	10 Februari 2023	

*Keywords: efficiency, foundation bearing capacity, FEM 3D*

Kata kunci: Efisiensi, Daya Dukung Pondasi, FEM 3D

### Abstrak

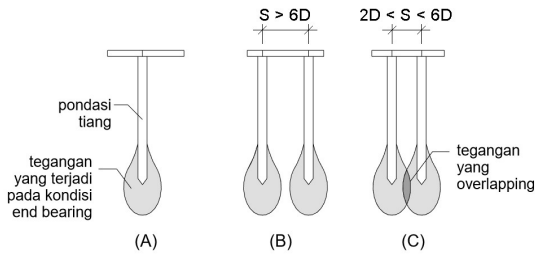
Besar kecil nilai efisiensi pada pondasi tiang dalam grup terjadi karena pengaruh *overlapping* persebaran tegangan. Beberapa rumus untuk menghitung efisiensi hanya menggunakan tipe pondasi *end bearing capacity*. Padahal ada tipe pondasi *friction bearing capacity*. Maka dari itu perlu dilakukan penelitian lebih lanjut. Apabila metode penelitian dilakukan secara langsung di lapangan akan menghabiskan biaya besar, waktu yang lama, dan variasi diuji sedikit. Sehingga perlu metode yang lebih efektif yakni *Finite Element Method 3D (FEM 3D)*. Dengan FEM 3D jumlah variasi yang diujikan bisa lebih banyak dan waktu yang digunakan juga relatif singkat. FEM 3D dipilih karena memiliki karakteristik yang paling mendekati dengan yang aktual. Hasilnya efisiensi pada FEM 3D menunjukkan bahwa tipe pondasi mempengaruhi besar kecil nilai efisiensi. Nilai efisiensi pada full friction lebih kecil daripada pada end bearing dengan selisih antara 15% hingga 25%. Selain itu semakin panjang kedalaman tiang maka semakin kecil nilai efisiensi. Pada tipe pondasi *end bearing capacity* pengaruh kedalaman tidak terlalu signifikan hanya sebesar 1-5%. Sedangkan pada tipe *full friction* pengaruh kedalaman terhadap nilai efisiensi bisa mencapai 5-10%. Pada penelitian ini nilai efisiensi pada tipe *end bearing* adalah berkisar antara 0,45-0,9. Sedangkan untuk tipe *full friction* berkisar antara 0,23-0,65.

### 1. Pendahuluan

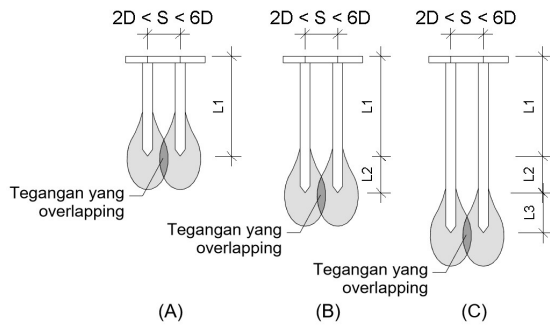
Kapasitas daya dukung grup tiang tidak sama dengan kapasitas daya dukung satu tiang dikalikan dengan banyaknya tiang pada grup tersebut. Tetapi didefinisikan sebagai perkalian antara kapasitas daya dukung satu tiang, dikalikan banyaknya tiang dikalikan lagi dengan efisiensi grup tiang [1]. Besar nilai efisiensi didapatkan dari perbandingan antara daya dukung tiang dalam grup dibagi dengan daya dukung tiang tunggal dikalikan jumlah tiang. Banyak persamaan untuk mencari efisiensi grup tiang di antaranya yang paling sering dipakai adalah persamaan

Converse-Labarre dan persamaan dari Los Angeles. Besar kecil nilai efisiensi ini terjadi dikarenakan adanya pengaruh *overlapping* penyebaran tegangan di sekeliling tiang. Pada pondasi tiang dengan tipe pondasi *end bearing capacity* dapat dijelaskan pada **Gambar 1**.

Persebaran tegangan yang dijelaskan pada **Gambar 1** menunjukkan bahwa efisiensi sangat dipengaruhi jarak antar tiang. Semakin dekat jarak antar tiang maka semakin besar *overlapping* tegangan yang terjadi. Hal tersebut mengakibatkan nilai efisiensi semakin kecil. *Overlapping* terjadi apabila jarak antar tiang kurang dari enam kali diameter.



**Gambar 1.** Skematik Persebaran Tegangan Pada *End bearing*. Gambar 1A Persebaran Tegangan Tiang Tunggal. Gambar 1B Ke 1C *Overlapping* Terjadi Akibat Jarak Antar Pile Mengecil.



**Gambar 2.** Skematik Persebaran Tegangan Pada *End bearing*. Gambar 2A *Overlapping* Tegangan Pada Grup Pile. Gambar 2B Ke 2C Kedalaman Pile Tidak Mempengaruhi *Overlapping* Tegangan Pada Tipe Pondasi *End bearing*.

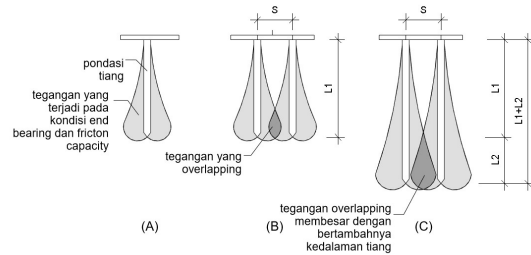
Pada **Gambar 2** terlihat bahwa meskipun kedalaman pondasi divariasikan, luas persebaran tegangannya akan tetap sama. Sehingga disimpulkan kedalaman tidak akan mempengaruhi nilai efisiensi. Maka dari itu beberapa rumus persamaan seperti persamaan Converse-Labarre dan persamaan dari Los Angeles mengasumsikan tipe pondasi pondasi yang digunakan adalah hanya pada tipe pondasi *end bearing capacity*.

Namun pada kenyataannya tidak semua daya dukung tiang dihitung hanya dengan tipe pondasi *end bearing capacity*. Pada tanah yang memiliki lapisan tanah lunak yang tebal, tipe pondasi akan juga dihitung berdasarkan *friction bearing capacity* (tahanan geser selimut tiang).

Apabila daya dukung sudah dianggap sebagai tipe pondasi *friction bearing capacity* maka persebaran tegangan tidak bisa dijelaskan sama seperti pada **Gambar 1** dan **Gambar 2**. Persebaran tegangan yang terjadi akan seperti pada **Gambar 3**.

**Gambar 3A** menunjukkan persebaran tegangan tiang tunggal pada tipe pondasi tahanan geser selimut. Dari **Gambar 3B** dan **Gambar 3C** menunjukkan bahwa semakin panjang kedalaman tiang dengan jarak antar tiang yang sama,

maka semakin besar *overlapping* yang terjadi. Hal tersebut akan mempengaruhi besar nilai efisiensi yang terjadi.



**Gambar 3.** Skematik Persebaran Tegangan Pada *full friction*. Gambar 3A *Overlapping* Tegangan Pada Grup Pile. Gambar 3B Ke 3C Kedalaman Pile Mempengaruhi *Overlapping* Tegangan Pada Tipe Pondasi *Full friction*

Yudiawati & Mochtar telah melakukan penelitian mengamati efisiensi pondasi grup *full friction* pada tanah sangat lunak yang berlokasi di Kalimantan. Hasilnya, kelompok tiang yang lebih dalam memiliki nilai efisiensi yang lebih rendah dibandingkan tiang yang lebih pendek [2].

Metode penelitian yang dilakukan Yudiawati & Mochtar adalah dengan memasang tiang pancang di lapangan kemudian dilakukan tes. Dikarenakan penelitian yang dilakukan secara langsung dan berskala cukup besar, biaya dan waktu yang dihabiskan juga cukup besar. Hal tersebut mengakibatkan variasi kedalaman dan konfigurasi yang diuji sangat sedikit sehingga kesimpulan yang bisa diambil juga masih terbatas.

Oleh sebab itu perlu dilakukan cara lain yaitu dengan metode *Finite Element Method* (FEM). Dengan FEM, jumlah variasi bisa lebih banyak dan waktu yang digunakan juga relatif singkat. FEM yang digunakan adalah FEM 3D. Permodelan FEM 3D dipilih dikarenakan memiliki karakteristik yang paling mendekati dengan apa yang terjadi di lapangan.

Pada penelitian ini terdapat dua variasi jenis tipe pondasi yakni tipe pondasi *end bearing capacity* dan *full friction capacity*. Selain itu juga terdapat variasi konfigurasi, jarak antar tiang, dan kedalaman. variasi yang ditentukan adalah variasi yang paling sering digunakan di lapangan.

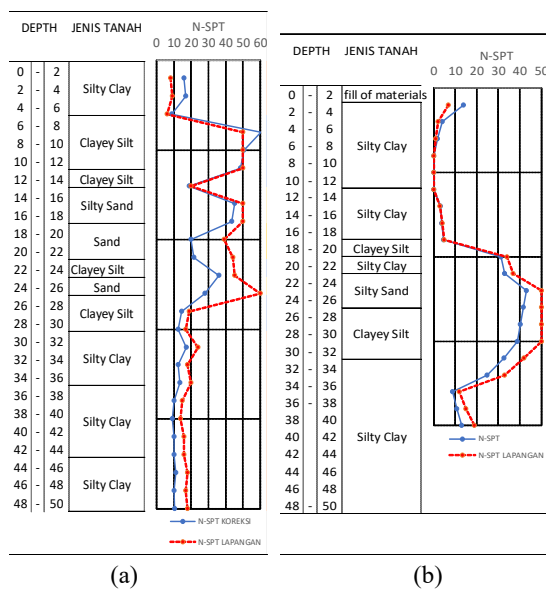
Nilai efisiensi yang didapatkan dari permodelan pada setiap variasi akan diolah untuk mendapatkan perumusan dasar mencari nilai efisiensi dengan variasi konfigurasi, kedalaman, jarak antar pile dan tipe pondasi (*end bearing* atau *full friction*).

**2. Metode**

Data tanah yang digunakan adalah data tanah yang dapat mewakili dua tipe pondasi yaitu tipe pondasi *end bearing*

capacity dan tipe pondasi *full friction capacity*. Untuk tipe pondasi *end bearing capacity* data tanah yang digunakan adalah BH-1 seperti pada **Gambar 4a**. Data tanah BH-1 ini memiliki lapisan tanah keras pada kedalaman 6 meter dari permukaan. Sehingga cocok untuk mewakili tipe pondasi *end bearing capacity*. Sedangkan untuk tipe pondasi *full friction capacity* data tanah yang digunakan adalah BH-2 seperti pada **Gambar 4b**. Data tanah BH-2 memiliki lapisan tanah keras pada kedalaman 20 meter dari permukaan. Sehingga cocok untuk mewakili tipe pondasi *full friction capacity*.

Data SPT pada BH-1 dan BH-2 diperoleh dari lapangan dan perlu untuk dilakukan koreksi. N-SPT lapangan perlu dilakukan koreksi agar bisa digunakan pada permodelan. Koreksi yang dilakukan adalah koreksi terhadap muka air tanah dan koreksi akibat *overburden*. Pada **Gambar 4** garis N-SPT putus-putus menunjukkan data N-SPT lapangan sedangkan garis N-SPT lurus menunjukkan N-SPT koreksi.



**Gambar 4.** Data Tanah BH-1 (a) dan Data Tanah BH-2 (b)

Data tanah yang didapatkan dari pengujian lapangan masih terbatas. Data tanah yang diketahui hanya pada lapisan tertentu. Sedangkan untuk melakukan permodelan dibutuhkan data tanah per lapisan. Dikarenakan data tanah per lapisan yang diketahui adalah N-SPT dan jenis tanah, maka kedua data tersebut akan digunakan sebagai acuan korelasi untuk data tanah lain.

Hsiung memodelkan struktur bawah bangunan MRT di Jakarta menggunakan Plaxis 3D. Defleksi dari permodelan tersebut kemudian dibandingkan dengan defleksi yang terjadi di lapangan. Hasil dari permodelan Plaxis 3D tersebut sangat mendekati pada tipe pondasi di lapangan [3].

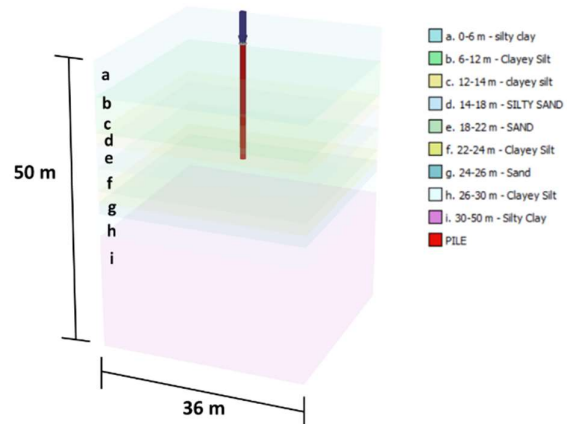
Berdasarkan penelitian tersebut penulis menerapkan korelasi data tanah berdasarkan N-SPT yang sama seperti yang dilakukan Hsiung. Rumus korelasi didapatkan dari penelitian-penelitian yang telah dilakukan sebelumnya. Diantaranya korelasi *shear strength* dari Kulhawy and Mayne, korelasi modulus elastisitas dari Yong, dan lain sebagainya [3].

Dari paper tersebut didapatkan beberapa poin yang digunakan pada permodelan FEM 3D yaitu seperti pada **Tabel 1**.

**Tabel 1.** Parameter Korelasi dari data tanah

Parameter	Korelasi
Material Model	Hardening Soil
Soil Condition	Undrained B
Soil Weight	15-18 kN/m <sup>3</sup>
Cohesion	6*Nspt kN/m <sup>2</sup>
Modulus Elastisitas	2800N - 4000N

Beberapa poin korelasi diatas perlu dilakukan cek terlebih dahulu apakah data korelasi yang diperoleh valid untuk digunakan. Metode cek yang dilakukan adalah dengan membandingkan permodelan dari Plaxis 3D dengan tes aksial di lapangan. Pengujian aksial lapangan memiliki lokasi yang sama dengan data tanah yang akan digunakan untuk permodelan. Hasil dari korelasi data tanah BH-1 dan BH-2 ditampilkan pada **Tabel 2** dan **Tabel 3**.



**Gambar 5.** Contoh Permodelan Pile Tunggal Tipe Pondasi *End Bearing* Pada Plaxis 3D

Hasil dari permodelan yang ditampilkan berupa grafik PY-curves yang kemudian dibandingkan dengan data aksial di lapangan. Perbandingan PY-curves antara permodelan dengan aktual lapangan ditunjukkan pada **Gambar 6**.

**Tabel 2.** Korelasi data tanah pada BH-1

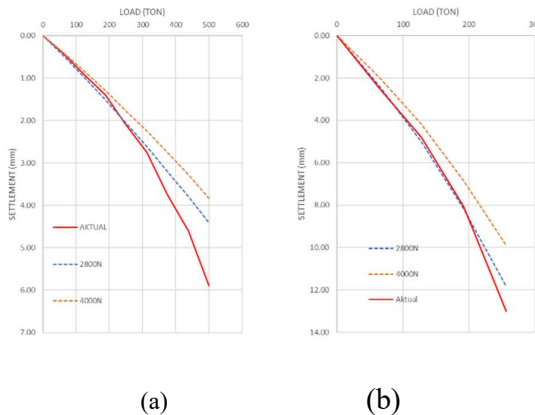
Kedalaman	Soil Type	N-spt	Su kN/m <sup>2</sup>	γ kN/m <sup>3</sup>	Ko kN/m <sup>3</sup>	E <sub>50</sub>		E <sub>50</sub> <sup>ref</sup>		E <sub>oed</sub> <sup>ref</sup>		E <sub>ur</sub> <sup>ref</sup>			
						2800Nspt kN/m <sup>2</sup>	4000Nspt kN/m <sup>2</sup>	2800Nspt kN/m <sup>2</sup>	4000Nspt kN/m <sup>2</sup>	2800Nspt kN/m <sup>2</sup>	4000Nspt kN/m <sup>2</sup>	2800Nspt kN/m <sup>2</sup>	4000Nspt kN/m <sup>2</sup>		
0	-	6	Silty Clay	14	84	17	0,58	39200	56000	33986	48552	23790	33986	101959	145656
6	-	12	Clayey Silt	54	324	18	0,58	151200	216000	131090	187272	91763	131090	393271	561816
12	-	14	Clayey Silt	19	112	17	0,47	52459	74941	45482	64974	31837	45482	136446	194923
14	-	18	Silty Sand	44	261	18	0,47	22004	74292	105778	151111	74044	105778	317333	453333
18	-	22	Sand	21	126	18	0,47	58800	84000	50980	72828	35686	50980	152939	218484
22	-	24	Clayey Silt	36	216	18	0,47	100599	143713	87219	124599	61053	87219	261657	373796
24	-	26	Sand	28	168	17	0,47	78291	111845	67879	96969	47515	67879	203636	290908
26	-	30	Clayey Silt	13	81	18	0,47	37646	53779	32639	46627	22847	32639	97916	139880
30	-	50	Silty Clay	11	69	18	0,47	32077	45825	27811	39730	19468	27811	83433	119191

Note:  $E_{oed}^{ref} = 0,7 E_{50}^{ref}$ ;  $E_{ur} = 3 E_{50}^{ref}$ ;  $m=1.0$ ;  $v^*=0,3$ ; dan  $v_{ur} = 0,2$

**Tabel 3.** Korelasi data tanah pada BH-2

Kedalaman	Soil Type	N-spt	Su kN/m <sup>2</sup>	γ kN/m <sup>3</sup>	Ko kN/m <sup>3</sup>	E <sub>50</sub>		E <sub>50</sub> <sup>ref</sup>		E <sub>oed</sub> <sup>ref</sup>		E <sub>ur</sub> <sup>ref</sup>			
						2800Nspt kN/m <sup>2</sup>	4000Nspt kN/m <sup>2</sup>	2800Nspt kN/m <sup>2</sup>	4000Nspt kN/m <sup>2</sup>	2800Nspt kN/m <sup>2</sup>	4000Nspt kN/m <sup>2</sup>	2800Nspt kN/m <sup>2</sup>	4000Nspt kN/m <sup>2</sup>		
0	-	2	Fill	6	36	16	0,58	16800	24000	14566	20808	10196	14566	10196	14566
2	-	12	Silty Clay	2	12	15	0,58	5600	8000	4855	6936	3399	4855	3399	4855
12	-	18	Silty Clay	4	24	16	0,46	10972	15674	9512	13589	6659	9512	6659	9512
18	-	20	Clayey Silt	31	188	17	0,46	87540	125057	75897	108425	53128	75897	53128	75897
20	-	22	Silty Clay	33	198	17	0,46	92294	131849	80019	114313	56013	80019	56013	80019
22	-	26	Silty Sand	43	258	18	0,46	120430	172043	104413	149161	73089	104413	73089	104413
26	-	32	Clayey Silt	40	241	18	0,46	112676	160966	97690	139557	68383	97690	68383	97690

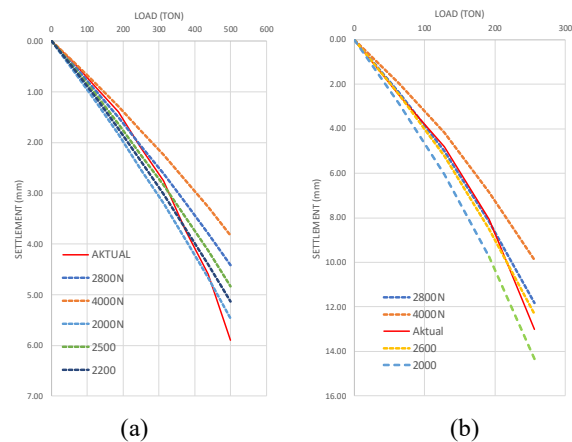
Note:  $E_{oed}^{ref} = 0,7 E_{50}^{ref}$ ;  $E_{ur} = 3 E_{50}^{ref}$ ;  $m=1.0$ ;  $v^*=0,3$ ; dan  $v_{ur} = 0,2$



**Gambar 6.** Grafik Perbandingan PY Curves Hasil Antara Permodelan Dengan Actual Di lapangan Pada BH-1 (a) dan BH-2 (b)

Namun begitu hasil korelasi modulus elastisitas 2800\*Nspt dan 4000\*Nspt yang ditunjukkan pada **Gambar 6.** masih kurang mendekati aktual. Untuk mendapatkan korelasi modulus elastisitas yang sangat mendekati tipe pondasi aktual maka metode yang digunakan adalah dengan melakukan trial permodelan dengan nilai E yang berbeda-beda. Nilai E yang berbeda-beda ini ditentukan tidak jauh dari batas korelasi yaitu E=2800\*Nspt dan E=4000\*Nspt. hasil trial ditunjukkan pada **Gambar 7.**

Dari **Gambar 7** menunjukkan bahwa nilai E yang paling mendekati atau memiliki simpangan yang terkecil adalah E=2200\*Nspt untuk tipe pondasi *end bearing capacity*, dan E= 2600\*Nspt untuk tipe pondasi *full friction capaccity*.



**Gambar 7.** Grafik Hasil Permodelan Aksial Dengan Variasi Nilai E Pada BH-1 (A) Dan BH-2 (B)

Berdasarkan **Gambar 7** dapat disimpulkan bahwa korelasi sudah valid untuk digunakan sebagai input permodelan. **Tabel 4** dan **Tabel 5** menunjukkan korelasi final dari data tanah BH-1 dan BH-2.

Selanjutnya adalah menentukan variasi permodelan. Variasi yang digunakan secara garis besar dibagi menjadi 4 jenis yakni tipe pondasi *end bearing* atau *full friction*, konfigurasi, jarak antar pile, dan kedalaman. Untuk mempersempit supaya persilangan matriks yang dihubungkan tiap variasi tidak terlalu banyak, maka variasi diseleksi berdasarkan matriks hubungan variasi yang memiliki tipe pondasi yang paling sering digunakan di lapangan.

**Tabel 4.** Korelasi Final Data Tanah Pada BH-2

Depth	Soil Type	N-spt	Consistency	Su	$\gamma$	Ko	$E_{50}$	$E_{50}^{ref}$	$E_{oed}^{ref}$	$E_{ur}^{ref}$	
							2200*Nspt	2200*Nspt	2200*Nspt	2200*Nspt	
				kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	
0	- 6	Silty Clay	14	Medium	84	17	0,58	30800	26704	18693	80111
6	- 12	Clayey Silt	54	V. Hard	324	18	0,58	118800	103000	72100	308999
12	- 14	Clayey Silt	19	Stiff	112	17	0,47	41218	35736	25015	107207
14	- 18	Silty Sand	44	V. Hard	261	18	0,47	95861	83111	58178	249333
18	- 22	Sand	21	V.Dense	126	18	0,47	46200	40055	28039	120166
22	- 24	Clayey Silt	36	V. Hard	216	18	0,47	79042	68529	47971	205588
24	- 26	Sand	28	V.Dense	168	17	0,47	61515	53333	37333	159999
26	- 30	Clayey Silt	13	Stiff	81	18	0,47	29579	25645	17951	76934
30	- 50	Silty Clay	11	Stiff	69	18	0,47	25204	21852	15296	65555

Note:  $E_{oed}^{ref} = 0,7 E_{50}^{ref}$ ;  $E_{ur}^{ref} = 3 E_{50}^{ref}$ ;  $m=1.0$ ;  $\nu=0,3$ ; dan  $\nu_{ur} = 0,2$

**Tabel 5.** Korelasi Final Data Tanah Pada BH-2

Depth	Soil Type	N-spt	Consistency	Su	$\gamma$	Ko	$E_{50}$	$E_{50}^{ref}$	$E_{oed}^{ref}$	$E_{ur}^{ref}$	
							2600*Nspt	2600*Nspt	2600*Nspt	2600*Nspt	
				kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	kN/m <sup>2</sup>	
0	- 2	Fill	6	Medium	36	16	0,58	15600	13525	9468	40576
2	- 12	Silty Clay	2	V.Soft	12	15	0,58	5200	4508	3156	13525
12	- 18	Silty Clay	4	Soft	24	16	0,46	10188	8833	6183	26499
18	- 20	Clayey Silt	31	V.Stiff	188	17	0,46	81287	70476	49333	211428
20	- 22	Silty Clay	33	Hard	198	17	0,46	85702	74303	52012	222910
22	- 26	Silty Sand	43	V.Dense	258	18	0,46	111828	96955	67868	290865
26	- 32	Clayey Silt	40	V.Hard	241	18	0,46	104628	90712	63499	272137

Note:  $E_{oed}^{ref} = 0,7 E_{50}^{ref}$ ;  $E_{ur}^{ref} = 3 E_{50}^{ref}$ ;  $m=1.0$ ;  $\nu=0,3$ ; dan  $\nu_{ur} = 0,2$

Pile grup pada bangunan gedung kebanyakan memiliki bentuk pilecap persegi sama sisi sehingga variasi yang banyak digunakan adalah 1, 3x3, dan 5x5. Sedangkan untuk pilecap jembatan memiliki bentuk pilecap persegi panjang. Variasi yang banyak digunakan adalah 3x3, 3x5 dan 3x9. Sedangkan untuk kedalaman, batas paling pendek kedalaman pondasi umumnya diambil kedalaman dua puluh kali diameter ( $L=20D$ ) dan batas paling panjang umumnya diambil 40 kali diameter ( $L=40D$ ). Untuk variasi jarak antar pile ( $s$ ) yang umum digunakan adalah perbandingan jarak antar pile adalah sebesar 2,5D, 3D, dan 5D. Rekapitulasi variasi ditunjukkan pada **Tabel 6**.

**Tabel 6.** Rekapitulasi Variasi Yang Telah Ditentukan

Konfigurasi	Jarak Antar Pile	Kedalaman Pile	Tipe pondasi
	s/d	L/d	
3 x 3	2,5	20	End Bearing
5 x 5	3	30	Full Friction
3 x 5	5	40	
3 x 9			

Langkah selanjutnya adalah melakukan permodelan menggunakan Plaxis 3D. Tata cara permodelan tiang dilakukan mengacu permodelan yang telah dilakukan seperti

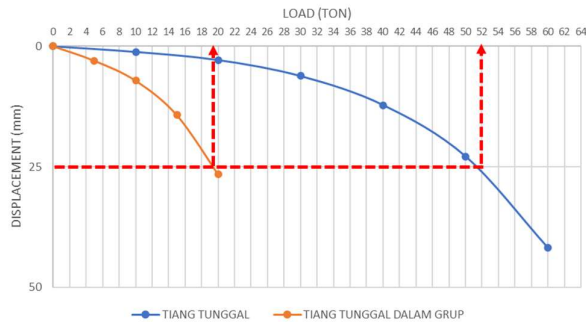
pada penelitian oleh Hustapea [4], Pham [5], Funchun [6], dan Youngho [7]. Permodelan yang dilakukan adalah dengan input material data tanah per lapisan yang telah ditentukan pada **Tabel 5** dan **Tabel 6**. Permodelan pile menggunakan material *model linear elastic* dan *drainage type non-porous* [8]. Keduanya dipilih karena tipe pondasi pile dan material mendekati dengan yang terjadi di lapangan. Material pile pada Plaxis 3D menjadi rigid, kaku, dan tidak mengalami penurunan pada material tersebut. Dikarenakan permodelan tanpa pilecap maka pembebanan di input pada setiap pile dengan besar beban yang sama. **Tabel 7**. menunjukkan parameter dan besaran yang di inputkan pada material pile.

**Tabel 7.** Parameter Material Pada Permodelan Pile

Parameter	Besaran
Material Model	Linear Elastic
Drainage Type	Non-Porous
Soil Weight	24 kN/m <sup>3</sup>
Poisson ratio	0,2
Modulus Elastisitas	$3 \times 10^7$ kN/m <sup>2</sup>

Pembebanan pada permodelan yang digunakan adalah *surface load*. Pembebanan terpusat rencana terlebih dahulu dikonversi menjadi pembebanan area baru kemudian di inputkan ke Plaxis 3D. Acuan deformasi rencana yang

ditentukan adalah dari SNI 8460:2017 geoteknik yakni penurunan ijin sebesar 25mm [9]. kapasitas pada deformasi 25 mm inilah yang digunakan sebagai acuan untuk menghitung nilai efisiensi.



**Gambar 8.** Contoh PY Curves Pada Variasi Tipe Pondasi Endbearing, Konfigurasi 5x5, Kedalaman  $S/D = 2,5$  dan  $L/D=20$

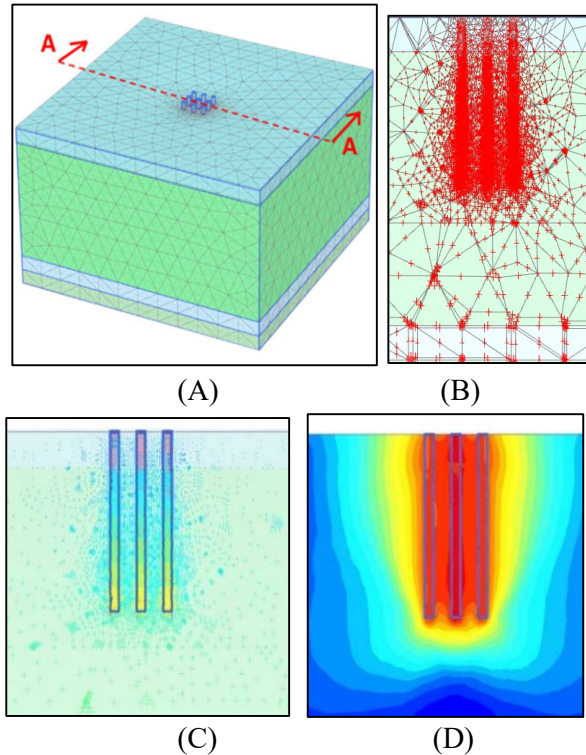
Sebagai contoh pengolahan hasil permodelan variasi persilangan tipe pondasi full friction, konfigurasi 3x3, kedalaman  $s/d=3$  dan  $L/d=20$  ditampilkan pada **Gambar 8**. Terlihat bahwa kapasitas pada tiang tunggal saat deformasi 25mm adalah 52 ton. Sedangkan kapasitas tiang tunggal dalam grup adalah 20 ton. Maka efisiensi yang terjadi adalah rasio antara 20 ton dengan 52 ton yaitu 0,29. Selanjutnya akan dilakukan hal yang sama pada setiap matriks persilangan variasi yang telah ditentukan pada **Tabel 8**.

**Gambar 9A** menunjukkan deformasi hasil permodelan dari variasi persilangan tipe pondasi *full friction*, konfigurasi 3x3, kedalaman  $s/d=3$  dan  $L/d=20$ . Apabila gambar dilakukan *cross section* pada garis A-A maka didapatkan persebaran tegangan seperti pada **Gambar 9B**. **Gambar 9B** adalah persebaran tegangan efektif sedangkan **Gambar 9C** adalah persebaran tegangan total. Persebaran tegangan pada kondisi *full friction capacity* pada **Gambar 9B dan 9C** sama seperti pada asumsi persebaran tegangan pada **Gambar 3**. Terlihat bahwa pada **Gambar 9B** persebaran tegangan saling *overlapping* satu sama lain. Bentuk persebarannya juga berbeda apabila diasumsikan sebagai tipe pondasi *end bearing capacity* seperti pada **Gambar 2**. Dari **Gambar 9C** juga terlihat tegangan yang terjadi dominan pada 1/3 ujung pile terjadi. Hal tersebut mempengaruhi besaran nilai efisiensi pada tipe pondasi *full friction*. Sedangkan untuk **Gambar 8D** adalah deformasi yang terjadi.

### 3. Hasil dan Pembahasan

Hasil Analisa dibagi menjadi dua tipe pondasi yaitu tipe pondasi *end bearing capacity* dan tipe pondasi *full friction*

*capacity*. Hasil Analisa Nilai Efisiensi Menggunakan FEM 3D pada tipe pondasi *end bearing capacity* ditunjukkan pada **Tabel 8** sedangkan hasil analisa nilai efisiensi menggunakan FEM 3D pada tipe pondasi *full friction capacity* ditunjukkan pada **Tabel 9**.



**Gambar 9.** Hasil Permodelan Pile Grup. Hasil Deformasi Pada Gambar (A), Persebaran Tegangan Efektif Pada Section A-A (B), Persebaran Tegangan Total Pada Section A-A (C), Dan Deformasi Pada Section A-A (D),

Berdasarkan **Tabel 8** dan **Tabel 9** terlihat semakin panjang kedalaman tiang maka semakin kecil nilai efisiensi. Pada tipe pondasi *end bearing capacity* pengaruh kedalaman tidak terlalu signifikan hanya sebesar 1-5% saja. Sedangkan pada tipe pondasi *full friction capacity* pengaruh kedalaman terhadap nilai efisiensi bisa mencapai 5-10%.

Karena pengaruh kedalaman hanya sebesar 1-10% maka pengaruh kedalaman dapat diabaikan. Sehingga pada **Tabel 8** dan **Tabel 9** persilangan yang memiliki variasi yang sama namun kedalaman yang berbeda-beda dapat dilakukan rata-rata. **Tabel 10** menunjukkan nilai efisiensi yang telah dilakukan rata-rata.

**Tabel 10** dapat ditampilkan dalam bentuk grafik seperti pada **Gambar 10**. **Gambar 10** dapat digunakan untuk menghitung nilai efisiensi dengan variasi jarak antar pile dan konfigurasi pada tipe pondasi *end bearing capacity*.

**Tabel 8.** Hasil Analisa Nilai Efisiensi Menggunakan FEM 3D Pada Tipe Pondasi *End Bearing Capacity*

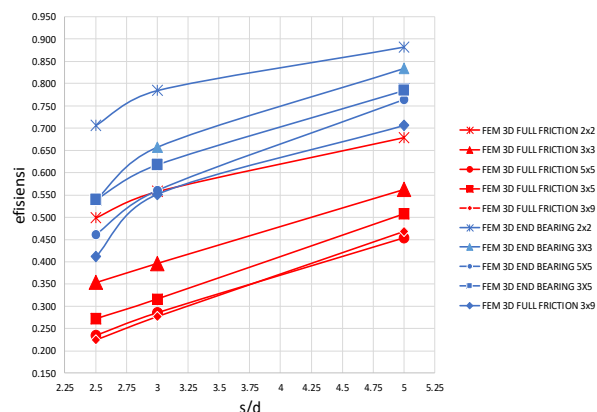
Konfigurasi	Jarak s/d	Kedalaman L/d	DDT tunggal	DDT Grup	Efisiensi
3 x 3	2,5	30	51	18	0,353
3 x 3	2,5	40	66	21	0,318
3 x 3	3	20	36	15	0,417
3 x 3	3	30	51	20	0,392
3 x 3	3	40	66	25,5	0,386
3 x 3	5	20	36	21	0,583
3 x 3	5	30	50	28	0,560
3 x 3	5	40	67	36,5	0,545
3 x 5	2,5	20	36	10,5	0,292
3 x 5	2,5	30	50	13,5	0,270
3 x 5	2,5	40	67	17	0,254
3 x 5	3	20	36	11	0,306
3 x 5	3	30	50	14	0,280
3 x 5	3	40	67	18	0,269
3 x 5	5	20	36	19	0,528
3 x 5	5	30	50	25	0,500
3 x 5	5	40	67	33	0,493
5 x 5	2,5	20	36	8,5	0,236
5 x 5	2,5	30	50	11	0,220
5 x 5	2,5	40	67	14	0,209
5 x 5	3	20	36	11	0,306
5 x 5	3	30	50	13,5	0,270
5 x 5	3	40	66	17,5	0,265
5 x 5	5	20	36	17	0,472
5 x 5	5	30	50	22,5	0,450
5 x 5	5	40	67	29,5	0,440
3 x 9	2,5	20	36	8,5	0,236
3 x 9	2,5	30	50	11	0,220

**Tabel 9.** Hasil Analisa Nilai Efisiensi Menggunakan FEM 3D Pada Tipe Pondasi *Full Friction Capacity*

Konfigurasi	Jarak s/d	Kedalaman L/d	DDT tunggal	DDT Grup	Efisiensi
3 x 3	2,5	40	2600	1300	0,558
3 x 3	3	20	2500	1750	0,640
3 x 3	3	40	2600	1600	0,673
3 x 3	5	20	2500	2200	0,820
3 x 3	5	40	2600	2050	0,846
3 x 5	2,5	20	2500	1450	0,520
3 x 5	2,5	40	2600	1300	0,558
3 x 5	3	20	2500	1650	0,600
3 x 5	3	40	2600	1500	0,635
3 x 5	5	20	2500	2000	0,750
3 x 5	5	40	2600	1875	0,769
5 x 5	2,5	20	2500	1250	0,440
5 x 5	2,5	40	2600	1100	0,481
5 x 5	3	20	2500	1700	0,640
5 x 5	3	40	2600	1600	0,654
5 x 5	5	20	2500	2000	0,760
5 x 5	5	40	2600	1900	0,769
3 x 9	2,5	20	2500	1100	0,400
3 x 9	2,5	40	2600	1000	0,423
3 x 9	3	20	2500	1200	0,640
3 x 9	3	40	2600	1600	0,462
3 x 9	5	20	2500	1900	0,680
3 x 9	5	40	2600	1700	0,731
2 x 2	2,5	20	2500	1900	0,680
2 x 2	2,5	40	2600	1700	0,731
2 x 2	3	20	2500	2100	0,760
2 x 2	3	40	2600	1900	0,808
2 x 2	5	20	2500	2300	0,880
2 x 2	5	40	2600	2200	0,846

**Tabel 10.** Nilai Efisiensi Rata-Rata Dari Variasi Kedalaman Pada Tipe Pondasi *End Bearing Capacity*

Konfigurasi	Jarak s/d	Efisiensi Rata-rata	
		<i>End bearing</i>	<i>Full friction</i>
3 x 3	2,5	0,539	0,353
3 x 3	3	0,657	0,396
3 x 3	5	0,833	0,563
5 x 5	2,5	0,539	0,235
5 x 5	3	0,617	0,286
5 x 5	5	0,785	0,454
3 x 5	2,5	0,460	0,272
3 x 5	3	0,560	0,316
3 x 5	5	0,765	0,507
3 x 9	2,5	0,412	0,224
3 x 9	3	0,551	0,277
3 x 9	5	0,705	0,469
2 x 2	2,5	0,705	0,499
2 x 2	3	0,784	0,569
2 x 2	5	0,882	0,678



**Gambar 10.** Grafik Untuk Mencari Nilai Efisiensi Pada Tipe Pondasi *End Bearing Capacity* Dan *Full Friction Capacity*

**Gambar 10** menunjukkan bahwa tipe pondasi full friction capacity memiliki nilai efisiensi grup lebih kecil dibandingkan tipe pondasi end bearing capacity. Selisih nilai efisiensi grup antara end bearing dan full friction bervariasi, yakni antara 15% hingga 25%. Tipe pondasi full friction memiliki persebaran tegangan overlapping lebih banyak dibandingkan tipe pondasi end bearing sehingga nilai efisiensi tipe full friction lebih kecil dari pada end bearing.

Untuk mendapatkan formula persamaan mencari nilai efisiensi pada kondisi end bearing, dapat ditentukan batas maksimal dan minimal seperti pada **Gambar 11**.

Dari **Gambar 11** dapat ditentukan persamaan garis lurus untuk batas maksimal dan minimal. Dari persamaan garis lurus tersebut dapat ditentukan formula untuk mencari nilai efisiensi pada kondisi end bearing memakai persamaan 1.

$$E_g = 0,106 x + c \tag{1}$$

dimana:

$E_g$  = Nilai Efisiensi tiang dalam grup pada tipe pondasi *End bearing*

$x$  = perbandingan jarak antar tiang dengan diameter tiang (s/d)

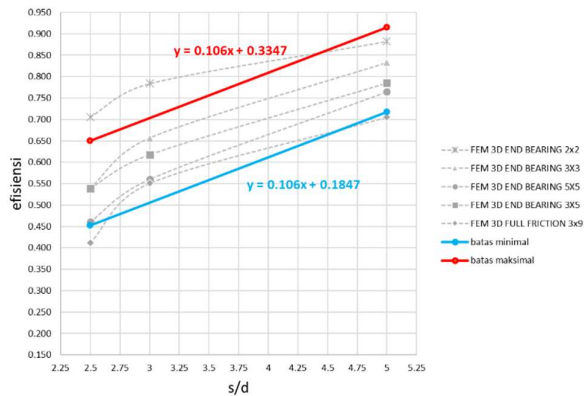
$c$  = koefisien tiang, nilainya bervariasi

$c = 0,335$  untuk  $m \times n > 15$

$c = 0,185$  untuk  $m \times n < 15$

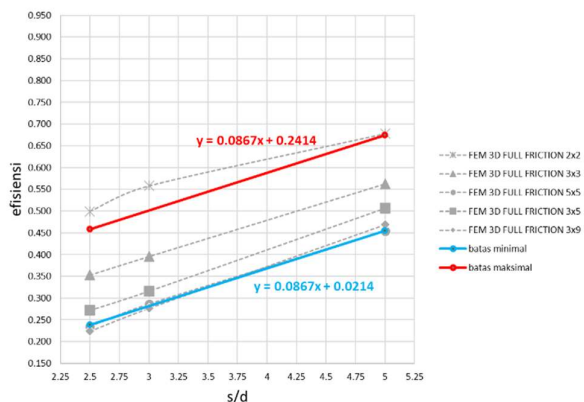
$m$  = jumlah baris dalam tiang

$n$  = jumlah tiang dalam baris



**Gambar 11.** Grafik Batas Maksimal Dan Batas Minimal Efisiensi Tiang Dalam Grup Pada Tipe *End Bearing Capacity*

Sedangkan untuk mendapatkan formula persamaan mencari nilai efisiensi pada kondisi *full friction*, dapat ditentukan batas maksimal dan minimal seperti pada **Gambar 12**.



**Gambar 12.** Grafik Batas Maksimal Dan Batas Minimal Efisiensi Tiang Dalam Grup Pada Tipe *Full Friction Capacity*

Dari **Gambar 12** dapat ditentukan persamaan garis lurus untuk batas maksimal dan minimal. Dari persamaan garis

lurus tersebut dapat ditentukan formula untuk mencari nilai efisiensi pada kondisi *full friction* pada persamaan 2.

$$E_g = 0,0867 x + c \tag{2}$$

dimana :

$E_g$  = Nilai Efisiensi tiang dalam grup pada tipe pondasi *full friction*

$x$  = perbandingan jarak antar tiang dengan diameter tiang (s/d)

$c$  = koefisien tiang, nilainya bervariasi

$c = 0,021$  untuk  $m \times n > 15$

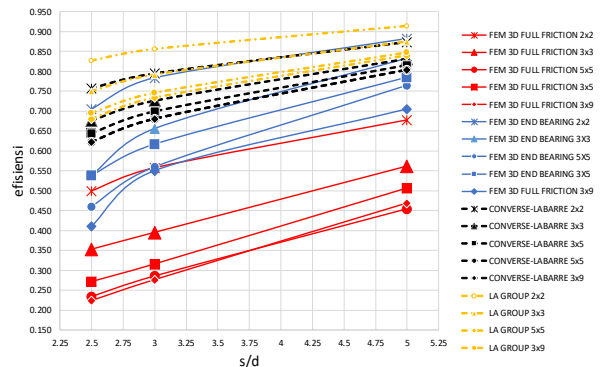
$c = 0,241$  untuk  $m \times n < 15$

$m$  = jumlah baris dalam tiang

$n$  = jumlah tiang dalam baris

Nilai efisiensi dari permodelan FEM 3D apabila dibandingkan dengan nilai efisiensi dari formula Converse-Labarre dan Los Angeles [10]. ditunjukkan seperti pada **Gambar 13**.

Pada **Gambar 13** juga menunjukkan nilai efisiensi FEM 3D pada tipe pondasi *end bearing capacity* memiliki nilai efisiensi lebih mendekati dengan formula Labarre , dan Los Angeles dibandingkan tipe pondasi *full friction*.



**Gambar 13.** Grafik Perbandingan Nilai Efisiensi FEM 3D Dengan Nilai Efisiensi Dari Formula Labarre (1941) Dan Los Angeles (1955)

#### 4. Simpulan

Dari hasil penelitian yang telah dilakukan, didapatkan beberapa disimpulkan sebagai berikut:

1. Hasil analisa menggunakan FEM 3D pada penelitian ini menunjukkan bahwa tipe pondasi *full friction capacity* memiliki nilai efisiensi grup lebih kecil dibandingkan tipe pondasi *end bearing capacity*. Selisih nilai efisiensi grup antara *end bearing* dan *full friction* bervariasi, yakni antara 15% hingga 25%. Tipe pondasi *full friction* memiliki persebaran tegangan overlapping lebih banyak dibandingkan tipe pondasi *end bearing* sehingga nilai



efisiensi tipe full friction lebih kecil dari pada end bearing.

2. Hasil analisa menggunakan FEM 3D pada penelitian ini menunjukkan bahwa kedalaman tiang mempengaruhi nilai efisiensi grup tiang. Semakin panjang kedalaman tiang maka semakin kecil nilai efisiensi. Pada tipe pondasi *end bearing capacity* pengaruh kedalaman tidak terlalu signifikan hanya sebesar 1-5%. Sedangkan pada tipe pondasi *full friction* pengaruh kedalaman terhadap nilai efisiensi bisa mencapai 5-10%.
3. Hasil analisa menggunakan FEM 3D pada penelitian ini menunjukkan batas nilai maksimal dan nilai minimal efisiensi tiang grup. Pada tipe pondasi *end bearing capacity*, nilai efisiensi maksimum adalah sebesar 0,9 dan nilai efisiensi minimum sebesar 0,45. Sedangkan pada tipe pondasi *full friction*, nilai efisiensi maksimum adalah sebesar 0,65 dan untuk nilai minimum sebesar 0,23.
4. Nilai efisiensi FEM 3D pada tipe pondasi *end bearing capacity* memiliki nilai yang lebih mendekati dengan formula Labarre dan formula Los Angeles.
5. Untuk mencari nilai efisiensi berdasarkan dengan variasi konfigurasi, jarak antar pile pada tipe pondasi *end bearing capacity* dapat menggunakan rumus  $E_g=0,106x+c$  dimana " $E_g$ " adalah efisiensi tiang dalam grup pada *end bearing capacity*, " $x$ " adalah perbandingan antara jarak antar tiang dengan diameter tiang ( $s/d$ ), " $m$ " adalah jumlah tiang dalam baris, " $n$ " adalah jumlah baris dalam tiang dan " $c$ " adalah koefisien tiang yang bervariasi. Nilai " $c$ " sebesar 0,335 untuk  $m \times n$  lebih besar dari 15 dan nilai  $c$  sebesar 0,184 untuk  $m \times n$  kurang dari 15.
6. Untuk mencari nilai efisiensi berdasarkan dengan variasi konfigurasi, jarak antar pile pada tipe pondasi *full friction capacity* dapat menggunakan rumus  $E_g=0,087x+c$  dimana " $E_g$ " adalah efisiensi tiang dalam grup pada *end bearing capacity*, " $x$ " adalah perbandingan antara jarak antar tiang dengan diameter tiang ( $s/d$ ), " $m$ " adalah jumlah tiang dalam baris, " $n$ "

adalah jumlah baris dalam tiang dan " $c$ " adalah koefisien tiang yang bervariasi. Nilai " $c$ " sebesar 0,335 untuk  $m \times n$  lebih besar dari 15 dan nilai  $c$  sebesar 0,184 untuk  $m \times n$  kurang dari 15.

#### Daftar Pustaka

- [1] J. Hadihardaja, Fundai Dangkal dan Fundasi Dalam, Jakarta : Gunadarma, 2002.
- [2] Y. Yusti and Mochtar I, "Group Capacity and Efficiency of Full Friction Piles on Very Soft Soil," *International Journal of GEOMATE*, vol. 16, no. 57, p. 8, 2019.
- [3] Bin-Chen Benson Hsiung, Kuo-Hsin Yang, Wahyuning Aila, Louis Ge, "Evaluation of the wall deflections of a deep excavation in Central Jakarta," *Tunnelling and Underground Space Technology*, vol. 72, no. 84-96, p. 13, 2018.
- [4] D. S. Hutapea, "Analisis Daya Dukung dan Penurunan Pondasi Tiang Bor dengan Plaxis 3D Terhadap Loading Test," *Syntax Admiration*, vol. 6, no. 2, p. 18, 2021.
- [5] P. A. Tuan, "A Simplified Formular For Analysis Group," *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. 7, no. 7, p. 7, 2016.
- [6] X. Funchun, "Three-dimensional FEM Analysis of Bridge Pile Group Settlement in Soft Soils," *Geotechnical Special Publication*, vol. 220, no. 15, p. 9, 2011.
- [7] K. Youngho, "Analysis of soil resistance on laterally loaded piles based on 3D soil-pile interaction," *Computers and Geotechnics*, vol. 30, no. 248-257, p. 10, 2011.
- [8] Plaxis, Plaxis 3D Foundation Validation Manual, California: Plaxis, 2012.
- [9] B. S. Nasional, Persyaratan perancangan geoteknik, jakarta: Badan Standardisasi Nasional, 2017.
- [10] B. Das, Principles of Foundation Engineering, Stamford: Global Engineering, 2011.

**Halaman ini sengaja di kodongkan**