



Terbit *online* pada laman web jurnal :  
<https://ejournal.sttp-yds.ac.id/index.php/js/index>

**SAINSTEK**  
(e-Journal)

| ISSN (Print) 2337-6910 | ISSN (Online) 2460-1039 |



## Perbaikan Tanah Lempung Dengan Metode Kolom Konfigurasi Segitiga dari Campuran *Fly Ash* dan *Bottom Ash*

Rafiki Aziz<sup>a</sup>, Muhardi<sup>b</sup>, Agus Ika Putra<sup>c</sup>

<sup>a, b, c</sup> Jurusan Teknik Sipil Universitas Riau, Tampan, Pekanbaru 28292, Indonesia

### INFORMASI ARTIKEL

#### Sejarah Artikel:

Diterima Redaksi: 15 April 2021

Revisi Akhir: 29 Juni 2022

Diterbitkan *Online*: 30 Juni 2022

### KATA KUNCI

*Stone Column*

Abu Batubara

Daya Dukung

L/D Ratio

Timbunan Pasir

### KORESPONDENSI

Telepon: +62 821-7278-4452

E-mail: [rafiki.aziz@student.unri.ac.id](mailto:rafiki.aziz@student.unri.ac.id)

### A B S T R A C T

Kondisi tanah di provinsi Riau adalah tanah lunak berupa lempung, lanau dan gambut. Tanah lunak umumnya memiliki daya dukung yang rendah dan kompresibilitas yang tinggi. Penggunaan *stone column* adalah salah satu metode perbaikan tanah yang dapat dilakukan. Penelitian terdahulu menunjukkan pemberian lapisan timbunan pasir di atas *stone column* dapat memperbaiki kriteria kegagalan *bulge* kolom dan berkontribusi memberikan kekuatan dan mengurangi beban yang diterima oleh kolom pada bagian atas ataupun dasar. Pada penelitian ini material kolom diganti dengan campuran *fly ash* dan *bottom ash*, dan rasio panjang kolom serta tinggi lapisan timbunan pasir divariasikan. Perbandingan *fly ash* dan *bottom ash* yang digunakan 40% *fly ash* + 60% *bottom ash*. Rasio panjang kolom terhadap diameternya (L/D) yang digunakan adalah 2, 3 dan 4 dengan diameter kolom 5 cm. Tinggi lapisan timbunan pasir divariasikan 2 dan 4 cm. Kolom-kolom dipasang dengan pola segitiga. Tanah lempung asli tanpa kekuatan dan dengan kekuatan kolom dibebani menggunakan *hydraulic jack* dan dilihat peningkatan daya dukung serta reduksi penurunan yang terjadi. Hasil uji pembebanan menunjukkan semakin besar rasio panjang kolom dan tebal lapisan timbunan pasir maka daya dukung tanah dan reduksi penurunan tanah akan semakin meningkat. Daya dukung dan reduksi penurunan maksimum diberikan oleh kolom L/D 4 dan tinggi lapisan timbunan pasir 4 cm dengan rasio peningkatan daya dukung sebesar 1,74 atau naik sekitar 74% dan rasio reduksi penurunan hingga 0,30 atau berkurang sekitar 70%. Hasil analisis teoritis menunjukkan kecenderungan yang berbeda.

## 1. PENDAHULUAN

Pertambahan penduduk dan perkembangan industri yang masih terus berlanjut di provinsi Riau meningkatkan kebutuhan terhadap fasilitas bangunan serta jalan. Sementara kondisi tanah di provinsi Riau adalah tanah lunak berupa lempung, lanau dan gambut yang umumnya memiliki daya dukung rendah dan kompresibilitas tinggi yang cenderung memiliki potensi penurunan yang besar

dan kelongsoran terhadap konstruksi di atasnya. Namun, semakin terbatasnya lahan yang tersedia di provinsi Riau memaksa pembangunan dilakukan di atas tanah lunak.

Penggunaan *stone column* adalah salah satu metode perbaikan tanah yang dapat dilakukan. *Stone column* adalah upaya penggantian sebagian dasar dengan kolom vertikal yang dipadatkan di dalam tanah. Kolom-kolom vertikal dapat berupa kerikil lepas yang tidak diikat oleh bahan pengikat semen atau lainnya. Beberapa keuntungan dari penggunaan *stone column* yaitu mempercepat

penurunan akibat konsolidasi, mengurangi penurunan total dan tidak seragam serta memperkecil potensi likuefaksi (Bachus & Barksdale, 1983)

Rasio panjang kolom terhadap diameternya ( $L/D$ ) yang semakin besar akan meningkatkan daya dukung serta kekakuan tanah secara signifikan. Namun peningkatan daya dukung berhenti pada rasio  $L/D$  tertentu walaupun kekakuan masih dapat meningkat. Kekakuan pada kolom yang lebih panjang lebih efisien dalam mengendalikan penurunan (Najjar, 2013)

Kegagalan kolom akibat *bulging* umumnya disebabkan oleh tingginya konsentrasi tegangan di atas kolom dapat secara signifikan dipengaruhi oleh lapisan timbunan pasir. Interaksi tegangan geser antara kolom dan tanah sekelilingnya dapat dimodifikasi melalui tekanan overburden dari lapisan timbunan pasir yang akan membantu penyaluran tegangan dari tanah ke kolom. Hal ini menunjukkan pentingnya memberi lapisan timbunan pasir di atas tanah dengan perkuatan kolom. Lapisan timbunan dengan ketebalan yang cukup juga sedikit berkontribusi memberikan perkuatan dan mengurangi beban yang diterima oleh kolom pada bagian atas ataupun dasar (Shahu, Madhav, & Hayashi, 2000). Pemberian lapisan timbunan pasir di atas kolom juga dapat mengurangi diameter *bulge* dan memperdalam lokasi *bulge* menjauhi bagian atas kolom (Deb, Samadhiya, & Namdeo, 2011).

Dewasa ini dalam bidang geoteknik abu batu bara yang memiliki sifat *pozzolanic* mulai dimanfaatkan sebagai *stabilizing agent* yang mampu memperbaiki sifat tanah. Penelitian oleh (Putri, Muhandi, & Fatnanta, 2017) memanfaatkan abu batu bara sebagai bahan utama dalam pembuatan *stone column* untuk stabilisasi di tanah gambut.

## 2. TINJAUAN PUSTAKA

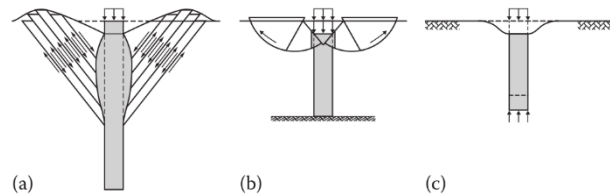
### 2.1. Stone Column

*Stone Column* adalah kolom-kolom vertikal dari material lepas granular yang dipadatkan di dalam tanah tanpa ditambah bahan pengikat semen atau yang lainnya. Material granular berupa kerikil, pasir, kapur, atau campuran kapur dengan bahan *additive* lain juga dapat digunakan sebagai material pembuat kolom. *Stone column* biasa digunakan untuk memperbaiki tanah lempung lunak.

Kolom-kolom dipasang berkelompok di dalam tanah lunak untuk meningkatkan kuat geser tanah, meningkatkan kepadatan tanah, mengurangi penurunan tanah, mengurangi potensi likuefaksi, dan dapat meningkatkan stabilitas lereng.

#### 2.1.1. Mekanisme Kegagalan Stone Column

*Stone column* dapat berupa kolom *end bearing* maupun sebagai kolom *floating*. Umumnya kolom dibuat sebagai kolom *end bearing*. Ada beberapa tipe keruntuhan yang dapat terjadi pada kolom, tergantung pada jenis kolom tersebut. Gambar 1 menjelaskan tentang berbagai macam tipe keruntuhan kolom tunggal yang ditanam di lapisan tanah homogen.



Gambar 1. Mekanisme Keruntuhan *Stone Column* Tunggal di Lapisan Tanah Homogen, (a) *Bulging*, (b) *Shearing* dan (c) *Punching Failure by Sinking*

Sumber: Kirsch, 2017

#### 2.1.2. Rasio Panjang Kolom ( $L/D$ )

Rasio panjang kolom terhadap diameternya ( $L/D$ ) merupakan faktor penting dalam desain *stone column*. Rasio  $L/D$  yang semakin besar akan meningkatkan daya dukung serta kekakuan tanah secara signifikan. Namun ketika rasio  $L/D$  tertentu dicapai, tidak ada peningkatan daya dukung yang signifikan terjadi. Dalam beberapa penelitian menunjukkan rasio  $L/D$  optimal bervariasi antara 5 sampai 8 (Hugher & Withers, 1974) (Rao, Prasad, & Rao, 1992) (McKelvey, Sivakumar, Bell, & Graham, 2004) (Sivakumar, Jeludine, Bell, Glynn, & Mackinnon, 2011). Sementara (Wood, Hu, & Nash, 2000) menunjukkan rasio  $L/D$  optimal bergantung pada *area replacement ratio* dan parameter-parameter material kolom serta tanah seperti kekakuan, kekuatan dan kerapatannya.

(Najjar, 2013) menyatakan bahwa walaupun daya dukung tidak menunjukkan peningkatan apabila panjang kolom melebihi rasio  $L/D$  optimal, kekakuan tanah yang distabilisasi masih dapat meningkat. Kekakuan pada kolom yang lebih panjang lebih efisien dalam mengendalikan penurunan tanah.

#### 2.1.3. Lapisan Timbunan Pasir

Secara umum lapisan pasir diberikan di atas *stone column* untuk mendistribusikan tekanan secara merata dan menyediakan jalur untuk drainase (Mitchell, 1981). Lapisan timbunan pasir secara signifikan mempengaruhi tegangan yang terjadi di atas tanah yang diperkuat. Interaksi tegangan geser antara kolom dan tanah sekelilingnya dapat dimodifikasi melalui tekanan overburden dari lapisan timbunan pasir yang akan membantu penyaluran tegangan dari tanah ke kolom. Lapisan timbunan dengan ketebalan yang cukup juga sedikit berkontribusi memberikan perkuatan dan

mengurangi beban yang diterima oleh kolom pada bagian atas ataupun dasar (Shahu, Madhav, & Hayashi, 2000). (Deb K. , 2008) melalui pemodelan mekanisnya membuktikan pemberian lapisan pasir di atas tanah yang diperkuat *stone column* dapat mengurangi konsentrasi tegangan pada bagian atas kolom. Lapisan pasir juga membantu mengurangi penurunan tidak seragam dan penurunan maksimumnya, serta meningkatkan kapasitas dari tanah yang diperkuat kolom. Selanjutnya melalui percobaan laboratorium (Deb, Samadhiya, & Namdeo, 2011) menyatakan bahwa lapisan pasir di atas kolom juga dapat mengurangi diameter *bulge* dan memperdalam lokasi *bulge* menjauhi bagian atas kolom. Penelitian (Ambily & Gandhi, 2006) menyatakan bahwa jenis pembebanan terhadap tanah dengan perkuatan kolom berpengaruh terhadap perilaku konsentrasi tegangan. Pembebanan kaku menunjukkan pengurangan konsentrasi tegangan tidak terlalu berpengaruh secara signifikan sedangkan pada pembebanan lentur menunjukkan pengurangan yang signifikan.

**2.2. Daya Dukung Stone Column Berdasarkan Hasil Pengujian**

**2.2.1. Bearing Improvement Ratio**

Kenaikan kapasitas daya dukung akibat adanya kolom ditampilkan sebagai rasio yang disebut *bearing improvement ratio* (BIR) (El-Garhy, Maraie, & Youssef, 2011). Rasio ini ditentukan oleh daya dukung pada tanah tanpa perkuatan terhadap daya dukung tanah dengan perkuatan pada penurunan yang sama. Penurunan yang diambil adalah pada 10 mm dan 25 mm, yang merupakan daya dukung izin dan daya dukung ultimit secara berurut. Nilai ini dianggap dapat diterima oleh (Bowles, 2001). Nilai BIR dapat dihitung dengan persamaan di bawah ini

$$BIR = \frac{q_t}{q_{unt}} \tag{1}$$

Dengan  $q_t$  adalah daya dukung tanah dengan perkuatan dan  $q_{unt}$  adalah daya dukung tanah tanpa perkuatan.

**2.2.2. Settlement Reduction Ratio**

Pengaruh pemasangan kolom terhadap penurunan tanah dapat ditentukan dengan rasio reduksi penurunan (*settlement reduction ratio*). *Settlement reduction ratio* (SRR) dapat ditentukan dengan persamaan berikut (Bergado, Alfaro, & Chai, 1991).

$$SRR = \frac{S_t}{S_{unt}} \tag{2}$$

$S_{unt}$  adalah penurunan tanah tanpa perkuatan dan  $S_t$  adalah penurunan tanah dengan perkuatan pada daya dukung yang sama. Maksudnya adalah besar penurunan yang diamati adalah pada daya dukung yang sama dengan besar daya dukung ultimit tanah tanpa perkuatan (pada penurunan 25 mm).

**2.3. Daya Dukung Stone Column Teoritis**

Daya dukung ultimit dari hasil pengujian perlu diverifikasi melalui perhitungan daya dukung secara teoritis.

Analitis teoritis daya dukung *stone column* dalam penelitian ini diperoleh dari gabungan kapasitas daya dukung kolom dan tanah di sekitar kolom. Daya dukung tanah di sekitar kolom didapatkan dari Persamaan (3) oleh (Meyerhof & Hanna, 1978). Sedangkan untuk daya dukung yang diberikan kolom dianalisis melalui 2 cara, yaitu analisis kolom tunggal dan kolom grup.

**2.3.1. Daya Dukung Tanah Dasar**

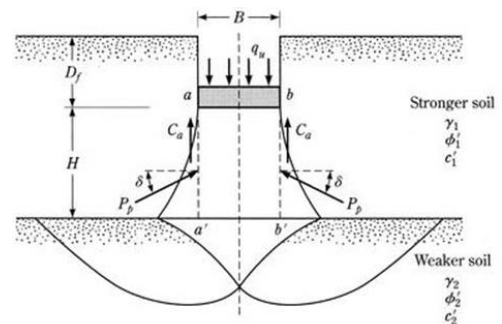
Daya dukung tanah dasar dihitung melalui pendekatan daya dukung dari sebuah fondasi dangkal. (Meyerhof & Hanna, 1978) memberikan teori yang dapat menghitung kapasitas daya dukung fondasi dangkal dengan kondisi tanah yang berlapis seperti pada Gambar 2.

Berikut persamaan yang diberikan oleh (Meyerhof & Hanna, 1978) untuk menghitung kapasitas daya dukung fondasi dangkal dengan lapisan tanah lunak di bawah tanah keras.

$$q_{ult(c)} = q_b + \left(\frac{2c_a H}{B}\right) + \gamma_1 H^2 \left(1 + \frac{2D_f}{H}\right) \left(\frac{K_s \tan \phi_1}{B}\right) - \gamma_1 H \tag{3}$$

Dengan :

- $q_b$  : Kapasitas Daya Dukung Lapisan Bawah
- $C_a$  : Gaya adhesi sepanjang  $aa'$ ,  $bb'$
- $K_s$  : Koefisien *punching shear*



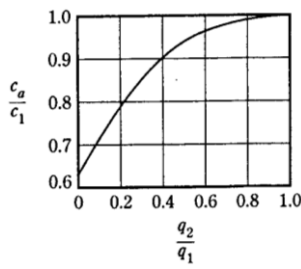
Gambar 2. Ilustrasi Keruntuhan Tanah di Bawah Fondasi Dangkal

Sumber: Meyerhof & Hanna, 1978

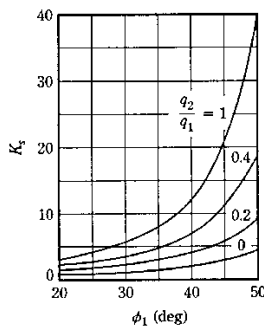
Nilai  $q_b$  didapat melalui Persamaan (4). Nilai  $C_a$  dan  $K_s$  diambil dari grafik pada Gambar 3 dan Gambar 4, dengan menggunakan nilai  $q_2/q_1$  dari Persamaan (5). Nilai  $N_c$ ,  $N_q$  dan  $N_\gamma$  adalah faktor daya dukung tanah menurut (Meyerhof & Hanna, 1978).

$$q_b = c_2 N_{c(2)} + \gamma_1 (D_f + H) N_{q(2)} + \frac{1}{2} \gamma_2 B N_{\gamma(2)} \tag{4}$$

$$\frac{q_2}{q_1} = \frac{c_2 N_{c(2)} + \frac{1}{2} \gamma_2 B N_{\gamma(2)}}{c_1 N_{c(1)} + \frac{1}{2} \gamma_1 B N_{\gamma(1)}} \tag{5}$$



Gambar 3. Grafik Nilai  $c_a$   
 Sumber: Meyerhof & Hanna, 1978



Gambar 4. Grafik Nilai  $K_s$   
 Sumber: Meyerhof & Hanna, 1978

2.3.2. Metode Kolom Tunggal

Kolom pada umumnya dibuat dengan rasio panjang terhadap diameter lebih dari 4-6 yang menyebabkan kegagalan yang terjadi adalah kegagalan *bulging*. *Bulging* biasanya terjadi di kedalaman 2-3 diameter kolom dari permukaan tanah. Analisis daya dukung kolom menggunakan asumsi tegangan pada kondisi triaksial terjadi pada kolom dan baik pada kolom maupun tanah di sekelilingnya dalam keadaan runtuh.

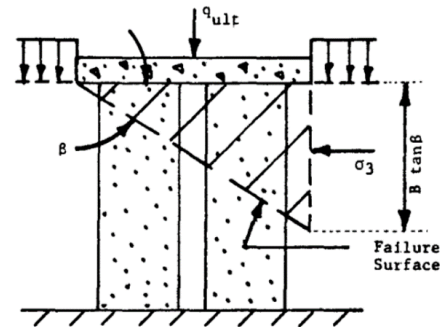
Daya dukung ultimit *stone column* grup didapat dari daya dukung kolom tunggal dikalikan dengan jumlah kolom di dalam grup. (Hugher & Withers, 1974) memberikan persamaan daya dukung dari sebuah *stone column* tunggal sebagai berikut:

$$q_{ult} = \left\{ \sigma_{ro} + c \left( 1 + \log_e \frac{E_c}{2c(1+\nu)} \right) \right\} \left( \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s} \right) \quad (6)$$

Dengan :

- $q_{ult}$  = Tegangan ultimit yang dapat diterima kolom
- $c$  = Kuat geser *undrained* dari tanah yang mengelilingi kolom
- $E_c$  = Modulus elastisitas tanah
- $\sigma_{ro}$  = Total tegangan lateral di bagian keruntuhan kolom
- $\nu$  = Angka *Poisson's Rasio*
- $E_c$  =  $5c$  Nilai modulus elastisitas dapat diperoleh dengan pendekatan (Bachus & Barksdale, 1983).

2.3.3. Metode Kolom Grup



Gambar 5. Skema Keruntuhan Kolom Grup  
 Sumber: Bachus & Barksdale, 1983

Daya dukung ultimit kolom grup dapat ditentukan dengan memperkirakan suatu bidang keruntuhan terbentuk oleh dua garis keruntuhan yang lurus.

Asumsi bahwa tanah di bawah fondasi langsung gagal pada suatu bidang keruntuhan yang lurus membentuk blok segitiga sebagai blok keruntuhan. Tahanan geser rerata dari tanah komposit (tanah dan kolom) akan terbentuk pada bidang keruntuhan tersebut. Tegangan ultimit ( $q_{ult}$ ) yang dapat ditahan oleh tanah komposit tergantung pada tahanan ultimit lateral ( $\sigma_3$ ) pasif dari blok keruntuhan yang bergerak dan tahanan geser komposit yang terbentuk pada sepanjang bidang keruntuhan yang miring. Gambar 5 menunjukkan skema keruntuhan kolom grup untuk pola segi empat dengan beban fondasi persegi di atasnya.

Berdasarkan pertimbangan keseimbangan blok keruntuhan, parameter kuat geser rerata pada blok keruntuhan adalah :

$$\tan \phi_{avg} = \mu_s \times a_s \times \tan \phi_s \quad (7)$$

$$\phi_{avg} = \tan^{-1} (\mu_s \times a_s \times \tan \phi_s) \quad (8)$$

$$c_{avg} = (1 - a_s) \times c \quad (9)$$

Dengan :

$\tan \Phi_{avg}$  = Tangen dari sudut gesek internal komposit pada bidang geser di bawah fondasi

$c_{avg}$  = Kohesi komposit pada bidang geser di bawah fondasi

Bidang keruntuhan membentuk sudut  $\beta$  terhadap fondasi, dengan  $\beta$  untuk tanah komposit adalah :

$$\beta = 45 + \frac{\Phi_{avg}}{2} \quad (10)$$

Tegangan lateral ultimit  $\sigma_3$  terlebih dulu dihitung agar dapat menentukan daya dukung ultimit kolom grup yang dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\sigma_3 = \frac{\gamma_c B \tan \beta}{2} + 2c$$

Daya dukung ultimit dari blok keruntuhan adalah :

$$q_{ult} = \sigma_3 \tan^2 \beta + 2 c_{avg} \beta \quad (11)$$

### 3. METODOLOGI

Sampel tanah berasal dari Kelurahan Muara Fajar, Kota Pekanbaru. Sampel pasir yang digunakan berasal dari Laboratorium Mekanika Tanah. Sampel pasir tersebut sudah diuji saringan dengan ukuran lolos ayakan No. 4. Sampel abu batu bara (*fly ash* dan *bottom ash*) berasal dari PT. Indah Kiat *Pulp and Paper* Tbk Perawang, Kabupaten Siak dengan perbandingan berat 40:60.

#### 3.1. Variasi Sampel

Pada penelitian ini kolom disusun dengan pola segitiga. Spasi antar as ke as kolom dan diameter yang digunakan adalah tetap, dengan diameter (D) 5 cm dan spasi as ke as kolom 10 cm (2D). Tinggi kolom dan ketebalan timbunan pasir divariasikan. Variasi sampel selengkapnya terdapat pada Tabel 1.

Tabel 1. Variasi Sampel Pengujian dan Penamaannya

No.	Tinggi Kolom, L (cm)	Rasio Tinggi Kolom, L/D	Tinggi Timbunan Pasir (cm)	Nama Sampel
1	-	-	-	TK+TP
2	10	2	-	2K+TP
3	15	3	-	3K+TP
4	20	4	-	4K+TP
5	-	-	2	TK+2P
6	10	2	2	2K+2P
7	15	3	2	3K+2P
8	20	4	2	4K+2P
9	-	-	4	TK+4P
10	10	2	4	2K+4P
11	15	3	4	3K+4P
12	20	4	4	4K+4P

Variasi kolom diberi kode K dan variasi timbunan pasir diberi kode P. Untuk kolom penamaan variasi tinggi diberi kode dari rasio panjang kolom (L/D), yaitu perbandingan antara tinggi kolom (L) terhadap diameter kolom (D). Variasi tinggi timbunan langsung diberi angka sesuai tinggi timbunan yang digunakan. Variasi tanpa kolom atau timbunan pasir diberi kode T (Tanpa).

#### 3.2. Persiapan Sampel

Sampel tanah yang telah diuji di laboratorium yang telah diuji propertis dan sesuai untuk pengujian dimasukkan ke dalam bak pengujian. Bak pengujian diisi hingga elevasi 0,4 m dari dasar bak.

Sampel dimasukkan secara bertahap ke dalam bak uji. Tiap lapisan yang telah dimasukkan diuji kuat gesernya, sehingga di semua lapisan sampel di bak, nilai kuat gesernya dapat dikontrol. Nilai kuat rencana yang dipilih adalah 1 – 3 kPa. Setelah ketinggian tanah mencapai 0,4 m, tanah diratakan dengan menggunakan kayu dan papan multipleks hingga benar-benar rata dari ujung ke ujung sebelum kolom bisa dipasang.

Material kolom terbuat dari campuran *fly ash* dan *bottom ash* dengan perbandingan berat 40:60. *Fly ash* dan *bottom ash* yang digunakan dalam kondisi kering.



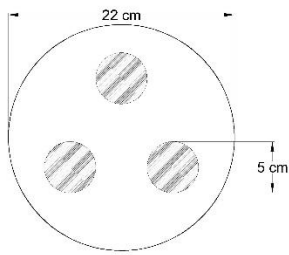
Gambar 6. Kolom Campuran *Fly Ash* dan *Bottom Ash*  
Pemasangan kolom dilakukan dalam beberapa tahapan sebagai berikut :

1. Meletakkan papan yang telah diberi lubang lingkaran sesuai ukuran, jarak dan konfigurasi kolom rencana di atas tanah yang telah diratakan untuk memudahkan proses mengebor tanah
2. Mengebor tanah dengan bor yang memiliki ukuran mata bor sesuai diameter kolom. Proses pengeboran dilakukan sedikit demi sedikit agar kedalaman sesuai rencana
3. Mengukur kedalaman lubang dengan kayu yang telah diberi tanda. Apabila telah sesuai, proses pengeboran dilanjutkan ke lubang selanjutnya
4. Setelah semua lubang kolom selesai dilanjutkan dengan memasang kolom campuran kolom *fly ash* dan *bottom ash* yang telah dipersiapkan sebelumnya. Kolom dipadatkan dengan metode kering tanpa penambahan air dalam beberapa lapisan. Kolom yang telah dipadatkan dapat dilihat pada Gambar 6.

Setelah semua kolom terpasang, kolom diperam selama 1 hari untuk kemudian dilakukan uji pembebanan keesokan harinya. Untuk variasi dengan timbunan pasir di atas kolom, pasir dipasang pada saat sebelum pembebanan yang dilakukan setelah pemeraman kolom. Timbunan pasir dipadatkan per 1 cm lapisan. Pasir dipadatkan dengan kadar air yang telah ditentukan dari pemadatan proktor pada derajat kepadatan 96%.

#### 3.3. Metode Uji Pembebanan

Pemberian beban menggunakan *hydraulic jack* melalui plat pembebanan berbentuk lingkaran dengan diameter 22 cm. Piston *hydraulic jack* diletakkan tepat di atas titik berat plat. Posisi plat pembebanan terhadap susunan kolom dapat dilihat pada Gambar 7. Beban yang terjadi dihitung melalui *proving ring*, sedangkan penurunan dihitung melalui *dial gauge* yang dipasang di atas plat. Beban berupa tekanan yang diberikan dari *hydraulic jack* secara terus menerus dengan mengatur kecepatan penetrasi yang konstan. Beban yang dibutuhkan untuk mencapai penetrasi 1 mm dicatat. Pengujian dilakukan sampai penetrasi plat 50 mm. Proses pembebanan dapat dilihat pada Gambar 8.



Gambar 7. Posisi Plat Pembebanan Terhadap Susunan Kolom



Gambar 8. Pengujian Pembebanan

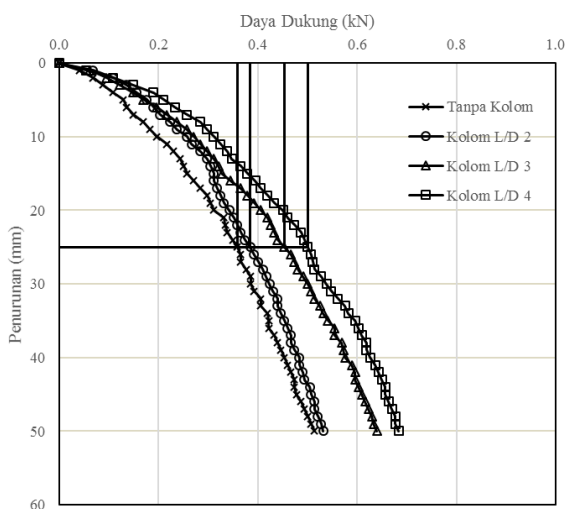
#### 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

##### 4.1. Hasil Uji Pembebanan

Data penurunan dan beban dari hasil pengujian dianalisis menggunakan metode penurunan 25 mm untuk mendapatkan daya dukung ultimit setiap variasi sampel. Gambar 9 sampai Gambar 11 menampilkan cara menentukan daya dukung ultimit.

##### 4.1.1. Daya Dukung Tanpa Timbunan

Hasil pengujian sampel tanpa timbunan diplotkan ke dalam grafik penurunan vs daya dukung seperti yang terlihat pada Gambar 9 di bawah ini.

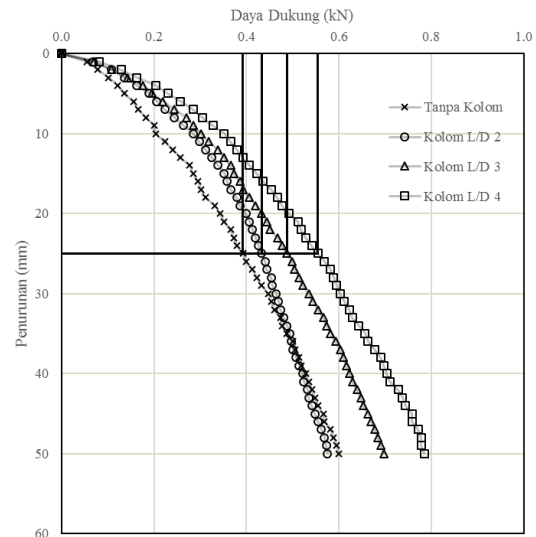


Gambar 9. Grafik Analisis Daya Dukung Ultimit Variasi Tanpa Timbunan Pasir

Besaran daya dukung yang bersesuaian dengan titik pertemuan garis penurunan 25 mm dan grafik ditandai sebagai daya dukung ultimit sampel.

##### 4.1.2. Daya Dukung dengan Timbunan 2 cm

Hasil pengujian sampel dengan timbunan 2 cm diplotkan ke dalam grafik penurunan vs daya dukung seperti yang terlihat pada Gambar 10 di bawah ini.

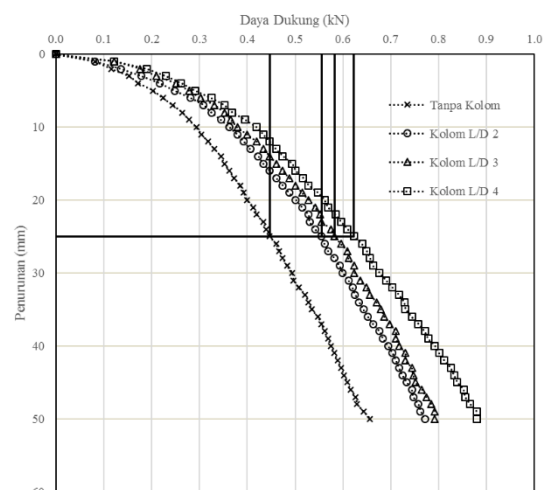


Gambar 10. Grafik Analisis Daya Dukung Ultimit Variasi Timbunan Pasir 2 cm

Besaran daya dukung yang bersesuaian dengan titik pertemuan garis penurunan 25 mm dan grafik ditandai sebagai daya dukung ultimit sampel.

##### 4.1.3. Daya Dukung dengan Timbunan 4 cm

Hasil pengujian sampel dengan timbunan 4 cm diplotkan ke dalam grafik penurunan vs daya dukung seperti yang terlihat pada Gambar 11 di bawah ini.



Gambar 11. Grafik Analisis Daya Dukung Ultimit Variasi Timbunan Pasir 4 cm

Besaran daya dukung yang bersesuaian dengan titik pertemuan garis penurunan 25 mm dan grafik ditandai sebagai daya dukung ultimit sampel.

4.1.4. Analisis Daya Dukung Ultimit

Tabel 2. Rekapitulasi Daya Dukung Ultimit Kolom Hasil Uji Pembebanan

No.	Variasi Sampel	Daya Dukung Ultimit (kN)
1	TK+TP	0,359
2	2K+TP	0,384
3	3K+TP	0,453
4	4K+TP	0,501
5	TK+2P	0,392
6	2K+2P	0,433
7	3K+2P	0,487
8	4K+2P	0,555
9	TK+4P	0,447
10	2K+4P	0,555
11	3K+4P	0,582
12	4K+4P	0,623

Berikut contoh perhitungan BIR untuk sampel 2K+TP . Berdasarkan Tabel 2 dapat dilihat nilai  $q_{unt}$  adalah 0,359 kN dan nilai  $q_t$  untuk adalah 0,384 kN sehingga perhitungan nilai BIR adalah sebagai berikut

$$BIR = \frac{0,384}{0,359} = 1,07$$

Selengkapnya nilai *bearing improvement ratio* (BIR) untuk semua variasi dalam penelitian ini ditampilkan pada Tabel 3.

Tabel 3. *Bearing Improvement Ratio*

No.	Nama Sampel	Rasio Tinggi Kolom, L/D	Tinggi Timbunan Pasir (cm)	Daya Dukung Ultimit, $q_t$ (kN)	<i>Bearing Improvement Ratio</i> (BIR)
1	2K+TP	2	-	0,384	1,07
2	3K+TP	3	-	0,453	1,26
3	4K+TP	4	-	0,501	1,40
4	TK+2P	-	2	0,392	1,09
5	2K+2P	2	2	0,433	1,21
6	3K+2P	3	2	0,487	1,36
7	4K+2P	4	2	0,555	1,55
8	TK+4P	-	4	0,447	1,25
9	2K+4P	2	4	0,555	1,55
10	3K+4P	3	4	0,582	1,62
11	4K+4P	4	4	0,623	1,74

Berikut contoh perhitungan SRR untuk sampel 2K+TP. Nilai  $S_t$  untuk variasi sampel adalah 22 mm dan nilai  $S_{unt}$  pada tanah asli adalah 25 mm sehingga nilai SRR sampel 2K+TP adalah sebagai berikut

$$SRR = \frac{22}{25} = 0,88$$

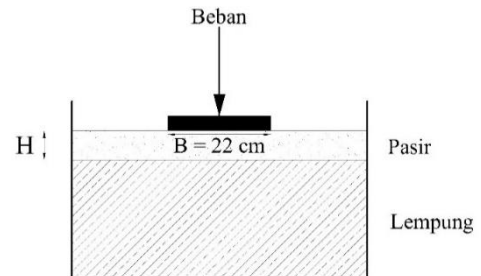
Tabel 4. *Settlement Reduction Ratio*

No.	Nama Sampel	Rasio Tinggi Kolom, L/D	Tinggi Timbunan Pasir (cm)	Penurunan Tanah dengan Perkuatan, $S_t$ (mm)	<i>Settlement Reduction Ratio</i> (SRR)
1	2K+TP	2	-	22,0	0,88
2	3K+TP	3	-	16,7	0,67
3	4K+TP	4	-	13,6	0,54
4	TK+2P	-	2	21,5	0,86
5	2K+2P	2	2	16,0	0,64
6	3K+2P	3	2	13,5	0,54
7	4K+2P	4	2	10,5	0,42
8	TK+4P	-	4	15,6	0,63
9	2K+4P	2	4	9,8	0,39
10	3K+4P	3	4	8,5	0,34
11	4K+4P	4	4	7,4	0,30

4.2. Daya Dukung Teoritis

4.2.1. Daya Dukung Tanah Dasar

Perhitungan tanah dasar dihitung dengan asumsi sebagai fondasi dangkal yang dibebani melalui plat lingkaran dengan diameter (B) 0,22 m. Sketsa model perhitungan tanah dasar ditampilkan seperti pada Gambar 12. Data tanah disajikan pada Tabel 5.



Gambar 12. Sketsa Perhitungan Tanah Dasar Tabel 5. Data Tanah

Simbol	Pasir (1)	Lempung (2)	Satuan
$\phi$	29	0	°
$\gamma$	16,68	16,41	kN/m <sup>3</sup>
c ( $S_u$ )	7,49	1,87	kN/m <sup>2</sup>
$N_c$	32,67	5,14	
$N_q$	18,40	1	
$N_\gamma$	25,99	0	

Nilai  $N_c$ ,  $N_q$  dan  $N_g$  adalah nilai faktor daya dukung menurut (Meyerhof & Hanna, 1978) berdasarkan sudut geser internal masing-masing tanah. Contoh perhitungan daya dukung tanah untuk sampel tanpa kolom dengan timbunan (H) 4 cm (TK+4P) sebagai berikut :

1. Perhitungan nilai  $K_s$  dan  $c_a$

$$q_2 = \frac{c_2 N_{c(2)} + \frac{1}{2} \gamma_2 B N_{\gamma(2)}}{c_1 N_{c(1)} + \frac{1}{2} \gamma_1 B N_{\gamma(1)}}$$

$$q_2 = \frac{1,87 \cdot 5,14 + 0,5 \cdot 16,41 \cdot 0,22 \cdot 0}{7,49 \cdot 32,67 + 0,5 \cdot 16,68 \cdot 0,22 \cdot 25,99}$$

$$\frac{q_2}{q_1} = 0,03$$

Hasil  $q_2/q_1$  dan sudut geser pasir diplotkan ke grafik Pada Gambar 4 untuk mendapatkan nilai  $K_s$ . Sehingga didapat nilai  $K_s = 1$

Hasil  $q_2/q_1$  juga digunakan untuk mendapatkan nilai  $c_a$ . Nilai  $q_2/q_1$  diplotkan ke grafik pada Gambar 3 untuk mendapatkan nilai  $c_a/c_1$ .

$$\frac{c_a}{c_1} = 0,63$$

$$c_a = 7,49 \times 0,63$$

$$c_a = 4,72$$

2. Perhitungan nilai  $q_b$

$$q_b = c_2 N_{c(2)} + \gamma_1 (d_f + H) N_{q(2)} + \frac{1}{2} \gamma_2 B N_{\gamma(2)}$$

$$q_b = 1,87 \cdot 5,14 + 16,68 (0 + 0,04) + 0,5 \cdot 16,41 \cdot 0,22 \cdot 0$$

$$q_b = 10,28 \text{ kN/m}^2$$

3. Perhitungan nilai  $q_{ult}$

$$q_{ult(c)} = q_b + \left(\frac{2c_u H}{B}\right) + \gamma_1 H^2 \left(1 + \frac{2D_f}{H}\right) \left(\frac{K_s \tan \phi_1}{B}\right) - \gamma_1 H$$

$$q_{ult(c)} = 10,28 + \left(\frac{2 \cdot 4,72 \cdot 0,04}{0,22}\right) + 16,68 \cdot 0,04^2 \left(1 + \frac{2 \cdot 0}{0,04}\right) \left(\frac{1 \cdot \tan(29)}{0,22}\right) - 16,68 \cdot 0,04$$

$$q_{ult(c)} = 11,39 \text{ kN/m}^2$$

Untuk hasil perhitungan daya dukung tanah dasar selengkapnya dapat dilihat pada Tabel 6.

Tabel 6. Daya Dukung Tanah Dasar

Tinggi Timbunan Pasir (m)	$K_s$	$q_b$ (kN/m <sup>2</sup> )	$q_{ult(c)}$ (kN/m <sup>2</sup> )
0	1	9,61	9,61
0,02	1	9,94	10,48
0,04	1	10,28	11,39

4.2.2. Analisis Kolom Tunggal

Berikut contoh analisis daya dukung kolom tunggal pada sampel kolom L/D 4 dan timbunan pasir 4 cm (4K+4P).

Data perhitungan :

- Diameter kolom (D) : 0,05 m
- Jarak kolom (s) : 0,1 m
- Panjang kolom (L) : 0,2 m
- Luas kolom ( $A_s$ ) : 0,002 m<sup>2</sup>
- Jumlah kolom dalam grup : 3 buah
- Sudut geser internal kolom ( $\phi_s$ ) : 6,52 °
- Kohesi tanah (c) : 1,87 kN/m<sup>2</sup>
- Modulus elastisitas tanah ( $E_c$ ) : 5c = 9,35 kN/m<sup>2</sup>
- $C_1$  : 0,907 (untuk pola segitiga)

1. Area replacement ratio kolom unit sel

$$a_s = C_1 \times \left(\frac{D}{s}\right)^2$$

$$a_s = 0,907 \times \left(\frac{0,05}{0,1}\right)^2 = 0,227$$

2. Luas unit sel

$$A = \frac{A_s}{a_s}$$

$$A = \frac{0,002}{0,227} = 0,0087 \text{ m}^2$$

3. Luas tanah di sekitar kolom unit sel

$$A_c = A - A_s$$

$$A_c = 0,0087 - 0,002 = 0,0067 \text{ m}^2$$

4. Area replacement ratio tanah unit sel

$$a_c = 1 - a_s$$

$$a_c = 1 - 0,227$$

$$a_c = 0,773$$

5. Total tegangan lateral tanah

Kegagalan *bulging* terjadi di kedalaman 2 – 3 diameter. Diasumsikan kegagalan terjadi Di 2,5 diameter, sehingga

tegangan *overburden* tanah pada kedalaman tersebut adalah :

$$\sigma_c = \gamma_1 \cdot h_1 + z \cdot \gamma_2$$

$$\sigma_c = (16,68 \cdot 0,04) + ((2,50 \cdot 0,05) \cdot 16,41)$$

$$\sigma_c = 2,72 \text{ kN/m}^2$$

Nilai  $K_o$ ,

$$K_o = \frac{\nu}{1-\nu}$$

Angka *Poisson* untuk tanah lempung tak jenuh  $\nu = 0,3$  menurut (Bowles, 1997)

$$K_o = \frac{0,3}{1-0,3}$$

$$K_o = 0,429$$

Tegangan lateral,

$$\sigma_{ro} = K_o \times \sigma_c$$

$$\sigma_{ro} = 0,429 \times 2,72$$

$$\sigma_{ro} = 1,17 \text{ kN/m}^2$$

Tabel 7. Nilai Tegangan Lateral Tanah ( $\sigma_{ro}$ ) untuk Semua Sampel

Nama Sampel	Panjang Kolom (m)	Tebal Pasir (m)	z (m)	$K_o$	$\sigma_c$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_{ro}$ (kN/m <sup>2</sup> )
TK+TP	-	-	-	-	-	-
2K+TP	0,1	0	0,1	0,429	1,64	0,70
3K+TP	0,15	0	0,125	0,429	2,05	0,88
4K+TP	0,2	0	0,125	0,429	2,05	0,88
TK+2P	-	-	-	-	-	-
2K+2P	0,1	0,02	0,1	0,429	1,97	0,85
3K+2P	0,15	0,02	0,125	0,429	2,39	1,02
4K+2P	0,2	0,02	0,125	0,429	2,39	1,02
TK+4P	-	-	-	-	-	-
2K+4P	0,1	0,04	0,1	0,429	2,31	0,99
3K+4P	0,15	0,04	0,125	0,429	2,72	1,17
4K+4P	0,2	0,04	0,125	0,429	2,72	1,17

6. Tegangan ultimit kolom tunggal (unit sel)

$$q_{ult(s)} = \left\{ \sigma_{ro} + c \left( 1 + \log_e \frac{E_c}{2c(1+\nu)} \right) \right\} \left( \frac{1 + \sin \phi_s}{1 - \sin \phi_s} \right)$$

$$q_{ult(s)} = \left\{ 1,17 + 1,87 \left( 1 + \log_e \frac{9,35}{2 \cdot 1,87(1+0,3)} \right) \right\} \left( \frac{1 + \sin 6,52}{1 - \sin 6,52} \right)$$

$$q_{ult(s)} = 5,35 \text{ kN/m}^2$$

Nilai  $q_{ult(s)}$  merupakan tegangan maksimum untuk satu buah kolom, sedangkan tegangan untuk satu buah unit sel, nilai dari  $q_{ult(s)}$  harus dijumlahkan dengan nilai  $q_{ult(c)}$

$$q_{ult} = q_{ult(s)} \cdot a_s + q_{ult(c)} \cdot a_c$$

$$q_{ult} = 5,35 \cdot 0,227 + 11,39 \cdot 0,773$$

$$q_{ult} = 10,02 \text{ kN/m}^2$$

7. Daya dukung ultimit kolom tunggal dan grup

Daya dukung ultimit kolom tunggal didapatkan dengan mengalikan  $q_{ult}$  dengan luasan satu buah unit sel (A)

$$P_{ult \text{ tgl}(1)} = q_{ult} \times A$$

$$P_{ult \text{ tgl}(1)} = 10,02 \cdot 0,0087$$

$$P_{ult \text{ tgl}(1)} = 0,087 \text{ kN}$$



sedangkan untuk mendapatkan daya dukung ultimit grup,  $P_{ult\ tgl}$  dikalikan dengan jumlah kolom dalam satu grup, dalam pengujian ini jumlah kolom adalah 3 buah

$$P_{ult\ grup(1)} = P_{ult\ tgl(1)} \times 3$$

$$P_{ult\ grup(1)} = 0,087 \times 3$$

$$P_{ult\ grup(1)} = 0,260\text{ kN}$$

Tabel 8. Daya Dukung Kolom Tunggal

Nama Sampel	$a_s$ Unit Sel	$a_c$ Unit Sel	$q_{ult(c)}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$q_{ult(s)}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$q_{ult}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$P_{ult\ tgl}$ (kN)	$P_{ult\ grup}$ (kN)
TK+TP	0	1	9,61	-	9,61	0,083	0,250
2K+TP	0,227	0,773	9,61	4,77	8,51	0,074	0,221
3K+TP	0,227	0,773	9,61	4,99	8,56	0,074	0,222
4K+TP	0,227	0,773	9,61	4,99	8,56	0,074	0,222
TK+2P	0	1	10,48	-	10,48	0,091	0,272
2K+2P	0,227	0,773	10,48	4,95	9,23	0,080	0,240
3K+2P	0,227	0,773	10,48	5,17	9,28	0,080	0,241
4K+2P	0,227	0,773	10,48	5,17	9,28	0,080	0,241
TK+4P	0	1	11,39	-	11,39	0,099	0,296
2K+4P	0,227	0,773	11,39	5,13	9,97	0,086	0,259
3K+4P	0,227	0,773	11,39	5,35	10,02	0,087	0,260
4K+4P	0,227	0,773	11,39	5,35	10,02	0,087	0,260

#### 4.2.3. Analisis Kolom Grup

Berikut contoh analisis daya dukung kolom grup pada sampel kolom L/D 4 dan timbunan pasir 4 cm (4K+4P).

Data perhitungan :

Diameter kolom (D)	: 0,05 m
Jarak Kolom (s)	: 0,1 m
Panjang kolom (L)	: 0,2 m
Jumlah kolom dalam grup	: 3 buah
Luas kolom ( $A_s$ ) grup	: 0,006 m <sup>2</sup>
Sudut geser internal kolom ( $\phi_s$ )	: 6,52°
Kohesi tanah (c)	: 1,87 kN/m <sup>2</sup>
Berat volume tanah ( $\gamma$ )	: 16,41 kN/m <sup>3</sup>
Modulus elastisitas kolom ( $E_s$ )	: 64,16 kN/m <sup>2</sup>

##### 1. Area replacement ratio dan luas area kolom grup

Pada analisis kolom grup, *area replacement ratio* yang digunakan berdasarkan *area replacement ratio* unit sel seperti pada analisis kolom tunggal.

$$a_s : 0,227$$

$$a_c : 0,773$$

Dalam analisis kolom grup luas kolom ( $A_s$ ) adalah luas total dari 3 kolom dalam satu grup. Sedangkan luas total (A) dihitung melalui persamaan berikut :

$$A = \frac{A_s}{a_s}$$

$$A = \frac{0,006}{0,227} = 0,026$$

Sehingga luas tanah di sekitar kolom ( $A_c$ ) grup adalah

$$A_c = A - A_s$$

$$A_c = 0,026 - 0,006 = 0,020\text{ m}^2$$

##### 2. Faktor konsentrasi tegangan (n)

Faktor konsentrasi tegangan dapat ditentukan dengan nilai  $\sigma_s$  dan  $\sigma_c$  dapat digantikan oleh nilai modulus elastisitas ( $E_s$  dan  $E_c$ )

$$n = \frac{E_s}{E_c} = \frac{64,16}{9,35} = 6,86$$

##### 3. Konsentrasi tegangan pada kolom ( $\mu_s$ )

$$\mu_s = \frac{n}{1+(n-1) \times a_s}$$

$$\mu_s = \frac{6,86}{1+(6,86-1) \times 0,227} = 2,95$$

##### 4. Perhitungan nilai parameter komposit $\phi_{avg}$ , $c_{avg}$ dan $\beta$

$$\phi_{avg} = \tan^{-1}(\mu_s a_s \tan \phi_s)$$

$$\phi_{avg} = \tan^{-1}(2,95 \cdot 0,227 \cdot \tan(6,52))$$

$$\phi_{avg} = 4,37^\circ$$

$$c_{avg} = (1-a_s)c_2$$

$$c_{avg} = (1-0,227)1,87$$

$$c_{avg} = 1,45\text{ kN/m}^2$$

$$\beta = 45^\circ + \frac{\phi_{avg}}{2}$$

$$\beta = 45^\circ + \frac{4,37^\circ}{2}$$

$$\beta = 47,18^\circ$$

##### 5. Tegangan lateral ultimit ( $\sigma_3$ )

Nilai B (lebar kolom grup) ditentukan dari jari-jari lingkaran luasan total kolom grup (A), yaitu sebagai berikut:

$$B = \sqrt{\frac{A}{0,25 \pi}}$$

$$B = \sqrt{\frac{0,026}{0,25 \pi}}$$

$$B = 0,18\text{ m}$$

$$\sigma_3 = \frac{\gamma_2 B \tan \beta}{2} + 2c_2$$

$$\sigma_3 = \frac{16,41 \cdot 0,18 \cdot \tan(47,18)}{2} + 2(1,87)$$

$$\sigma_3 = 5,35\text{ kN/m}^2$$

##### 6. Daya dukung ultimit kolom grup

$$q_{ult(s)} = \sigma_3 \tan^2 \beta + 2 c_{avg} \beta$$

$$q_{ult(s)} = 5,35 \tan^2(47,18) + 2 \cdot 1,45 \cdot 47,18$$

$$q_{ult(s)} = 8,61\text{ kN/m}^2$$

Nilai  $q_{ult(s)}$  merupakan tegangan ultimit kolom grup. Namun untuk mendapatkan daya dukung ultimit kolom

grup, nilai ini perlu dijumlahkan dengan nilai  $q_{ult(c)}$  sebagai pengaruh lapisan timbunan pasir dan dikali terhadap luasannya masing-masing.

$$P_{ult(4)} = q_{ult(s)} \cdot A + q_{ult(c)} \cdot A_c$$

$$P_{ult(4)} = 8,61 \cdot 0,026 + 11,39 \cdot 0,020$$

$$P_{ult(4)} = 0,453 \text{ kN}$$

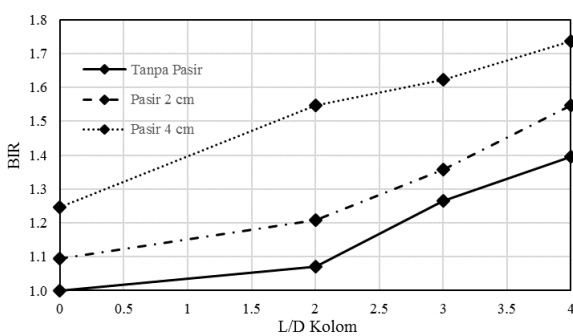
Tabel 9. Daya Dukung Kolom Grup

Nama Sampel	$q_{ult(s)}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$q_{ult(c)}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$P_{ult}$ grup (kN)
TK+TP	-	9,61	0,250
2K+TP	8,61	9,61	0,417
3K+TP	8,61	9,61	0,417
4K+TP	8,61	9,61	0,417
TK+2P	-	10,48	0,272
2K+2P	8,61	10,48	0,434
3K+2P	8,61	10,48	0,434
4K+2P	8,61	10,48	0,434
TK+4P	-	11,39	0,296
2K+4P	8,61	11,39	0,453
3K+4P	8,61	11,39	0,453
4K+4P	8,61	11,39	0,453

### 4.3. Pembahasan

#### 4.3.1. Bearing Improvement Ratio

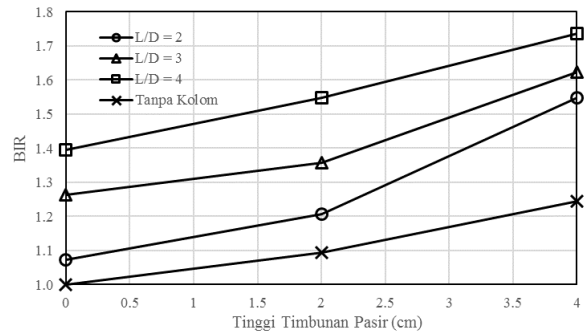
Pengaruh rasio panjang kolom menunjukkan peningkatan BIR pada semua variasi tinggi timbunan. Pada variasi timbunan pasir 2 cm dan tanpa timbunan menunjukkan perilaku yang cukup mirip, yaitu pada rasio panjang kolom 2 peningkatan daya dukung yang terjadi kecil dibandingkan peningkatan pada rasio kolom 3 dan 4. Namun pada variasi timbunan 4 cm perilakunya sebaliknya, yaitu peningkatan daya dukung pada rasio kolom 2 cukup besar dan mulai melandai pada rasio kolom 3 dan 4.



Gambar 13. Grafik Hubungan *Bearing Improvement Ratio* Terhadap Rasio Panjang Kolom (L/D)

Gambar 14 menunjukkan pengaruh tinggi timbunan terhadap rasio kenaikan daya dukung (BIR). Kenaikan yang terjadi pada variasi sampel dengan rasio kolom 3, 4 dan tanpa kolom menunjukkan kenaikan BIR yang linear. Namun pada rasio kolom 2 perilakunya menunjukkan kenaikan BIR yang cukup besar pada tinggi timbunan 4 dibanding tinggi timbunan 2 cm.

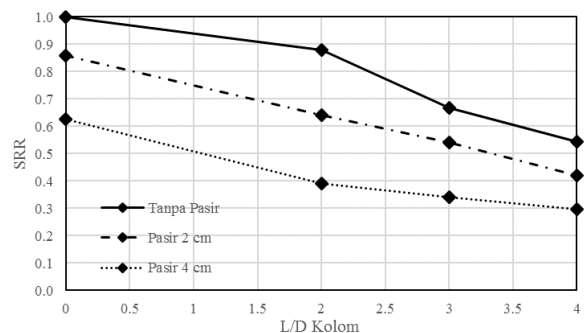
Secara keseluruhan rentang nilai *bearing improvement ratio* pada penelitian ini adalah 1,07 – 1,74. *Bearing improvement ratio* terbesar diberikan oleh variasi rasio panjang kolom (L/D) 4 dan tinggi timbunan 4 cm yaitu sebesar 1,74. Hal ini berarti pemasangan kolom tinggi 20 cm dan timbunan pasir 4 cm pada tanah dapat meningkatkan daya dukung tanah hingga 1,74 kali dari daya dukung tanah tanpa perkuatan atau naik sekitar 74 %.



Gambar 14. Grafik Hubungan *Bearing Improvement Ratio* Terhadap Tinggi Timbunan Pasir

#### 4.3.2. Settlement Reduction Ratio

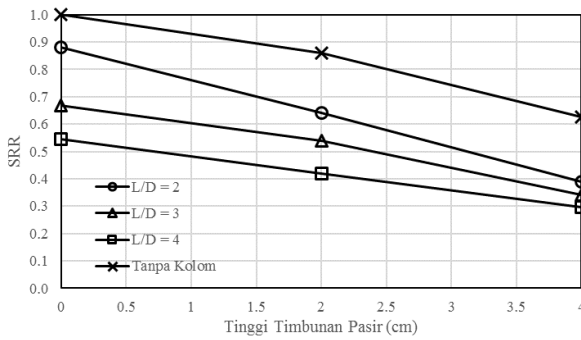
Pengaruh besar rasio panjang kolom terhadap SRR menunjukkan penurunan rasio untuk semua variasi tinggi pasir. Pada variasi tanpa timbunan, rasio kolom menunjukkan perilaku penurunan SRR yang tidak seragam. Dari grafik dapat dilihat penurunan SRR pada sampel tanpa timbunan, pada rasio kolom 3 rasio SRR terbesar diberikan dibanding rasio kolom 2 dan 4. Pada variasi timbunan pasir dengan tinggi 2 cm, penurunan SRR terjadi cenderung linear. Pada variasi timbunan pasir setinggi 4 cm penurunan nilai SRR makin kecil seiring makin besarnya rasio panjang kolom, penurunan SRR terbesar diberikan pada rasio kolom 2.



Gambar 15. Grafik Hubungan *Settlement Reduction Ratio* Terhadap Rasio Panjang Kolom (L/D)

Gambar 16 menunjukkan pengaruh tinggi timbunan pasir terhadap penurunan nilai SRR untuk semua variasi rasio kolom. Pada variasi sampel tanpa kolom menunjukkan penurunan SRR yang lumayan besar pada tinggi pasir 4 cm. Untuk sampel dengan kolom menunjukkan pengaruh semakin besar rasio panjang kolom, semakin kecil

pengaruh penambahan tinggi timbunan pasir memberikan pengaruh terhadap penurunan nilai SRR. Secara keseluruhan rentang nilai *settlement reduction ratio* pada penelitian ini adalah 0,30 – 0,88. *Settlement reduction ratio* terkecil diberikan oleh variasi rasio panjang kolom (L/D) 4 dan tinggi timbunan 4 cm yaitu sebesar 0,30. Hal ini berarti pemasangan kolom tinggi 20 cm dan timbunan pasir 4 cm pada tanah dapat mengurangi penurunan tanah hingga 0,30 kali dari penurunan tanah tanpa perkuatan atau berkurang sekitar 70 %.



Gambar 16. Grafik Hubungan *Settlement Reduction Ratio* Terhadap Tinggi Timbunan Pasir

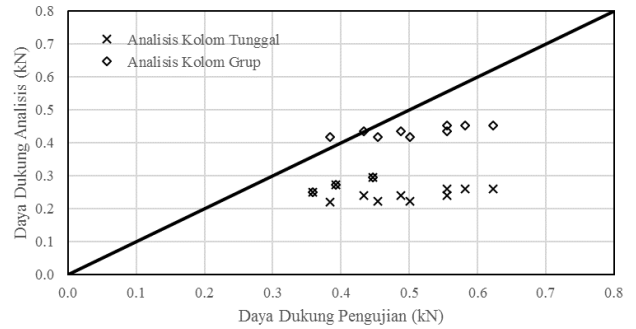
#### 4.3.3. Perbandingan Daya Dukung Pengujian dan Teoritis

Rekapitulasi hasil daya dukung dari pengujian dan hasil analisis teoritis dapat dilihat pada Tabel 10 yang kemudian digambarkan ke dalam grafik pada Gambar 17. Pada grafik tiap titik menggambarkan masing-masing variasi sampel pengujian. Semakin dekat nilai dengan garis linear semakin dekat pula hasil perhitungan analisis teoritis dengan nilai daya dukung hasil pengujian di laboratorium.

Tabel 10. Rekapitulasi Daya Dukung Pengujian dan Teoritis

Nama Sampel	Daya Dukung Pengujian (kN)	Daya Dukung Analisis (kN)	
		Analisis Kolom Tunggal	Analisis Kolom Grup
TK+TP	0,359	0,250	0,250
2K+TP	0,384	0,221	0,417
3K+TP	0,453	0,222	0,417
4K+TP	0,501	0,222	0,417
TK+2P	0,392	0,272	0,272
2K+2P	0,433	0,240	0,434
3K+2P	0,487	0,241	0,434
4K+2P	0,555	0,241	0,434
TK+4P	0,447	0,296	0,296
2K+4P	0,555	0,259	0,453
3K+4P	0,582	0,260	0,453
4K+4P	0,623	0,260	0,453

Hasil daya dukung teoritis analisis secara kolom tunggal maupun kolom grup menunjukkan nilai yang hampir seragam untuk semua variasi rasio panjang kolom, hal ini disebabkan karena dalam perhitungannya sama-sama tidak memperhitungkan pengaruh panjang kolom. Sehingga perhitungan secara teoritis pada penelitian ini belum bisa menggambarkan hasil sesungguhnya dari pengaruh rasio L/D dalam pengujian skala laboratorium.



Gambar 17. Perbandingan Daya Dukung Pengujian dan Teoritis

## 5. KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1. Kesimpulan

- Berdasarkan hasil uji pembebanan, semakin besar rasio panjang kolom dan tebal lapisan timbunan pasir maka daya dukung tanah dan reduksi penurunan tanah akan semakin meningkat. Daya dukung maksimum dari uji pembebanan diberikan oleh variasi rasio panjang kolom 4 (panjang kolom 20 cm) dan tinggi lapisan timbunan pasir 4 cm. Nilai daya dukung maksimum adalah 0,623 kN dengan peningkatan daya dukung sebesar 1,74 kali atau naik sekitar 74 %
- Reduksi penurunan maksimum dari uji pembebanan diberikan oleh variasi rasio panjang kolom 4 (panjang kolom 20 cm) dan tinggi lapisan timbunan pasir 4 cm yaitu dengan rasio reduksi sebesar 0,30. Hal ini berarti penurunan tanah berkurang hingga 0,30 kali dari penurunan tanah tanpa perkuatan atau berkurang sekitar 70 %
- Dari perbandingan daya dukung hasil uji pembebanan dan hasil analisis teoritis, perhitungan secara teoritis belum cukup tepat menggambarkan hasil daya dukung kombinasi pengaruh rasio panjang kolom dan tinggi lapisan timbunan pasir.

### 5.2. Saran

- Pada penelitian ini kuat geser tanah dalam bak sangat berpengaruh terhadap penelitian, sehingga perlu diperhatikan dan dikondisikan agar selama pengujian untuk semua variasi sampel nilainya tetap konstan
- Variasi rasio panjang kolom dan tinggi timbunan pasir perlu ditambah untuk mendapatkan nilai optimal rasio panjang kolom (L/D) untuk perkuatan dan penurunan
- Pada penelitian ini deformasi kolom setelah uji pembebanan tidak dilihat, untuk penelitian selanjutnya deformasi ini perlu diamati untuk melihat pengaruh rasio panjang kolom dan lapisan timbunan pasir terhadap bentuk kegagalan kolom
- Untuk penelitian selanjutnya analisis secara teoritis dapat dilakukan dengan pendekatan elemen hingga

(*finite element*) melalui program komputer untuk dibandingkan dengan hasil pengujian di laboratorium.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Ambily, A. P., & Gandhi, S. R. (2006). Effect of Sand Pad Thickness on Load Sharing in Stone Column. *Proceedings Indian Geotechnical Conference*, (hal. 555-556). Chennai.
- [2] Bachus, R. C., & Barksdale, R. D. (1983). *Design and Construction of Stone Columns, Volume I*.
- [3] Bachus, R. C., & Barksdale, R. D. (1983). *Design and Construction of Stone Columns, Volume II*.
- [4] Bergado, D., Alfaro, M., & Chai, J. (1991). The Granular Pile: Its Present State and Future Prospects for Improvement of Soft Bangkok Clay. *Journal of South Asian Society of Soil Engineering. Geotechnical Engineering*, 22, 143-171.
- [5] Bowles, J. E. (1997). *Foundation Analysis and Design*. The McGraw-Hill Companies, Inc.
- [6] Deb, K. (2008). Modeling of Granular bed-stone column-improved Soft Soil. *International journal for numerical and analytical methods in geomechanics*, 32(10), 1267-1288.
- [7] Deb, K., Samadhiya, N. K., & Namdeo, J. B. (2011). Laboratory Model Studies on Unreinforced and Geogrid-reinforced Sand Bed over Stone Column-improved Soft Clay. *Geotextiles and Geomembranes*, 29(2), 190-196.
- [8] El-Garhy, B., Maraie, M., & Youssef, A. F. (2011). Behavior of Model Footings Resting on Soft Clay Reinforced by Floating Granular Piles: Experimental Study. *International Journal of Geotechnical Engineering*, 5(4), 415-424.
- [9] Hugher, J. M., & Withers, N. J. (1974). Reinforcing of Soft Cohesive Soils with Stone Columns. *Ground Engineering*, 7(3), 42-49
- [10] McKelvey, D., Sivakumar, V., Bell, A., & Graham, J. (2004). Modelling Vibrated Stone Columns in Soft Clay. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, (hal. 137-149).
- [11] Meyerhof, G. G., & Hanna, A. M. (1978). Ultimate Bearing Capacity of Foundations on Layered Soils under Inclined Load. *Canadian Geotechnical Journal*, 15(4), 565-572.
- [12] Mitchell, J. K. (1981). Soil Improvement-State of The Art Report. *Proc., 11th Int. Conf. on SMFE*, 4, hal. 509-565.
- [13] Najjar, S. S. (2013). A State-of-the-Art Review of Stone/Sand-Column Reinforced Clay Systems. *Geotechnical and Geological Engineering*, 355-386.
- [14] Putri, A., Muhandi, M., & Fatnanta, F. (2017). Pengaruh Variasi Diameter dan Jarak Kolom Campuran Abu Terbang dan Abu Dasar dengan Pola Segi Empat Terhadap Daya Dukung Tanah Gambut.
- [15] Rao, S., Prasad, Y. V., & Rao, V. (1992). Use of Stone Columns in Soft Marine Clays. *Proceedings of The 45th Canadian Geotechnical Conference*, (hal. 26-28). Toronto.
- [16] Shahu, J. T., Madhav, M. R., & Hayashi, S. (2000). Analysis of Soft Ground-granular pile-granular mat System. *Computers and Geotechnics*, 27(1), 45-62.
- [17] Sivakumar, V., Jeludine, D. K., Bell, A., Glynn, D. T., & Mackinnon, P. (2011). The Pressure Distribution along Stone Columns in Soft Clay under Consolidation and Foundation Loading. *Géotechnique*, 61(7), 613-630.
- [18] Wood, D., Hu, W., & Nash, D. F. (2000). Group Effects in Stone Column Foundations: Model Tests. *Geotechnique*, 50(6), 689-698.
- [5] Bowles, J. E. (2001). *Foundation Analysis and Design*. The McGraw-Hill Companies, Inc.