

ANALISIS CARA PENINGKATAN DAYA DUKUNG FONDASI DANGKAL PADA KONSTRUKSI GEDUNG BERTINGKAT

Feric Antonius¹ dan Alfred Jonathan Susilo²

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
feric.325160075@stu.untar.ac.id

²Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No.1 Jakarta
alfred@ft.untar.ac.id

Masuk: 02-07-2020, revisi: 19-07-2020, diterima untuk diterbitkan: 05-08-2020

ABSTRACT

The construction of high rise buildings requires a strong foundation. High rise building construction usually requires a deep foundation which requires a large cost. Therefore, shallow foundation can be used as an alternative to replace deep foundation. The main problem that arise is the low bearing capacity which unable to carry the load. This research conducts is to find out how to increase the bearing capacity of a square footings with several reinforcement materials. The analysis bearing capacity of shallow foundation is carried out manually using the Terzaghi method and the Meyerhof and Hanna method. The results of the analysis using these two methods show that soil reinforcement materials such as stone column, crushed stone, crushed limestone, construction and demolition can increase the bearing capacity of shallow foundations. The conclusions of this research with Terzaghi method obtained that the greater value of friction angle and unit weight of soil from the reinforcement materials, the bearing capacity of the foundation will be even greater, while the Meyerhof and Hanna method obtained that the stronger material does not always get the greatest value of bearing capacity because it depends on the type and consistency of the soil under the reinforcement layer.

Keywords: bearing capacity; stone column; crushed stone; crushed limestone; construction and demolition

ABSTRAK

Dalam perencanaan pembangunan seperti gedung bertingkat tentunya memerlukan sebuah fondasi yang kuat. Pembangunan konstruksi gedung bertingkat biasanya memerlukan fondasi dalam tetapi memerlukan biaya yang besar. Oleh karena itu, fondasi dangkal dapat digunakan sebagai alternatif untuk menggantikan fondasi dalam. Masalah utama yang timbul dari penggunaan fondasi dangkal untuk gedung bertingkat adalah daya dukung fondasi yang rendah sehingga tidak mampu memikul gaya luar. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui cara peningkatan daya dukung fondasi telapak persegi dengan beberapa material perkuatan tanah untuk gedung bertingkat. Analisis daya dukung fondasi dangkal dilakukan secara perhitungan manual menggunakan metode Terzaghi dan metode Meyerhof dan Hanna. Hasil analisis menggunakan kedua metode tersebut menunjukkan bahwa material perkuatan tanah yaitu *stone column*, *crushed stone*, *crushed limestone* dan *construction and demolition* yang digunakan dapat meningkatkan daya dukung fondasi dangkal. Kesimpulan dari penelitian ini antara lain menggunakan metode Terzaghi didapatkan bahwa semakin besar nilai sudut geser dalam dan berat jenis tanah dari material perkuatan yang digunakan maka nilai daya dukung fondasi akan semakin besar sedangkan metode Meyerhof dan Hanna didapatkan bahwa semakin kuat material belum tentu berpengaruh untuk mendapatkan nilai daya dukung yang paling besar karena dipengaruhi dengan jenis dan konsistensi tanah yang berada dibawah lapisan perkuatan tersebut.

Kata kunci: daya dukung; *stone column*; *crushed stone*; *crushed limestone*; *construction and demolition*

1. PENDAHULUAN

Dalam perencanaan pembangunan seperti gedung perkantoran, pertokoan, perumahan, maupun apartemen tentunya memerlukan fondasi yang kuat. Fondasi adalah bangunan struktur yang berada di bawah bangunan dan merupakan bagian dari suatu sistem rekayasa yang meneruskan beban yang dipikul serta beratnya sendiri kemudian menyalurkannya ke dalam tanah atau batuan yang terletak di bawahnya (Bowles, 1988). Secara umum fondasi dibagi menjadi dua kategori yaitu, fondasi dangkal (*shallow foundation*) dan fondasi dalam (*deep foundation*). Beberapa faktor yang mempengaruhi pemilihan jenis fondasi antara lain, beban yang direncanakan, jenis tanah, dan biaya.

Pada proyek konstruksi gedung bertingkat 5-8 lantai biasanya menggunakan fondasi dalam sedangkan pada proyek perumahan 2-3 lantai biasanya menggunakan fondasi dangkal karena beban yang dipikul tidak terlalu besar. Pembangunan gedung bertingkat yang menggunakan fondasi dalam membutuhkan biaya yang besar. Oleh karena itu, fondasi dangkal dapat digunakan sebagai alternatif menggantikan fondasi dalam. Masalah utama yang timbul dari penggunaan fondasi dangkal untuk gedung bertingkat adalah daya dukung fondasi yang rendah sehingga tidak mampu memikul gaya luar. Secara teori, meningkatkan daya dukung fondasi dapat dilakukan dengan meningkatkan daya dukung tanah. Daya dukung tanah adalah kemampuan tanah untuk menerima dan memikul beban bangunan dengan aman tanpa menimbulkan keruntuhan geser dan penurunan tinggi yang akhirnya menyebabkan kelongsoran (Palar, *et al.*, 2013).

Metode perbaikan tanah dapat menjadi solusi untuk meningkatkan daya dukung tanah yang rendah. Perbaikan tanah tersebut dilakukan dengan tujuan agar tanah menjadi semakin kuat sehingga daya dukungnya menjadi besar. Banyak material-material yang dapat ditambahkan untuk memperkuat lapisan tanah seperti cerucuk, batuan, buis beton, *stone column*, dan lain sebagainya. Pada penelitian ini fondasi dangkal yang digunakan adalah fondasi telapak untuk bangunan gedung bertingkat yang diperkuat dengan *stone column*, *crushed stone*, *crushed limestone*, dan *construction and demolition*. Dari beberapa material tersebut juga memiliki properti yang berbeda-beda sehingga akan mempengaruhi daya dukung tanah. Oleh karena itu, penelitian ini akan mencari cara-cara maupun kombinasi terbaik untuk didapatkan daya dukung tertinggi yang mampu memikul beban luar maksimum.

Dengan memperhatikan hal yang telah disampaikan pada latar belakang masalah, maka akan menghasilkan rumusan masalah adalah sebagai berikut:

1. Menghitung daya dukung fondasi telapak dengan kombinasi material perkuatan tanah seperti dengan *stone column*, *crushed stone*, *crushed limestone*, dan *construction and demolition*.
2. Membandingkan daya dukung fondasi telapak dengan kombinasi dari masing-masing material.

Berdasarkan rumusan masalah yang dijelaskan sebelumnya, maka tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Untuk mengetahui daya dukung fondasi telapak dengan kombinasi material perkuatan tanah seperti dengan *stone column*, *crushed stone*, *crushed limestone*, dan *construction and demolition*.
2. Untuk mengetahui perbandingan daya dukung fondasi telapak dengan kombinasi dari masing-masing material.

Tinjauan pustaka

Fondasi adalah bagian dari struktur bangunan yang menerima beban dari struktur atas kemudian menyalurkan ke dalam tanah yang mendukungnya. Bentuk, kedalaman, dan bahan untuk mendesain fondasi tergantung pada banyak faktor termasuk beban struktur bangunan, kondisi tanah, dan ketersediaan material (Lindeburg, 2014). Fondasi dangkal digunakan apabila bangunan yang berada di atasnya tidak terlalu besar seperti rumah sederhana namun dapat digunakan juga untuk bangunan umum lainnya jika berada di atas tanah yang keras dengan daya dukung tanah yang baik (Nusantara, 2014). Pada umumnya fondasi dangkal terbagi menjadi beberapa tipe, antara lain fondasi telapak, fondasi jalur, dan fondasi rakit. Fondasi telapak adalah fondasi yang berdiri sendiri dalam mendukung beban kolom. Bentuk umum yang biasa digunakan pada fondasi telapak adalah berbentuk bujur sangkar, persegi panjang, dan lingkaran (Martini, 2009).

Analisis daya dukung Terzaghi

Teori persamaan daya dukung Terzaghi telah banyak digunakan karena persamaan tersebut merupakan usulan pertama dan cukup konservatif. Persamaan daya dukung batas yang disarankan untuk fondasi berbentuk bujur sangkar oleh Terzaghi (1943) dalam Das (2011) adalah sebagai berikut:

$$q_{ult} = 1,3 c N_c + \gamma D_f N_q + 0,4 \gamma B N_\gamma \quad (1)$$

dengan q_{ult} = daya dukung *ultimate* [kN/m²], c = kohesi tanah [kN/m²], γ = berat volume tanah [kN/m³], D_f = kedalaman fondasi [m], B = lebar fondasi [m], N_c, N_q, N_γ = faktor daya dukung Terzaghi.

Tabel 1. Faktor kapasitas daya dukung Terzaghi

ϕ	N_c	N_q	N_γ
0	5,7	1,0	0,0
5	7,3	1,6	0,5
10	9,6	2,7	1,2
15	12,9	4,4	2,5
20	17,7	7,4	5,0
25	25,1	12,7	9,7
30	37,2	22,5	19,7
35	57,8	41,4	42,4
40	95,7	81,3	100,4
45	172,3	173,3	297,5
50	347,5	415,1	1153,2

(Sumber: Bowles, 1997)

Analisis daya dukung Meyerhof dan Hanna

Setiap analisis untuk menghitung daya dukung kebanyakan yang beranggapan bahwa tanah di bawah fondasi merupakan tanah yang homogen. Pada saat melakukan pembangunan konstruksi di suatu lokasi tentunya tanah yang dijumpai umumnya tidak seragam sehingga terdapat campuran pasir, lanau, dan tanah liat dengan proporsi yang berbeda-beda. Jika tanah yang ditemukan pada lokasi mempunyai lapisan berbeda dari segi komposisi dan kekuatannya, maka asumsi homogenitas terhadap tanah tersebut tidak sepenuhnya akurat. Untuk menghitung daya dukung *ultimate* fondasi pada sistem 2 lapisan berbeda menggunakan metode Meyerhof dan Hanna (1978) dalam Murthy (2002) dapat dilihat sebagai berikut:

$$q_{ult} = q_b + \left(\frac{2c_a H}{B}\right) \left(1 + \frac{B}{L}\right) + \left(\frac{\gamma_1 H^2}{B}\right) \left(1 + \frac{2Df}{H}\right) \left(1 + \frac{B}{L}\right) Ks \tan \phi_1 - \gamma_1 H \leq q_t \quad (2)$$

Dimana:

Lapisan 1

$$q_1 = c_1 Nc_1 + \frac{1}{2} \gamma_1 B N\gamma_1 \quad (3)$$

$$q_t = c_1 Nc_1 Sc_1 + \gamma_1 Df Nq_1 Sq_1 + \frac{1}{2} \gamma_1 B N\gamma_1 S\gamma_1 \quad (4)$$

Lapisan 2

$$q_2 = c_2 Nc_2 + \frac{1}{2} \gamma_2 B N\gamma_2 \quad (5)$$

$$q_b = c_2 Nc_2 Sc_2 + \gamma_1 (Df + H) Nq_2 Sq_2 + \frac{1}{2} \gamma_2 B N\gamma_2 S\gamma_2 \quad (6)$$

dengan $Nc_1, Nq_1, N\gamma_1$ = faktor daya dukung Meyerhof lapisan 1 untuk ϕ_1 , $Nc_2, Nq_2, N\gamma_2$ = faktor daya dukung Meyerhof lapisan 2 untuk ϕ_2 , $Sc_1, Sq_1, S\gamma_1$ = faktor bentuk Meyerhof lapisan 1 untuk ϕ_1 , $Sc_2, Sq_2, S\gamma_2$ = faktor bentuk Meyerhof lapisan 2 untuk ϕ_2 .

Faktor bentuk Meyerhof dapat dilihat sebagai berikut:

$$S_c = 1 + 0,2 N_\phi B/L \text{ untuk semua } \phi \quad (7)$$

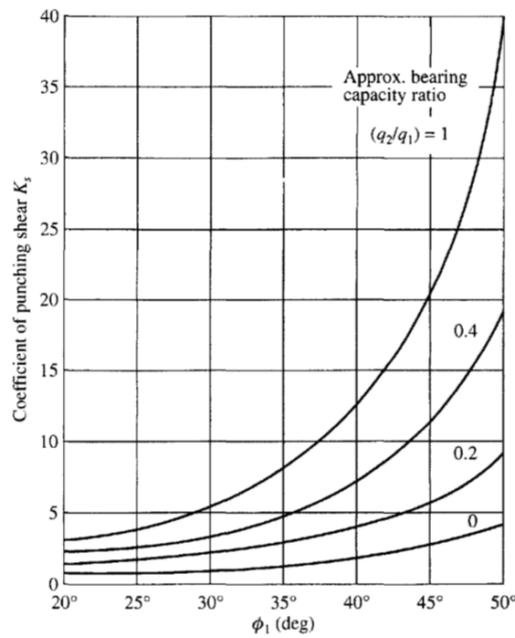
$$S_q = S_\gamma = 1 + 0,1 N_\phi B/L \text{ untuk } \phi > 10^\circ \quad (8)$$

$$S_q = S_\gamma = 1 \text{ untuk } \phi = 0^\circ \quad (9)$$

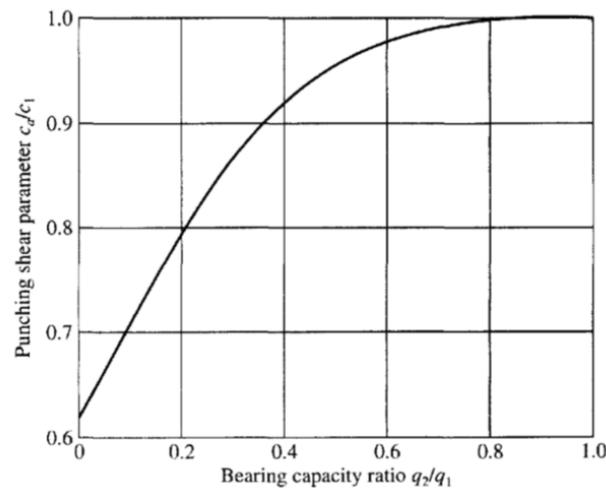
Tabel 2. Faktor kapasitas daya dukung Meyerhof

ϕ	N_c	N_q	N_γ
0	5,14	1,0	0,0
5	6,49	1,6	0,1
10	8,34	2,5	0,4
15	10,97	3,9	1,1
20	14,83	6,4	2,9
25	20,71	10,7	6,8
26	22,25	11,8	8,0
28	25,79	14,7	11,2
30	30,13	18,4	15,7
32	35,47	23,2	22,0
34	42,14	29,4	31,1
36	50,55	37,7	44,4
38	61,31	48,9	64,0
40	75,25	64,1	93,6
45	133,73	134,7	262,3
50	266,50	318,5	871,7

(Sumber: Bowles, 1997)



Gambar 1. Menentukan koefisien K_s di bawah beban vertikal (Sumber: Murthy, 2002)



Gambar 2. Menentukan nilai parameter c_a/c_1 (Sumber: Murthy, 2002)

Perbaikan tanah

Pada suatu lokasi yang akan dibangun sebuah konstruksi tentunya memiliki kendala masing-masing. Tidak semua tanah di lokasi tersebut dapat memenuhi kebutuhan bangunan yang akan didirikan di atasnya. Tanah yang tidak memadai sebuah lokasi biasanya berupa lapisan tanah yang sangat lunak dan penurunan tanah yang sangat besar. Apabila suatu konstruksi akan dibangun di atas tanah yang lunak maka fondasi tersebut akan memiliki daya dukung yang rendah dan tidak akan mampu untuk memikul beban di atasnya. Oleh karena itu, dengan adanya perbaikan tanah dimaksudkan agar dapat memberi peningkatan daya dukung fondasi sehingga mampu memikul beban bangunan di atasnya. Menurut Nicholson (2015), ada empat alternatif yang dapat dilakukan jika kondisi tanah pada suatu proyek dinilai tidak memadai, yaitu:

1. Mengganti lapisan tanah yang tergolong tidak memadai seperti tanah lunak. Cara tersebut merupakan cara yang paling umum untuk dilakukan akan tetapi membutuhkan biaya yang besar untuk memindahkan material, bergantung juga pada ketersediaan material, dan sering kali menimbulkan pencemaran lingkungan.
2. Merelokasi proyek, tetapi cara seperti ini akan sulit direalisasikan karena tidak mudah untuk menemukan lokasi dengan kondisi tanah yang benar-benar sesuai. Selain itu keterbatasan lahan juga menjadi salah satu faktor untuk merelokasi proyek.
3. Melakukan desain ulang terhadap rencana awal. Misalnya, mengganti fondasi tiang pancang dengan tiang bor, mengubah panjang tiang, dan lain sebagainya.
4. Mengubah karakteristik atau properti dari tanah dengan cara melakukan perbaikan tanah.

Stone column

Stone column semakin banyak digunakan sebagai metode perbaikan tanah untuk mendukung berbagai macam konstruksi seperti bangunan, jalan, dan lain sebagainya. Metode perbaikan tanah ini telah digunakan secara luas selama 30 tahun terakhir di banyak negara di dunia (Black, *et al.*, 2007). Menurut Sihombing (2013), perbaikan tanah dengan menggunakan *stone column* sangat baik dalam meningkatkan daya dukung tanah lunak, namun untuk mengurangi masalah *settlement* (penurunan) kurang efektif. Berdasarkan hasil penelitian (Afshar, *et al.*, 2010), peningkatan daya dukung tanah akan lebih efisien dengan memperbesar diameter *stone column* daripada meningkatkan sudut gesekan internal dari material-material dan mengurangi jarak antara *stone column* yang satu dengan yang lainnya.

Stone column akan meningkatkan kapasitas daya dukung untuk tanah kohesif dan panjang kolom yang lebih besar dari sekitar enam kali diameternya tidak akan berpengaruh terhadap peningkatan kapasitas daya dukung (Mckelvey, *et al.*, 2004). Menurut penelitian (Demir dan Sarici, 2017), kapasitas daya dukung tanah akan semakin meningkat seiring meningkatnya diameter *stone column* dan sudut gesekan dari material batuan yang digunakan. Berikut adalah tabel properti material batuan yang digunakan pada perkuatan tanah dengan *stone column*.

Tabel 3. Properti material batuan pada *stone column*

Parameter	Nilai
γ_{dry} (kN/m ³)	16,55
γ (kN/m ³)	19,05
E (kN/m ²)	55000
c (kN/m ²)	0
ϕ (°)	43

(Sumber: Fathi dan Mohtasham, 2016)

Crushed limestone

Metode yang umum untuk digunakan adalah dengan menggantikan lapisan tanah yang lemah dengan lapisan butiran yang kuat, menambah dimensi fondasi, dan kombinasi keduanya. Dalam dua dekade terakhir, perkuatan tanah dengan material butiran sudah berhasil digunakan dalam perencanaan rekayasa geoteknik seperti, dinding penahan tanah, tanggul, perkerasan jalan, dan fondasi dangkal. Salah satu material butiran yang digunakan dalam perkuatan tanah lunak adalah batu kapur. Batu kapur disebut juga batu gamping (*limestone*). Batu kapur merupakan bagian dari batuan sedimen yang terbentuk dari proses kimia dan biologi. Kandungan utama batu kapur adalah mineral kalsium karbonat (CaCO₃) yang terjadi akibat proses kimia. Secara umum mineral yang terkandung dalam batu kapur adalah kalsium karbonat kalsit sebesar 95%, dolomit sebanyak 3%, dan sisanya adalah mineral *clay* (Apriliani, et al., 2012).

Menurut Chen, et al. (2009), yang telah melakukan penelitian pada manfaat perkuatan tanah dengan *crushed limestone* menunjukkan bahwa tanah yang diperkuat dapat meningkatkan kapasitas daya dukungnya dan mampu mengurangi masalah penurunan. Hasil penelitiannya membuktikan bahwa daya dukung tanah akan semakin meningkat dan jumlah penurunan semakin berkurang dengan menambah lapisan perkuatan. Menurut Ridwan dan Sari (2016), nilai daya dukung fondasi dangkal semakin meningkat dengan besarnya persentase penambahan *crushed limestone* pada tanah lempung, yaitu nilai daya dukung fondasi dangkal pada persentase 0 %, 5 %, 10%, 15 % dan 20 % adalah sebesar 39,845 Ton/m², 57,547 Ton/m², 67,194 Ton/m², 76,19 Ton/m², 81,084 Ton/m². Berikut ini adalah tabel properti material yang digunakan dalam perkuatan tanah dengan *crushed limestone*.

Tabel 4. Properti material *crushed limestone*

Parameter	Nilai
c (kN/m ²)	0
γ (kN/m ³)	19,2
ϕ (°)	46
E (kN/m ²)	120000
<i>Poisson ratio</i> (μ)	0,35

(Sumber: Farsakh, et al., 2012)

Crushed stone

Ada banyak material batuan yang dapat digunakan untuk perkuatan tanah selain *limestone* (batu kapur). Setiap material memiliki properti yang berbeda-beda dan tentunya dapat mempengaruhi perkuatan terhadap tanah. Salah satu material yang dapat digunakan adalah *crushed stone* (kerikil). Kerikil merupakan agregat alam yang memiliki bentuk alami dan terbentuk berdasarkan aliran air sungai dan degradasi. Agregat yang terbentuk dari aliran sungai akan berbentuk bulat dan licin, sedangkan agregat yang terbentuk dari proses degradasi akan berbentuk kubus dengan sudut tertentu dan permukaannya kasar (Dwiretnani, 2018). Berdasarkan hasil penelitian Bai, et al. (2013) yang menggunakan *crushed stone* dalam perkuatan fondasi setempat, daya dukung fondasi akan lebih besar dengan menambah lapisan perkuatan. Jika tetap menggunakan satu lapisan perkuatan, daya dukung bisa ditingkatkan dengan menambah kepadatan material. Berikut ini adalah tabel properti material *crushed stone*.

Tabel 5. Properti material *crushed stone*

Parameter	Nilai
<i>Spesific gravity</i> (G_s)	2,85
<i>Density</i> (kN/m^3) (γ_n)	18,3
<i>Maximum dry unit weight</i> (γ_{max})	16,9
<i>Minimum dry unit weight</i> (γ_{min})	15,2
<i>Internal friction angle</i> (ϕ)	44
<i>Uniformity coefficient</i> (C_u)	1,67
<i>Coefficient of curvature</i> (C_c)	1,10

(Sumber: Demir dan Sarici, 2017)

Construction and demolition

Construction and demolition merupakan suatu material yang berasal dari sisa-sisa bahan konstruksi bangunan yang dihancurkan kemudian membentuk puing dan semakin banyak digunakan sebagai bahan konstruksi dalam pembangunan seperti trotoar, perbaikan tanah, agregat dalam beton. Bahan daur ulang *Construction and demolition* dibagi menjadi beberapa kategori seperti *Recycled Concrete Aggregate* (RCA), *Crushed Brick* (CB), *Reclaimed Asphalt Pavement* (RAP), *Waste Rock* (WR), *Fine Recycled Glass* (FRG), dan *Medium Recycled Glass* (MRG). Menurut Arulrajah, *et al.* (2012), penggunaan material *construction and demolition* semakin banyak digunakan karena meningkatnya keterbatasan material yang berasal dari alam, membutuhkan biaya yang besar untuk pengangkutan material tersebut ke tempat pembuangan di banyak negara dan mengurangi jumlah limbah. Berikut ini adalah tabel properti material *construction and demolition* berdasarkan kategorinya.

Tabel 6. Properti material *construction and demolition*

Parameter	RCA	CB	WR	RAP	FRG	MRG	Satuan
C_u	33,3	46,9	103,1	11,7	6,9	7,2	-
C_c	1,7	2,7	2,8	1,7	1,2	1,3	-
q_u	354	112	186	114	0	0	kN/m^2
γ_{dry}	19,6	20,2	22,3	20	17,8	19,9	kN/m^3
c	18	6	10	6	0	0	kN/m^2
ϕ	40	45	48	43	41	50	degrees

(Sumber: Arulrajah, *et al.*, 2014)

2. METODE PENELITIAN

Metode yang dapat digunakan dalam melakukan suatu penelitian antara lain studi laboratorium, studi literatur dan studi kasus. Untuk studi laboratorium dilakukan dengan cara penelitian atau melakukan eksperimen suatu material di dalam laboratorium. Untuk studi literatur dilakukan dengan cara membahas dan membandingkan teori yang sudah ada tanpa melihat kasus yang nyata. Untuk studi kasus dilakukan dengan cara penelitian dengan metode analisis pada kasus yang nyata. Pada analisis ini akan digunakan metode penelitian studi literatur.

Penelitian yang digunakan pada skripsi ini adalah analisis cara peningkatan daya dukung fondasi dangkal pada konstruksi gedung bertingkat. Penelitian ini dilakukan dengan cara mengumpulkan data tanah yang memiliki kondisi tanah dengan konsistensi *medium* sampai *stiff* pada kedalaman 1 sampai 4 meter. Pada penelitian ini, data tanah yang digunakan berlokasi di Jakarta Barat. Data tanah yang dikumpulkan berupa *boring log* dan hasil tes laboratorium. Data tanah tersebut berupa N-SPT yang kemudian dilakukan korelasi untuk mendapatkan beberapa parameter tanah lainnya yang diperlukan untuk analisis.

Sebelum melakukan pengolahan data, perlu melakukan studi literatur terlebih dahulu. Studi literatur dilakukan untuk memahami dasar-dasar teori yang perlu diperhatikan dan rumus-rumus yang akan digunakan untuk analisis. Setelah melakukan studi literatur kemudian dilanjutkan dengan pengolahan data-data tanah dan material yang telah dikumpulkan. Hasil analisis daya dukung fondasi dangkal dilakukan secara perhitungan manual menggunakan metode Terzaghi dan metode Meyerhof dan Hanna. Setelah mengetahui besarnya daya dukung fondasi dangkal, maka hasil tersebut akan dibandingkan dan membuat kesimpulan dan saran.

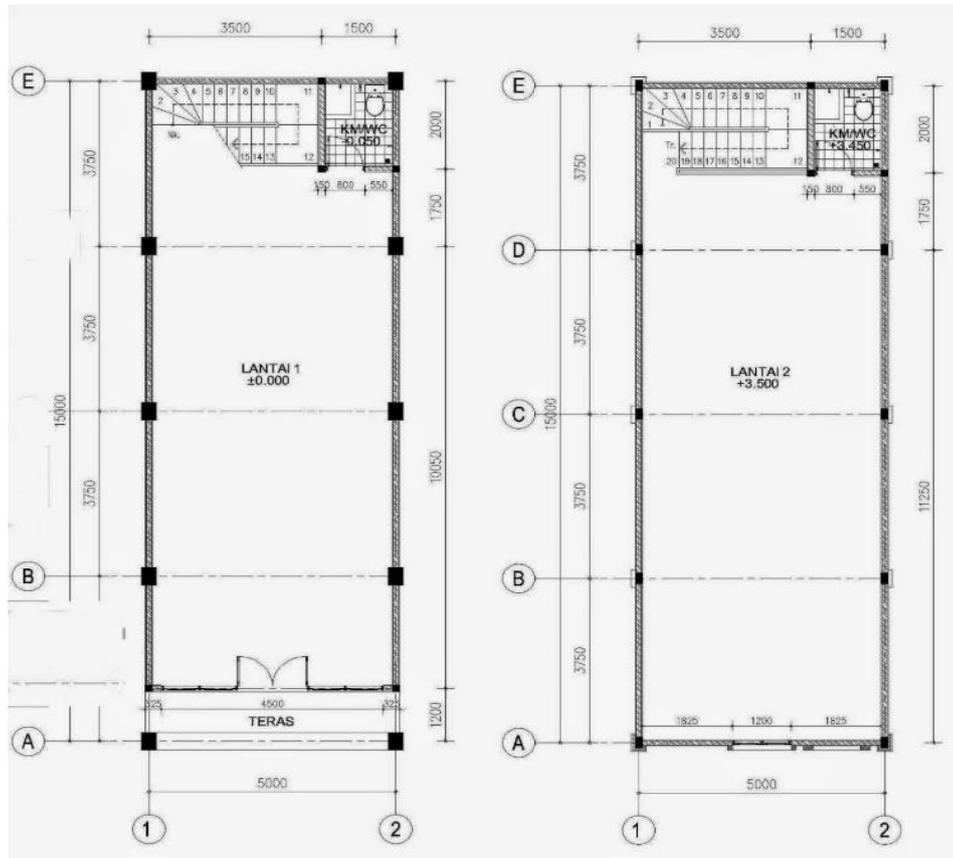
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Data proyek

Pada perhitungan daya dukung fondasi akan menggunakan data proyek berupa *boring log* dari hasil pengujian di daerah Jakarta Barat. Data proyek yang digunakan terdiri dari 2 buah titik bor dengan kedalaman 40 meter dan 30 meter, serta hasil uji laboratorium. Dari 2 buah titik bor terdapat nilai N-SPT dan klasifikasi tanah, serta hasil uji laboratorium terdapat beberapa parameter tanah dari setiap lapisannya. Kemudian dari data laboratorium tersebut akan dilakukan korelasi untuk mendapatkan nilai parameter tanah lain yang dibutuhkan dalam perhitungan.

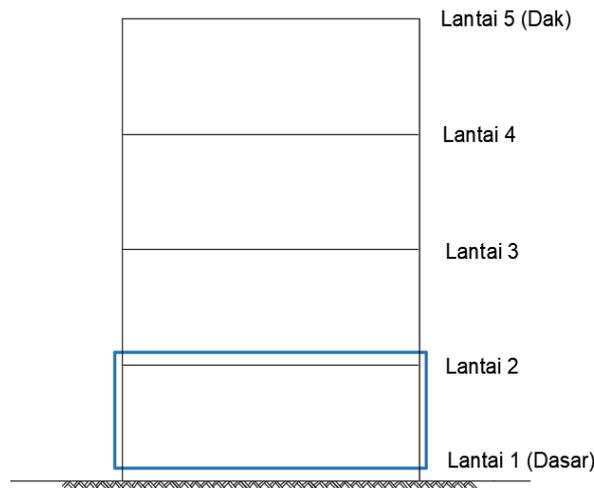
Asumsi ukuran dan berat bangunan

Bentuk denah bangunan yang digunakan untuk perkantoran seperti pada gambar berikut ini.



Gambar 3. Denah bangunan yang digunakan

Perhitungan berat bangunan yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada Gambar 4. Perhitungan beban akan dibagi menjadi 2, yaitu perhitungan beban lantai 1 perhitungan beban lantai 1 (dasar) dan lantai 2 sampai seterusnya yang merupakan lantai tipikal. Perhitungan lantai 1 (dasar) terdiri dari beban pelat lantai, *tie beam* arah X dan Y, dan fondasi. Sedangkan perhitungan lantai 2 sampai seterusnya dapat dilihat pada Gambar 4 terdapat sebuah kotak berwarna biru yang didalamnya terdiri dari beban pelat lantai, balok induk arah X dan Y, dinding, kolom, beban hidup (LL), beban mati tambahan (SDL) seperti keramik beserta spesi, ducting mekanikal, penggantung langit-langit, dan plafon.



Gambar 4. Contoh sketsa perhitungan beban lantai bangunan

Perhitungan metode Terzaghi

Perhitungan nilai daya dukung fondasi dangkal berbentuk bujur sangkar dengan menggunakan kondisi tanah asli pada *boring log 1* dan *boring log 2* maupun dengan kombinasi material perkuatan tanah seperti *stone column*, *crushed stone*, *crushed limestone* dan *construction and demolition* pada kondisi kedua *boring log* tersebut menggunakan rumus 1, kemudian akan dibandingkan dengan beban luar untuk mendapatkan jumlah lantai bangunan yang dapat dipikul. Fondasi yang digunakan berbentuk bujur sangkar dengan ukuran 1x1 meter yang diletakkan pada kedalaman 1 meter. Berikut ini hasil perhitungan akhir metode Terzaghi dapat dilihat pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil perhitungan akhir metode Terzaghi

Material	$\frac{q_{ult}}{SF}$ (kN/m ²)		Jumlah Lantai Dipikul	
	<i>Boring log 1</i>	<i>Boring log 2</i>	<i>Boring log 1</i>	<i>Boring log 2</i>
Tanah Asli	373,84	338,04	3	3
<i>Stone Column</i>	768,42	863,52	7	8
<i>Crushed Stone</i>	881,84	991,67	8	9
<i>Crushed Limestone</i>	1320,63	1489,17	12	13
<i>Recycled Concrete Aggregate</i>	1174,61	1225,52	10	11
<i>Crushed Brick</i>	1443,25	1567,81	13	14
<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i>	1136,73	1231,83	10	11

Perhitungan metode Meyerhof dan Hanna

Perhitungan nilai daya dukung fondasi dangkal berbentuk bujur sangkar dengan menggunakan kondisi tanah asli pada *boring log 1* dan *boring log 2* maupun dengan kombinasi material perkuatan tanah seperti *stone column*, *crushed stone*, *crushed limestone* dan *construction and demolition* pada kondisi kedua *boring log* tersebut menggunakan rumus 2, 3, 4, 5 dan 6, kemudian akan dibandingkan dengan beban luar untuk mendapatkan jumlah lantai bangunan yang dapat dipikul. Fondasi yang digunakan berbentuk bujur sangkar dengan ukuran 1x1 meter yang diletakkan pada kedalaman 1 meter dan tebal pelat fondasi 0,25 meter akan dikombinasikan dengan tebal lapisan perkuatan (H) yang berbeda pada setiap material. Hasil perhitungan akhir metode Meyerhof dan Hanna akan disajikan pada tabel-tabel berikut ini.

Tabel 8. Hasil perhitungan akhir metode Meyerhof dan Hanna pada *boring log 1* dan *boring log 2*

Kondisi	q_b (kN/m ²)	q_{ult} (kN/m ²)	q_t (kN/m ²)	q_{ult} dipakai (kN/m ²)	$\frac{q_{ult}}{SF}$ (kN/m ²)	Jumlah Lantai Dipikul
<i>Boring Log 1</i>	692,59	761,61	816,79	761,61	253,87	2
<i>Boring Log 2</i>	737,79	819,77	785,15	785,15	261,71	2

Tabel 9. Hasil perhitungan akhir metode Meyerhof dan Hanna untuk *stone column* pada *boring log 1*

H (meter)	q_b (kN/m ²)	q_{ult} (kN/m ²)	q_t (kN/m ²)	q_{ult} dipakai (kN/m ²)	$\frac{q_{ult}}{SF}$ (kN/m ²)	Jumlah Lantai Dipikul
0,1	862,27	872,51	1716,10	872,51	290,83	3
0,2	894,15	918,33	1716,10	918,33	306,11	3
0,3	926,02	967,87	1716,10	967,87	322,62	3
0,4	957,90	1021,12	1716,10	1021,12	340,37	3
0,5	989,77	1078,08	1716,10	1078,08	359,36	3
0,6	1021,65	1138,76	1716,10	1138,76	379,58	3
0,7	1053,52	1203,15	1716,10	1203,15	401,05	4

Tabel 10. Hasil perhitungan akhir metode Meyerhof dan Hanna untuk *crushed stone* pada *boring log 1*

H (meter)	q_b (kN/m ²)	q_{ult} (kN/m ²)	q_t (kN/m ²)	q_{ult} dipakai (kN/m ²)	$\frac{q_{ult}}{SF}$ (kN/m ²)	Jumlah Lantai Dipikul
0,1	853,03	863,74	1864,02	863,74	287,91	3
0,2	882,26	907,53	1864,02	907,53	302,51	3
0,3	911,49	955,17	1864,02	955,17	318,39	3
0,4	940,73	1006,66	1864,02	1006,66	335,55	3
0,5	969,96	1061,99	1864,02	1061,99	353,99	3
0,6	999,19	1121,18	1864,02	1121,18	373,72	3
0,7	1028,43	1184,21	1864,02	1184,21	394,73	4

Tabel 11. Hasil perhitungan akhir metode Meyerhof dan Hanna untuk *crushed limestone* pada *boring log 1*

H (meter)	q_b (kN/m ²)	q_{ult} (kN/m ²)	q_t (kN/m ²)	q_{ult} dipakai (kN/m ²)	$\frac{q_{ult}}{SF}$ (kN/m ²)	Jumlah Lantai Dipikul
0,1	864,12	872,35	3485,78	872,35	290,78	3
0,2	896,52	916,02	3485,78	916,02	305,34	3
0,3	928,93	962,75	3485,78	962,75	320,91	3
0,4	961,33	1012,53	3485,78	1012,53	337,51	3
0,5	993,74	1065,35	3485,78	1065,35	355,11	3
0,6	1026,14	1121,22	3485,78	1121,22	373,74	3
0,7	1058,54	1180,14	3485,78	1180,14	393,38	4

Tabel 12. Hasil perhitungan akhir metode Meyerhof dan Hanna untuk *recycled concrete aggregate* pada boring log 1

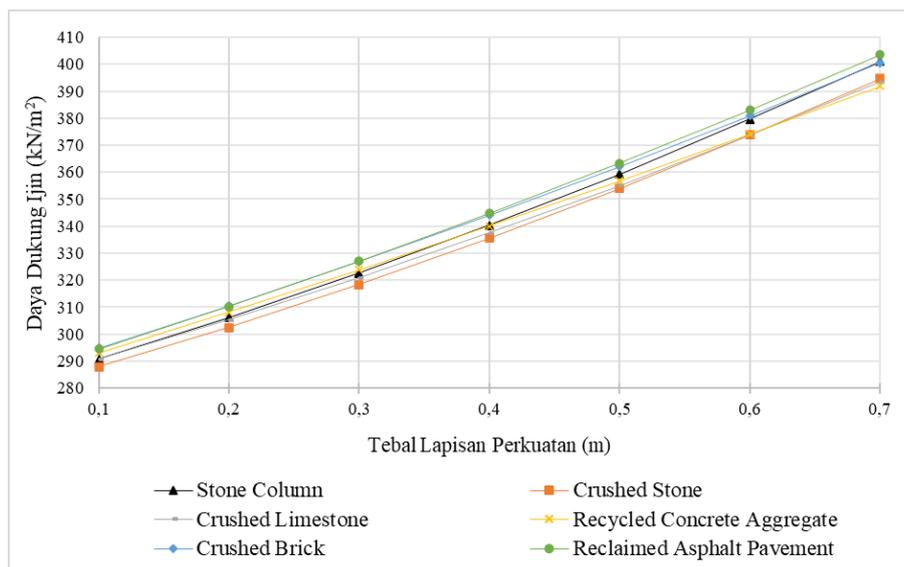
H (meter)	q_b (kN/m ²)	q_{ult} (kN/m ²)	q_t (kN/m ²)	q_{ult} dipakai (kN/m ²)	$\frac{q_{ult}}{SF}$ (kN/m ²)	Jumlah Lantai Dipikul
0,1	869,05	879,05	3377,16	879,05	293,01	3
0,2	902,86	924,46	3377,16	924,46	308,15	3
0,3	936,68	971,49	3377,16	971,49	323,83	3
0,4	970,49	1020,13	3377,16	1020,13	340,04	3
0,5	1004,30	1070,38	3377,16	1070,38	356,79	3
0,6	1038,11	1122,24	3377,16	1122,24	374,08	3
0,7	1071,93	1175,71	3377,16	1175,71	391,90	4

Tabel 13. Hasil perhitungan akhir metode Meyerhof dan Hanna untuk *crushed brick* pada boring log 1

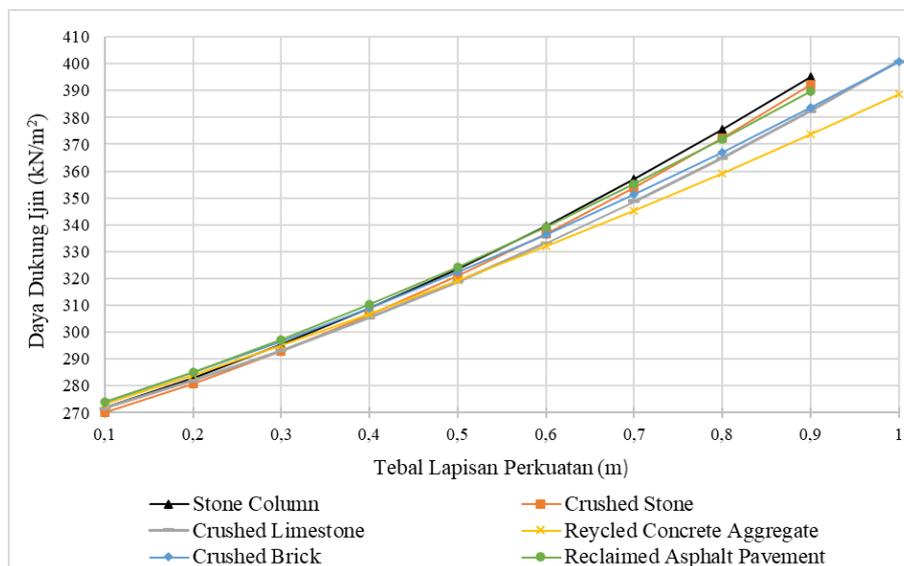
H (meter)	q_b (kN/m ²)	q_{ult} (kN/m ²)	q_t (kN/m ²)	q_{ult} dipakai (kN/m ²)	$\frac{q_{ult}}{SF}$ (kN/m ²)	Jumlah Lantai Dipikul
0,1	876,45	884,74	4398,80	884,74	294,91	3
0,2	912,37	931,41	4398,80	931,41	310,47	3
0,3	948,30	980,52	4398,80	980,52	326,84	3
0,4	984,23	1032,08	4398,80	1032,08	344,02	3
0,5	1020,15	1086,09	4398,80	1086,09	362,03	3
0,6	1056,08	1142,55	4398,80	1142,55	380,85	3
0,7	1092,01	1201,45	4398,80	1201,45	400,48	4

Tabel 14. Hasil perhitungan akhir metode Meyerhof dan Hanna untuk *reclaimed asphalt pavement* pada boring log 1

H (meter)	q_b (kN/m ²)	q_{ult} (kN/m ²)	q_t (kN/m ²)	q_{ult} dipakai (kN/m ²)	$\frac{q_{ult}}{SF}$ (kN/m ²)	Jumlah Lantai Dipikul
0,1	873,98	883,46	3243,79	883,46	294,48	3
0,2	909,20	930,96	3243,79	930,96	310,32	3
0,3	944,43	981,26	3243,79	981,26	327,08	3
0,4	979,65	1034,35	3243,79	1034,35	344,78	3
0,5	1014,87	1090,25	3243,79	1090,25	363,41	3
0,6	1050,09	1148,94	3243,79	1148,94	382,98	3
0,7	1085,31	1210,42	3243,79	1210,42	403,47	4



Gambar 5. Perbandingan perhitungan daya dukung metode Meyerhof dan Hanna pada boring log 1



Gambar 6. Perbandingan perhitungan daya dukung metode Meyerhof dan Hanna pada boring log 2

4. KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Berdasarkan hasil perhitungan q_{all} menggunakan metode Terzaghi dan metode Meyerhof dan Hanna, didapatkan bahwa material perkuatan tanah yaitu *stone column*, *crushed stone*, *crushed limestone*, *recycled concrete aggregate*, *crushed brick*, dan *reclaimed asphalt pavement* yang digunakan dapat meningkatkan daya dukung fondasi dangkal.
2. Berdasarkan hasil perhitungan, besarnya q_{all} menggunakan metode Terzaghi pada kondisi tanah asli di boring log 1 sebesar $373,84 \text{ kN/m}^2$ dapat memikul 3 lantai. Nilai q_{all} terbesar didapat dengan kombinasi *crushed brick* sebesar $1443,25 \text{ kN/m}^2$ dapat memikul 13 lantai, q_{all} dengan kombinasi *crushed limestone* sebesar $1320,63 \text{ kN/m}^2$ dapat memikul 12 lantai, q_{all} dengan kombinasi *recycled concrete aggregate* sebesar $1174,60 \text{ kN/m}^2$ dapat memikul 10 lantai, q_{all} dengan kombinasi *reclaimed asphalt pavement* sebesar $1136,73 \text{ kN/m}^2$ dapat memikul 10 lantai, q_{all} dengan kombinasi *crushed stone* sebesar $881,84 \text{ kN/m}^2$ dapat memikul 8 lantai, dan q_{all} terkecil didapat dengan kombinasi *stone column* sebesar $768,42 \text{ kN/m}^2$ dapat memikul 7 lantai.

3. Berdasarkan hasil perhitungan, besarnya q_{all} menggunakan metode Terzaghi pada kondisi tanah asli di *boring log 2* sebesar $338,04 \text{ kN/m}^2$ dapat memikul 3 lantai. Nilai q_{all} terbesar didapat dengan kombinasi *crushed brick* sebesar $1567,80 \text{ kN/m}^2$ dapat memikul 14 lantai, q_{all} dengan kombinasi *crushed limestone* sebesar $1489,17 \text{ kN/m}^2$ dapat memikul 13 lantai, q_{all} dengan kombinasi *reclaimed asphalt pavement* sebesar $1231,83 \text{ kN/m}^2$ dapat memikul 11 lantai, q_{all} dengan kombinasi *recycled concrete aggregate* sebesar $1225,52 \text{ kN/m}^2$ dapat memikul 11 lantai, q_{all} dengan kombinasi *crushed stone* sebesar $991,67 \text{ kN/m}^2$ dapat memikul 9 lantai, dan q_{all} terkecil didapat dengan kombinasi *stone column* sebesar $863,52 \text{ kN/m}^2$ dapat memikul 8 lantai.
4. Berdasarkan hasil perhitungan, besarnya q_{all} menggunakan metode Meyerhof dan Hanna pada kondisi tanah asli di *boring log 1* sebesar $253,87 \text{ kN/m}^2$ dapat memikul 2 lantai. Semua material perkuatan tanah berhasil meningkatkan daya dukung fondasi dangkal hingga mampu memikul 4 lantai dengan tebal lapisan perkuatan (H) yang sama yaitu sebesar 0,7 meter. Nilai q_{all} terbesar didapat dengan kombinasi *reclaimed asphalt pavement* sebesar $403,47 \text{ kN/m}^2$, q_{all} dengan kombinasi *stone column* sebesar $401,05 \text{ kN/m}^2$, q_{all} dengan kombinasi *crushed brick* sebesar $400,48 \text{ kN/m}^2$, q_{all} dengan kombinasi *crushed stone* sebesar $394,73 \text{ kN/m}^2$, q_{all} dengan kombinasi *crushed limestone* sebesar $393,38 \text{ kN/m}^2$, dan q_{all} terkecil didapat dengan kombinasi *recycled concrete aggregate* sebesar $391,90 \text{ kN/m}^2$.
5. Berdasarkan hasil perhitungan, besarnya q_{all} menggunakan metode Meyerhof dan Hanna pada kondisi tanah asli di *boring log 2* sebesar $261,71 \text{ kN/m}^2$ dapat memikul 2 lantai. Semua material perkuatan tanah berhasil meningkatkan daya dukung fondasi dangkal hingga mampu memikul 4 lantai dengan tebal lapisan perkuatan (H) yang berbeda. Nilai q_{all} terbesar didapat dengan kombinasi *stone column* sebesar $395,19 \text{ kN/m}^2$ menggunakan H sebesar 0,9 meter, q_{all} dengan kombinasi *crushed stone* sebesar $392,10 \text{ kN/m}^2$ menggunakan H sebesar 0,9 meter, q_{all} dengan kombinasi *reclaimed asphalt pavement* sebesar $389,71 \text{ kN/m}^2$ menggunakan H sebesar 0,9 meter, q_{all} dengan kombinasi *crushed brick* sebesar $400,94 \text{ kN/m}^2$ menggunakan H sebesar 1 meter, q_{all} dengan kombinasi *crushed limestone* sebesar $400,84 \text{ kN/m}^2$ menggunakan H sebesar 1 meter, dan q_{all} terkecil didapat dengan kombinasi *recycled concrete aggregate* sebesar $388,72 \text{ kN/m}^2$ menggunakan H sebesar 1 meter.
6. Pada perhitungan daya dukung fondasi dangkal menggunakan metode Terzaghi, didapatkan bahwa semakin besar nilai sudut geser dalam (ϕ) dan berat jenis tanah (γ) dari material perkuatan yang digunakan maka nilai daya dukung fondasi dangkal akan semakin besar. Nilai sudut geser dalam (ϕ) dan berat jenis tanah (γ) yang semakin besar menunjukkan bahwa material tersebut mempunyai butiran yang beragam (*well graded*) sehingga terdapat butiran-butiran bergradasi halus, sedang hingga kasar yang mampu mengurangi banyaknya rongga-rongga kosong sehingga kepadatan material akan semakin meningkat.
7. Pada perhitungan daya dukung fondasi dangkal menggunakan metode Meyerhof dan Hanna, didapatkan bahwa semakin kuat material belum tentu berpengaruh untuk mendapatkan nilai daya dukung yang paling besar karena dipengaruhi dengan jenis dan konsistensi tanah yang berada dibawah lapisan perkuatan tersebut.

Saran

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat diberikan sebagai berikut:

1. Penelitian selanjutnya diharapkan agar memiliki parameter-parameter tanah seperti hasil uji laboratorium yang lengkap sehingga akan menambah keakuratan pada hasil analisis perhitungan.
2. Penelitian selanjutnya dapat menggunakan material-material perkuatan lainnya yang berjenis campuran batu dengan pasir yang mempunyai butiran beragam (*well graded*).
3. Penelitian selanjutnya diharapkan dapat menambahkan lebar lapis perkuatan di setiap kedalamannya dan mengkombinasikan material-material perkuatan tersebut agar dapat meningkatkan daya dukung fondasi dangkal.
4. Penelitian selanjutnya disarankan agar perhitungan daya dukung fondasi dangkal dapat menggunakan metode lainnya dan dibandingkan dengan program seperti MIDAS GTX NX dan sebagainya agar hasil analisis semakin akurat.

DAFTAR PUSTAKA

- Afshar, J. N., M. Ghazavi and K. Hemmati. "Analytical Method for Seismic Bearing Capacity of Stone Column Reinforced Shallow Foundations." *Geotechnical Engineering Commons* (2010): 1-6.
- Apriliani, N. F., M. A. Baqiya and Darminto. "Pengaruh Penambahan Larutan MgCl₂ pada Sintesis Kalsium Karbonat Presipitat Berbahan Dasar Batu Kapur dengan Metode Karbonasi ." *JURNAL SAINS DAN SENI ITS* (2012): 30 - 34.
- Arulrajah, A., et al. "Geotechnical and Geoenvironmental Properties of Recycled Construction and Demolition Materials in Pavement Subbase Applications." *Journal of Materials in Civil Engineering* (2012): 1 - 33.
- Arulrajah, A., et al. "Physical Properties and Shear Strength Responses of Recycled Construction and Demolition Materials in Unbound Pavement Base or Subbase Applications." *Construction and Building Materials* (2014): 245-257.
- Bai, X., X. Huang and W. Zhang. "Bearing Capacity of Square Footing Supported by a Geobelt-Reinforced Crushed Stone Cushion on Soft Soil." *Geotextiles and Geomembranes* (2013): 1-6.
- Black, J. A., et al. "Reinforced Stone Column In Weak Deposits: Laboratory model study." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* (2007): 1154 - 1161.
- Bowles, J. E. *Foundation Analysis And Design*. Singapore: McGraw-Hill, 1997.
- Bowles, J. E. *Foundation Analysis and Design 4th Edition*. McGraw-Hill, 1988.
- Chen, Q., M. A. Farsakh and R. Sharma. "Experimental and Analytical Studies of Reinforced Crushed Limestone." *Geotextiles and Geomembranes* (2009): 357 - 367.
- Das, B. M. *Principles Of Foundation Engineering Seventh Edition*. United States Of America: Global Engineering, 2011.
- Demir, A. and T. Sarici. "Bearing Capacity of Footing Supported by Geogrid Encased Stone Columns on Soft Soil." *Geomechanics and Engineering* (2017): 417 - 439.
- Dwiretnani, A. "Stabilisasi Tanah Lempung Menggunakan Kerikil Untuk Meningkatkan Daya Dukung (CBR) Di Laboratorium Sebagai Bahan Timbunan." *Jurnal Talenta Sipil* (2018): 41 - 49.
- Farsakh, M. A., et al. "Finite Element Parametric Study on the Performance of Strip Footings on Reinforced Crushed Limestone over Embankment Soil ." *EJGE* (2012): 723 - 742.
- Fathi, E. and R. Mohtasham. "Numerical Analysis of the Reinforced Stone Column by Geosynthetic on Stability of Embankment ." *Geotechnical Engineering* (2016): 1-8.
- Lindeburg Michael, R. *Civil Engineering Reference Manual for the PE Exam Fourteenth Edition*. Belmont: Professional Publications, Inc, 2014.
- Martini. "Analisis Daya Dukung Tanah Pondasi Dangkal Dengan Beberapa Metode." *MEKTEK* (2009): 75 - 87.
- McKelvey, D., et al. "Modelling Vibrated Stone Columns in Soft Clay." *Geotechnical Engineering* (2004): 137 - 149.
- Murthy, V. N. S. *Geotechnical Engineering: Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Singapore: CRC Press, 2002.
- Nicholson Peter, G. *Soil Improvement And Ground Modification Methods*. United State Of America: Elsevier Inc, 2015.
- Nusantara, M. A. "Analisa Daya Dukung Pondasi Dangkal Pada Tanah Lempung Menggunakan Perkuatan Anyaman Bambu dan Grid Bambu dengan Bantuan Program Plaxis." *Jurnal Teknik Sipil dan Lingkungan* (2014): 364 - 372.
- Palar, H., et al. "Pengaruh Pencampuran Tras dan Kapur pada Lempung Ekspansif Terhadap Nilai Daya Dukung." *Jurnal Sipil Statik* (2013): 390 - 399.
- Ridwan, M. and S. Sari. "Analisis Penambahan Serbuk Batu Gamping Terhadap Nilai Daya Dukung Fondasi Dangkal Pada Tanah Lempung Ekspansif." *Rekayasa Teknik Sipil Vol. 02* (2016): 109-117.
- Sihombing, I. H. S. M. "Studi Parameter Perencanaan Stone Column Untuk Perbaikan Bearing Capacity dan Settlement Pada Tanah Lempung." *Jurnal Rekayasa Perencanaan* (2013): 1-6.